



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

MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO EM MALHAS DE SUBESTAÇÕES CONECTADAS A CABOS PARA-RAIOS

ERICLES MAURICIO BARBOSA(1); ALEXANDER BARROS LIMA(1); FABRÍCIO BRADASCHIA(1); MARCIO EVARISTO DA CRUZ BRITO(1); GUSTAVO MEDEIROS DE SOUZA AZEVEDO; ZANONI DUEIRE LINS(1); LEONARDO RODRIGUES LIMONGI(1); ROGÉRIO DE LIMA E SÁ(2);

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO(1); COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA COELBA(2)

RESUMO

Neste Informe Técnico, é feita uma avaliação das características gerais relativas à medição da resistência de aterramento de malhas instaladas em subestações. Os desenvolvimentos são baseados em simulações computacionais e em medições de campo. Nas simulações, é avaliada a condição em que um cabo para-raios está conectado à malha de aterramento, sendo verificada a influência de parâmetros como a resistência do cabo para-raios e a resistência de aterramento das estruturas da linha de transmissão em relação à corrente que sobe pelo cabo para-raios. São apresentados, também, os resultados obtidos em medições realizadas em um campo de teste e, também, em subestações. As medições foram realizadas com um equipamento que está em desenvolvimento no âmbito de um Projeto de P&D e com outro que opera em alta frequência (25 kHz). Como referência para os ensaios, também foram realizadas medições com o CPC100 da Omicron.

PALAVRAS-CHAVE: Aterramento de subestação; Medição em malhas de aterramento; Terrômetro; Método da Queda de Potencial; Resistência de aterramento.

1.0 - INTRODUÇÃO

O aterramento de uma subestação (SE) visa, fundamentalmente, o controle dos potenciais de passo e de toque e, também, garantir que as correntes de falha ocorram em níveis adequados de modo a sensibilizar o sistema de proteção de retaguarda. É importante, portanto, que o valor da resistência de aterramento da malha, R_g , apresente valores que sejam compatíveis com tais características. Nesse sentido, a medição de R_g é condição fundamental para se avaliar a efetividade da malha projetada e implementada. Particularmente, a medição de R_g em uma SE pode ter como elemento complicador o fato de a malha poder estar conectada ao cabo para-raios (PR) de linhas de transmissão. Isso porque, esses cabos representam um caminho de desvio para a corrente injetada pelo equipamento de medição (EM). Além disso, em uma SE energizada, correntes espúrias podem estar presentes em níveis que dificultariam ou até inviabilizariam as medições, quando realizadas com técnicas e equipamentos convencionais. O guia IEEE Std 81 [1] e a Norma ABNT NBR 15749 [2] tratam, em certa medida, desse tipo de medição. Particularmente, a Norma ABNT apresenta em um de seus anexos alguns métodos de medição aplicáveis em instalações energizadas. Chama a atenção, contudo, as limitações que as técnicas, naturalmente, apresentam. Cita-se como exemplo, o Método da queda de potencial com baixas correntes e onda quadrada. Segundo a Norma, essa técnica se aplica a instalações energizadas ou não. Contudo, o seu uso fica condicionado à necessidade de se desconectar a malha dos demais elementos do sistema de aterramento, como o cabo PR e neutros. É apresentado, também, o Método de Medição em Alta Frequência. Nesse caso, segundo orientação da Norma, o EM deve operar em uma “frequência tal que a impedância indutiva do(s) cabo(s) para-raios de uma ou mais linhas de transmissão acopladas a subestação, em um vão de comprimento normal, seja razoavelmente alta a ponto de se reduzir o efeito dos aterramentos adjacentes ao que se está medindo.” Entretanto, os trabalhos recentes de Panicali [3,4] mostram que, em alta frequência (25 kHz), os efeitos indutivos já afetam a distribuição de corrente na malha. Mostra, também, que nessa frequência o aterramento já não apresenta características de uma resistência, dando lugar a uma impedância. Este Informe Técnico, insere-se nesse contexto, sendo apresentado resultados de análises baseadas em simulações computacionais do sistema de medição e, também, resultados de medições de campo.

2.0 - ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM ARRANJO DE MEDIÇÃO TÍPICO

Em uma SE energizada, a medição da resistência de aterramento da malha requer cuidados específicos devido a condições desfavoráveis muitas vezes presentes. Nesse sentido, destaca-se a existência de diversos caminhos de retorno para a corrente de medição. O impacto dessa condição é avaliado nesta seção por meio de simulações utilizando a ferramenta computacional PSPICE.

Sem perda de generalidade, nas análises realizadas a seguir é considerado um único ponto de conexão entre a malha de aterramento e o cabo para-raios (PR), como apresentado na Figura 1. Nela, são indicados os caminhos das correntes presentes durante uma medição, sendo I_m a corrente injetada pelo equipamento de medição (EM), I_g a corrente dispersada no solo através da malha e I_s a corrente que sobe pelo cabo PR, se dispersando no solo através do aterramento das estruturas da linha de transmissão (LT).

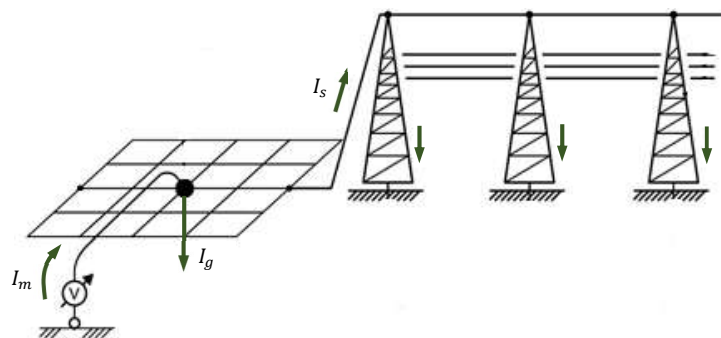


Figura 1 – Arranjo utilizado nas análises desenvolvidas e a indicação das correntes presentes durante uma medição.
Fonte: adaptado de [2].

A representação esquemática do arranjo é apresentada na Figura 2, onde, R_{gSE} é a resistência de aterramento da malha da SE, R_{gT} é a resistência de aterramento de cada uma das estruturas da LT, Z_{CPR} é a impedância do cabo PR e V_g é a tensão que surge no aterramento da SE durante o processo de medição. Fica evidente, portanto, que a tensão desenvolvida no aterramento da SE não é devido a corrente fornecida pelo EM (I_g), e sim por apenas uma parcela dessa corrente (I_g).

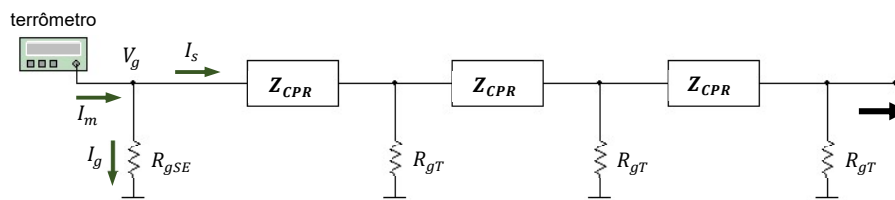


Figura 2 – Representação esquemática do arranjo utilizado nas análises.

2.1 - Modelagem do sistema

Considerando que a frequência da corrente utilizada nas análises é relativamente baixa (100 Hz), o aterramento da SE (malha) é modelado apenas por uma resistência. Já o cabo PR, devido ao longo comprimento da LT, é modelado como uma impedância. Portanto, a rede formada pelos n elementos Z_{CPR} e R_{gT} dá origem a impedância de saída da SE, Z_s , conforme o modelo esquemático apresentado na Figura 3.

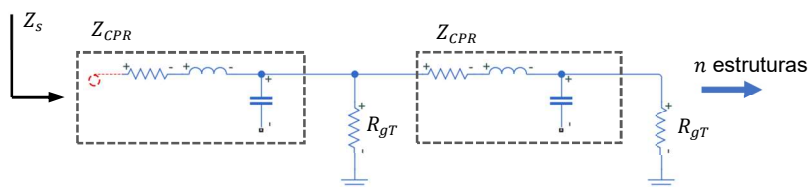


Figura 3 – Impedância de saída da SE, Z_s , “vista” a partir do ponto de conexão com a malha.

Os parâmetros indutância e capacitância, por unidade de comprimento, são obtidos a partir do desenvolvimento da teoria eletromagnética, por meio da qual são obtidas as equações apresentadas a seguir [5,6].

$$L_{PR} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad [\text{H/m}] \quad (1)$$

$$C_{PR} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad [\text{F/m}] \quad (2)$$

sendo, μ a permeabilidade magnética, ϵ a permissividade elétrica, h a altura do cabo em relação ao solo e r o raio do cabo. Para o parâmetro h , foi considerado o valor médio das alturas máxima e mínima do cabo PR (flecha) nos vãos, tendo as estruturas 30 m de altura [7,8]. O raio e a resistência do cabo PR (R_{PR}) foram obtidos a partir de catálogos de fabricantes, tendo como base as informações disponíveis em [9]. Os valores utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores utilizados na modelagem do cabo para-raios.

altura (m)	r_{medio} (mm)	R_{PR} (mΩ/m)	L_{PR} (μH/m)	C_{PR} (pF/m)
30	4,4	3,0	1,9	5,8

O circuito de medição apresentado na Figura 2 pode ser reduzido ao seu equivalente (Figura 4). Esse circuito evidencia que a relação entre a tensão V_g e a corrente I_m determina, de fato, a impedância do sistema de aterramento, e não a resistência de aterramento da malha da SE. Portanto, nesta aplicação, o uso do Método da Queda de Potencial (*Fall of Potential* – FoP), de maneira convencional, é inadequado.

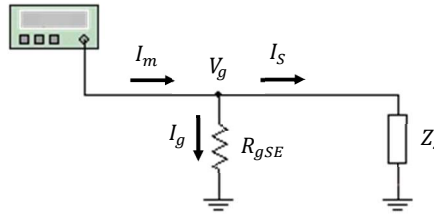


Figura 4 – Circuito simplificado de medição.

Em uma condição prática, certamente, seria desejável que a corrente I_m pudesse ser considerada aproximadamente igual a I_g . Disso decorre a necessidade de se avaliar a influência dos parâmetros associados a Z_s em relação a corrente que sobe pelo cabo PR, I_s . De acordo com a representação esquemática apresentada na Figura 4, a corrente que sobe pelo cabo PR pode ser assim definida:

$$I_s = K_s \cdot I_m \quad (3)$$

sendo, K_s um coeficiente de divisão de corrente, onde

$$K_s = \frac{R_{gSE}}{R_{gSE} + Z_s} \quad (4)$$

Portanto, a corrente que flui para o solo através da malha é igual a

$$I_g = I_m (1 - K_s) \quad (5)$$

Assim, segundo a equação (4), as correntes I_g e I_s são dependentes tanto da resistência da malha (R_{gSE}), como da impedância de saída da SE (Z_s), ou seja, essas correntes são dependentes das características do cabo PR (Z_{CPR}), da resistência de aterramento das estruturas da LT (R_{gE}) e da resistência da malha da SE, de modo indissociável. Ressalta-se, ainda, que as análises são realizadas considerando que o EM opera com uma corrente na frequência de 100 Hz e que os vãos entre as estruturas são de 300 m.

2.2 - Caracterização da impedância Z_s

A impedância Z_s é dependente dos parâmetros por unidade de comprimento (R_{PR} , L_{PR} e C_{PR}) associados ao cabo PR e, também, da resistência de aterramento das estruturas da linha. Consequentemente, existe uma dependência dessa impedância em relação às características construtivas da LT (altura, diâmetro e o material do cabo PR) e,

também, em relação às características do aterramento das estruturas da LT (dimensão e resistividade do solo). Neste trabalho, contudo, está sendo considerado um tipo específico de estrutura (30 m de altura e cabo de raio médio igual 4,4 m). Consequentemente, não há variação dos parâmetros L_{PR} e C_{PR} . Na Tabela 2, são apresentados os valores da impedância Z_s , considerando a variação do número de estruturas (n_e) e, também, o valor da resistência de aterramento das estruturas (R_{gT}). Já a resistência do cabo PR (R_{PR}) foi mantida constante (3 Ω /km). Os resultados indicam que, quando se considera uma quantidade crescente do número de estruturas, o módulo da impedância Z_s tende a diminuir. Já o ângulo, tende a aumentar. Verifica-se, ainda, que o aumento no valor de R_{gT} também leva a um aumento no módulo de Z_s . Já o ângulo, tende a diminuir. Ressalta-se, contudo, que a tendência de aumento do módulo e redução do ângulo da impedância Z_s não é linear. Os resultados indicam, também, que a partir de um certo número de estruturas, a impedância já não apresenta variação significativa.

Tabela 2 – Variação da impedância Z_s , sendo $R_{PR} = 3 \Omega/\text{km}$.

n_e	$Z_s (\Omega)$		
	$R_{gT} = 20 \Omega$	$R_{gT} = 40 \Omega$	$R_{gT} = 60 \Omega$
10	3,791 \angle 16,91°	5,814 \angle 12,14°	7,805 \angle 9,37°
15	3,667 \angle 19,99°	5,192 \angle 16,99°	6,572 \angle 14,46°
20	3,667 \angle 20,72°	5,072 \angle 19,21°	6,228 \angle 17,55°
25	3,672 \angle 20,84°	5,062 \angle 20,04°	6,145 \angle 19,10°
30	3,673 \angle 20,86°	5,068 \angle 20,30°	6,135 \angle 19,78°
35	3,674 \angle 20,86°	5,072 \angle 20,37°	6,140 \angle 20,05°

Na Tabela 3, são apresentados os valores da impedância Z_s , considerando a variação do número de estruturas e o valor da resistência do cabo PR. O valor de R_{gT} foi fixado em 20 Ω . Os resultados indicam que a variação de Z_s apresenta a mesma tendência verificada na situação anterior. Assim, em ambos os casos, os resultados indicam existir uma estreita dependência da impedância Z_s em relação as resistências R_{PR} e R_{gT} . Portanto, tais parâmetros impactam diretamente no coeficiente K_s e, consequentemente, na corrente que sobe pelo cabo PR.

Tabela 3 – Variação da impedância Z_s , sendo $R_{gT} = 20 \Omega$.

n_e	$Z_s (\Omega)$				
	$R_{PR} = 3 \Omega/\text{km}$	$R_{PR} = 6 \Omega/\text{km}$	$R_{PR} = 9 \Omega/\text{km}$	$R_{PR} = 12 \Omega/\text{km}$	$R_{PR} = 15 \Omega/\text{km}$
10	3,791 \angle 16,91°	4,982 \angle 11,00°	6,067 \angle 8,05°	7,065 \angle 6,33°	7,995 \angle 2,21°
15	3,667 \angle 19,99°	4,907 \angle 11,88°	6,025 \angle 8,36°	7,041 \angle 6,46°	7,981 \angle 5,27°
20	3,667 \angle 20,72°	4,903 \angle 12,01°	6,023 \angle 8,40°	7,040 \angle 6,47°	7,980 \angle 5,27°
25	3,672 \angle 20,84°	4,903 \angle 12,03°	6,023 \angle 8,40°	7,040 \angle 6,47°	7,980 \angle 5,27°
30	3,673 \angle 20,86°	4,903 \angle 12,03°	6,023 \angle 8,40°	7,040 \angle 6,47°	7,980 \angle 5,27°
35	3,674 \angle 20,86°	4,903 \angle 12,03°	6,023 \angle 8,40°	7,040 \angle 6,47°	7,980 \angle 5,27°

2.3 - Caracterização do coeficiente de divisão de corrente, K_s

O coeficiente de divisão de corrente, K_s , é um parâmetro que determina o quanto da corrente de medição sobe pelo cabo PR. Na Figura 5(a), é apresentado um conjunto de curvas que evidenciam a dependência de K_s em relação a resistência do cabo PR e, também, em relação a resistência de aterramento da malha. As curvas indicam que o cenário mais crítico, como esperado, acontece quando a resistência do cabo PR é baixa e a resistência da malha é alta. Para essa situação, aproximadamente, 80% da corrente de medição sobe pelo cabo PR. Já o cenário mais favorável é aquele onde a resistência do cabo PR é alta e a resistência da malha é baixa, situação essa em que, aproximadamente, 15% da corrente de medição sobe pelo cabo PR. Na Figura 5(b), também é apresentado um conjunto de curvas associados a variação de K_s . Contudo, nesse caso, a variação é em relação a resistência de aterramento das estruturas e da malha da SE. As curvas indicam existir a mesma tendência de variação para K_s verificada no caso anterior, sendo os valores também bem próximos.

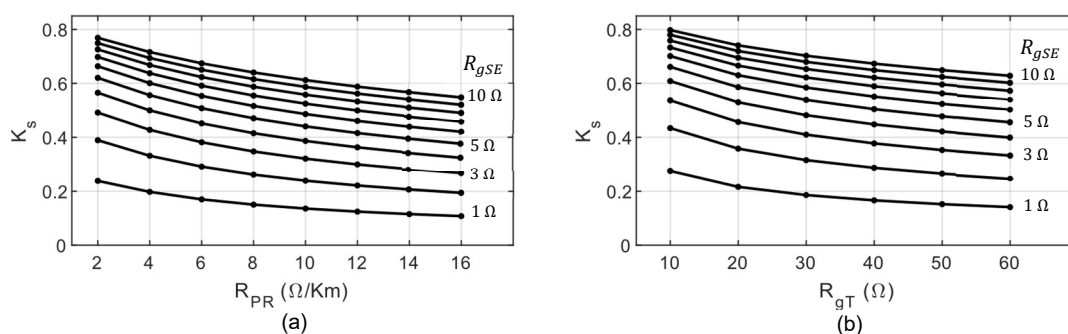


Figura 5 – Variação do coeficiente K_s em relação a: (a) R_{PR} , sendo $R_{gT} = 20 \Omega$; e (b) R_{gT} com $R_{PR} = 3 \Omega/\text{km}$.

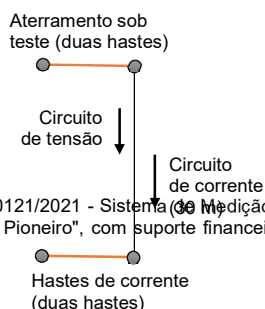
De modo geral, portanto, os resultados apresentados indicam que, mesmo para um cenário mais favorável (baixo valor de R_{gSE} com altos valores de R_{PR} e R_{gT}), ainda assim, a corrente que sobe pelo cabo PR pode ser significativa. Além disso, é importante ressaltar que em uma condição de campo não há como saber de antemão as condições dos parâmetros que influenciam o coeficiente K_s . Portanto, qualquer tentativa de estimativa desse coeficiente poderia levar a erros significativos. Disso decorre a necessidade de se propor alguma técnica ou dispositivo que torne a medição de resistência de aterramento em uma SE adequada. Nesse sentido, é importante mencionar a existência de equipamentos que operam com correntes de medição em alta frequência (25 kHz). A proposta destes equipamentos é baseada no conceito de que, para essa frequência, a reatância associada ao cabo PR seria significativamente elevada, de modo que o coeficiente K_s seria muito baixo. Entretanto, essa proposta não leva em consideração a significativa indutância existente no aterramento de uma SE, devido as suas dimensões. Nesse tipo de aterramento, os efeitos reativos associados à malha tendem a ser bastante pronunciados, de modo que o aterramento já não apresenta características de uma resistência, e sim de uma impedância [3,4]. Parece, então, ser ainda necessário ampliar os estudos utilizando essa frequência para se determinar adequadamente os limites de sua aplicação. Em uma outra abordagem, a corrente I_g pode ser determinada por meio da medição da corrente I_s . Neste caso, o equipamento deve ser capaz de realizar a compensação da corrente que sobe pelo cabo PR ($I_g = I_m - I_s$) e, também, dispor de filtros adequados para lidar com as correntes espúrias presentes na SE. De fato, essa é a proposta que está sendo desenvolvida no âmbito do Projeto de P&D PD-00043¹. A seguir, são apresentados resultados preliminares de medições utilizando o equipamento GMS (*Grounding Measurement System*) que está sendo desenvolvido no referido projeto.

3.0 - TESTES EM CAMPO

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados em condições de campo. As medições foram realizadas utilizando o Método da Queda de Potencial, em duas condições distintas: em um campo de testes e em algumas subestações. Foram utilizados os equipamentos GMS (resultados para 100 Hz), um EM que opera com correntes de alta frequência (25 kHz) e o equipamento CPC100 da Omicron. Visando uma maior clareza, o equipamento de medição de alta frequência será referido neste Informe Técnico apenas como EM25k. Além disso, resalta-se que os resultados obtidos com o CPC100 foram utilizados como referência (*benchmarking*) para avaliar o desempenho dos equipamentos GMS e EM25k. Ressalta-se, ainda, que o GMS está em fase de desenvolvimento, não estando disponíveis, portanto, todas as suas funcionalidades. Assim, os resultados apresentados são baseados nos recursos já implementados, em consonância com a fase de desenvolvimento do Projeto.

3.1 - Campo de testes

Neste ensaio, o aterramento é constituído por duas hastes interligadas. Os circuitos de tensão e de corrente estão posicionados a 0°, um em relação ao outro. Na Figura 6, é apresentada a representação esquemática do arranjo de medição. As medições foram realizadas no campo de testes existente no Campus da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).



¹ Projeto de P&D PD-00043-0120/2020, P&D PD-00043-0121/2021 - Sistema de Medição da Resistência de Aterramento em Subestações Usando Fonte de Injeção de Corrente - Cabeça de Série E Lote Pioneiro", com suporte financeiro da Neoenergia (Celpe) e parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Figura 6 – Arranjo utilizado no campo de testes.

Na Figura 7, são apresentadas as curvas da resistência aparente obtidas com o GMS e com o EM25k, onde se verifica existir boa concordância nos resultados. Verifica-se, também, que o patamar ficou bem caracterizado, indicando ser de, aproximadamente, 14Ω o valor da resistência do aterramento. Além disso, o processamento dos dados indicou que a diferença absoluta dos valores obtidos pelos equipamentos foi sempre menor que $0,452 \Omega$, sendo, portanto, desprezível.

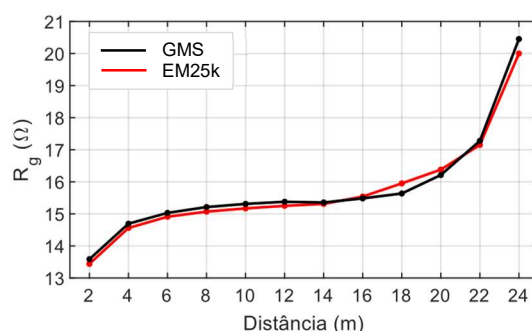
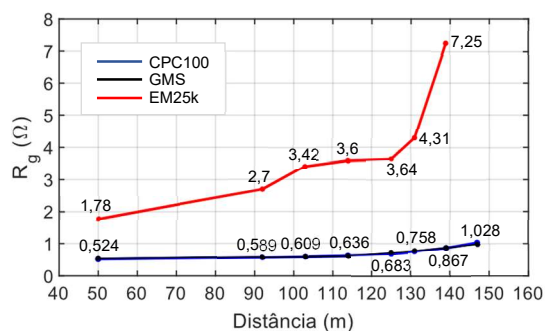


Figura 7 – Resistência de aterramento: resultados obtidos com o GMS e o EM25k.

3.2 - Subestação Tejipió

A seguir, são apresentados os resultados de medições realizadas na SE Tejipió, com dimensão de, aproximadamente, 50 m x 33 m, localizada em Recife/PE. Essa SE não tem um cabo PR conectado à sua malha. É importante ressaltar, também, que o principal objetivo deste ensaio foi avaliar a qualidade dos resultados produzidos pelos equipamentos em condições de campo e não determinar, de fato, o valor da resistência de aterramento da SE.

Na Figura 8, são apresentados os dados obtidos com o GMS, com o EM25k e os respectivos erros. Os resultados indicam que o erro associado a medição com o GMS é bem pequeno para todas as distâncias consideradas. Em relação ao EM25k, isso já não acontece, sendo o erro, em todos os casos, bastante elevado. É importante ressaltar que durante a medição com o EM25k foi utilizado um cabo blindado no circuito de corrente visando mitigar possíveis acoplamentos entre os circuitos de medição. Além disso, os procedimentos de medição foram os mesmos para todos os equipamentos. Diante disso, os resultados sugerem que o equipamento de alta frequência pode estar medindo o módulo da impedância do aterramento, e não sua resistência. Contudo, tal condição ainda será melhor investigada no âmbito do Projeto de P&D já citado, que está em andamento.

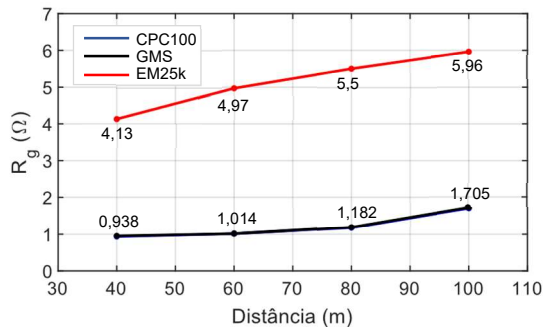


distância (m)	GMS (Ω)	erro (%)	EM25k (Ω)	erro (%)
50	0,542	3,50%	1,78	228%
92	0,596	1,22%	2,70	353%
103	0,614	0,81%	3,42	457%
114	0,622	2,20%	3,60	479%
125	0,732	7,21%	3,64	397%
131	0,781	3,03%	4,31	452%
139	0,872	0,59%	7,25	731%
147	0,982	4,47%	S.M.	--

Figura 8 – Resistências aparentes medidas com o GMS e com EM25k, e os erros relativos.

3.3 - Subestação Paratibe

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos em medições realizadas na SE Paratibe, com dimensão de, aproximadamente, 55 m x 25 m, localizada em Recife/PE. Tal como no caso anterior, essa SE não tem um cabo PR conectado a sua malha. Além disso, as medições também tiveram como principal objetivo avaliar a qualidade dos resultados produzidos pelos equipamentos GMS e EM25k em condições de campo e não determinar o valor da resistência de aterramento da SE. Na Figura 9, são apresentados os dados obtidos com o GMS, com o EM25k e os respectivos erros em comparação com o CPC100 da Omicron.



distância (m)	GMS (Ω)	erro (%)	EM25k (Ω)	erro (%)
40	0,542	3,50%	1,78	228%
60	0,596	1,22%	2,70	353%
80	0,614	0,81%	3,42	457%
100	0,622	2,20%	3,60	479%

Figura 9 – Resistências aparentes medidas com o GMS e com EM25k, e os erros relativos.

Mais uma vez, os resultados indicam um bom desempenho do GMS. Já em relação ao EM25k, isso não acontece, sendo o erro, para todas as distâncias de afastamento do eletrodo de tensão, bastante elevado. Considerando que os procedimentos de medição foram os mesmos para todos os equipamentos, reforça-se a possibilidade de o equipamento EM25k estar medindo o módulo da impedância do aterramento e não sua resistência. Com isso, os valores medidos poderiam levar a erros significativos no cálculo de faltas e ajuste de proteção.

3.4 - Subestação Limeira

A SE Limeira-06, com dimensão de, aproximadamente, 100 m x 60 m e localizada em Limeira/SP, possui um ramal de entrada de 138 kV com circuito duplo, cujos cabos PRs da linha de transmissão se conectam ao SPDA da SE (Figura 10(a)). O SPDA é conectado à malha de aterramento da SE através de 6 cabos que descem rente aos postes das SE (Figura 10(b)). A Figura 10(c), mostra o equipamento GMS.

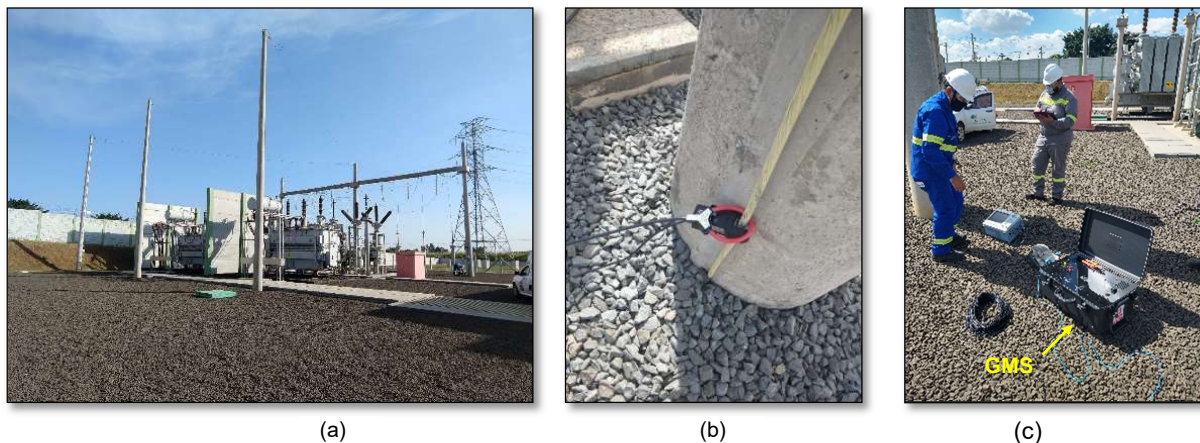


Figura 10 – Subestação Limeira: (a) ramal de entrada, mostrando as chegadas dos cabos PR; (b) uma descida do cabo PR e sondas de corrente; (c) equipamento GMS em campo realizando a injeção de corrente e as medições.

As medições nesta SE tiveram como objetivo avaliar as características gerais das correntes envolvidas durante uma medição. Neste primeiro caso, o circuito de corrente ficou alinhado com a LT (0°). Inicialmente, foram medidas as correntes já presentes nos cabos (60 Hz), chegando a 550 mA em uma das descidas (ver Figura 11). Na sequência, o GMS injetou uma corrente de 1,5 A na malha. Este procedimento foi repetido para frequências que variaram entre 40 Hz e 100 Hz. As correntes foram medidas com o oscilógrafo Yokogawa DL850 e sondas de corrente, em cada uma das descidas. Os resultados são apresentados na Figura 11, onde se verifica que o aumento da frequência levou a uma pequena redução no valor da corrente nas descidas D1 a D3. Nas demais, esse feito não foi verificado. Esse resultado sugere um aumento da reatância indutiva devido ao aumento da

frequência. Tal condição pode estar associada as características de posicionamento de cabos. Os resultados mostram, também, que a corrente total que sobe pelo PR é significativa ($\sim 22\%$, ou seja, $K_s \cong 0,22$). Uma segunda medição foi realizada, porém, com o circuito de corrente posicionado a 90° em relação ao eixo da LT. Neste caso, a corrente injetada pelo GMS foi de 300 mA. Os resultados obtidos, assim como as correntes de 60 Hz presentes nos cabos, são apresentados na Figura 12, onde se verifica as mesmas características do caso anterior. Por fim, cabe mencionar que a resistência de aterramento medida com o GMS foi, aproximadamente, igual a $0,7\ \Omega$. Este é um resultado que chama a atenção, pois está em concordância com as curvas apresentadas na Figura 5. Nessa figura, considerando que K_s é, aproximadamente, igual a 0,2, as curvas indicam que a resistência R_{gSE} é de $1\ \Omega$. Neste caso, resistência R_{PR} seria de $4\ \Omega/\text{km}$ e a resistência R_{gT} estaria na faixa entre $20\ \Omega$ e $30\ \Omega$, condições essas factíveis para a SE Limeira-06.

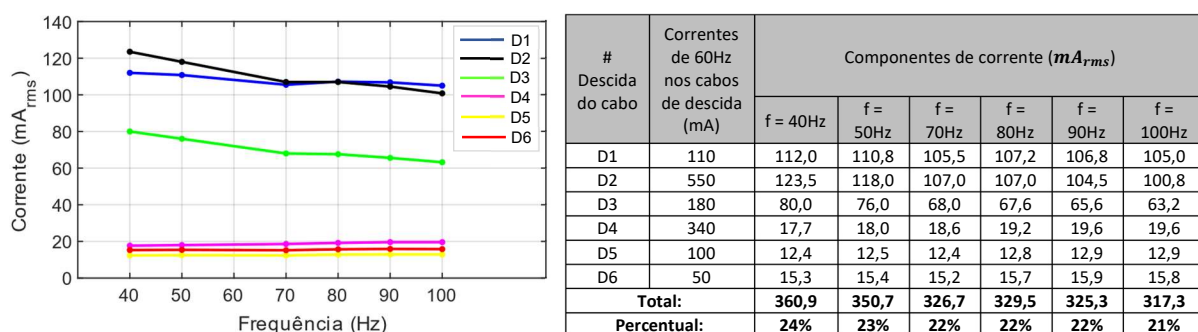


Figura 11 – Correntes em cada descida do cabo de guarda em função da frequência da corrente injetada para o Caso 1.

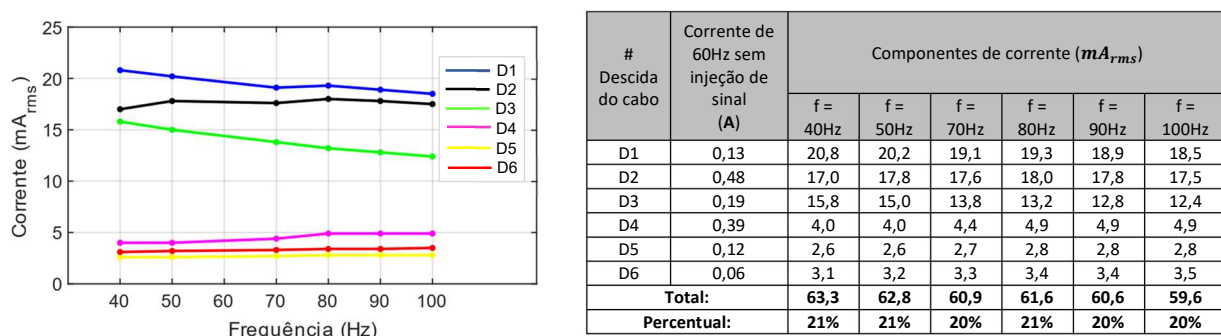


Figura 12 – Correntes em cada descida do cabo de guarda em função da frequência da corrente injetada para o Caso 2.

4.0 - CONCLUSÕES

A medição da resistência de aterramento em uma SE encerra considerável complexidade em razão da diversidade de fatores que necessitam ser considerados para a sua realização, sobretudo quando existem cabos PR conectados à malha. Ainda hoje, apesar dos avanços tecnológicos, determinar adequadamente essa resistência em condições de campo continua sendo um desafio de engenharia. Os Guias e Padrões que tratam desse tema, apresentam apenas orientações simples que podem levar, em certos casos, a resultados que se distanciam da realidade. É necessário, portanto, que estudos sistemáticos sobre o tema sejam ampliados. Nesse sentido, este Informativo Técnico buscou contribuir com o melhor entendimento relacionado às características gerais presentes nesse tipo de medição. As simulações mostram que a corrente que sobe pelo cabo PR depende (K_s), indissociavelmente, do aterramento da SE (R_{gSE}) e das características construtivas da LT (Z_s). Já as medições de campo evidenciaram aspectos importantes, como a existência de níveis significativos de correntes de 60 Hz nos cabos PR ($K_s \cong 0,22$). Além disso, os resultados apresentados sugerem que a corrente total que flui pelos cabos PR (I_s) deve ser determinada por meio de uma soma fasorial das correntes em cada descida, já que as mesmas possuem fases não-nulas. Foram apresentados, também, os dados de medições obtidos em SEs que não estão conectadas ao cabo PR. As medições foram realizadas com o GMS (100 Hz) e com um equipamento de alta frequência (25 kHz). O desempenho desses equipamentos foi comparado ao do CPC100 da Omicron (*benchmarking*). Os dados mostraram que o GMS e o CPC100 produziram resultados muito próximos em todos os casos. De modo contrário, os resultados obtidos em alta frequência foram significativamente maiores, variando entre 228% e 731%. Como o arranjo de medição foi o mesmo para ambos, é possível que o equipamento esteja medindo a impedância e não a resistência de aterramento da SE. Considerando que, por exemplo, os projetos de proteção se valem do valor da resistência, essa margem de erro é preocupante. Ressalta-se, contudo, que, ao

longo do Projeto que está sendo desenvolvido, tais aspectos serão ainda melhor avaliados e conclusões mais assertivas serão obtidas.

5.0 - REFERÊNCIAS

1. Institute of Electric and Electronic Engineers. IEEE Std 81-2012: **IEEE guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system**. New York, p. 86. 2012.
2. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento**. Rio de Janeiro, p. 55. 2009.
3. PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. Criteria for using 25 kHz grounding meters to measure grounding grids. **International Conference on Grounding and Lightning Physics and Effects**, Belo Horizonte, p. 89-92, Junho 2021.
4. PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. Effect of the integration path on grounding measurements. **Electric Power Systems Research**, v. 194, 2021. ISSN 0378-7796.
5. PAUL, C. R. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. 1a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
6. ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para Engenheiros**. 2a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.
7. DIS-ETE-013 - Postes de Concreto Armado para Linhas de Subtransmissão - REV 0. **Normas e Padrões**, 2019. Disponível em: <<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Informa%C3%A7%C3%B5es/normas-e-padroes.aspx>>. Acesso em: 27 ago 2021.
8. NORMA de Transmissão Unificada - NTU 004: Critérios Básicos para Elaboração de Projetos de Linhas Aéreas de Alta Tensão. **Energisa**, 2017. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Normas%20Tcnicas/NTU%20004%20Crit%C3%A9rio%20para%20Elabora%C3%A7%C3%A3o%20de%20LAAT%20e%20Padr%C3%A3o%20de%20Estruturas.pdf>>. Acesso em: 27 Fev. 2020.
9. DIS-ETE-005 - Cordoalhas para Rede de Distribuição e Linhas de Subtransmissão - REV 01. **Normas e Padrões**, 2019. Disponível em: <<https://servicos.neoenergiapernambuco.com.br/residencial-rural/Pages/Informa%C3%A7%C3%B5es/normas-e-padroes.aspx>>. Acesso em: 27 ago 2021.

DADOS BIOGRÁFICOS



Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Atualmente é estudante de mestrado em Engenharia Elétrica na UFPE na área de Processamento de Energia.

(2) ALEXANDER BARROS LIMA

Possui graduação em Engenharia Elétrica-Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2007), mestrado (2010) e doutorado (2015) pela Universidade Federal de Minas Gerais na área de Engenharia de Potência e na linha de pesquisa em Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia. Atualmente é professor Adjunto na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Aterramentos Elétricos (projetos, medição, modelagem, simulação e análise de desempenho frente a correntes de baixas e altas frequências), compatibilidade eletromagnética e transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.

(3) FABRÍCIO BRADASCHIA

Fabrizio Bradaschia é engenheiro eletricitista (2006), mestre (2008) e doutor (2012) em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), PE, Brasil. De 2008 até 2009, atuou como professor visitante na Universidade de Alcalá (UAH), Madrid, Espanha. Desde 2013, faz parte do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPE. É membro efetivo da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e membro sênior do IEEE. Atua como membro do comitê de normalização da ABNT (COBEI) na área de Aterramentos Elétricos. Suas áreas de interesse incluem conversores estáticos, aterramentos elétricos e sistemas FV.

(4) MARCIO EVARISTO DA CRUZ BRITO

Márcio Evaristo é engenheiro eletricitista, formado pela escola Politécnica de Pernambuco, atuou por 28 anos em uma empresa de distribuição de energia elétrica. Desde 2014 é professor adjunto na Universidade Federal de Pernambuco, lecionando nos cursos de engenharia de controle e automação e engenharia elétrica. Possui doutorado na área de eletrônica de potência, atualmente desenvolve pesquisas nas áreas de sistemas de potência, robótica, internet das coisas, indústria 4.0, armazenamento de energia, Automação de sistemas elétricos e mobilidade elétrica. Atua também em projetos P&D ANEEL, também coordena o projeto de extensão que desenvolve um carro elétrico de competição formula SAE.

(5) ZANONI DUEIRE LINS

Zanoni Dueire Lins é Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE (1984). Concluiu o Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFPE (1992) e o doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP (2001). É professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. É Avaliador do Sistema ARCU-SUR/INEP desde 2010 e do SINAES/INEP/MEC desde 2012. Atua nas seguintes áreas: Acionamentos Elétricos, Sistemas Fotovoltaicos, Interferência Eletromagnética, Proteção de Sistemas Elétricos, Isoladores Elétricos e Eficiência Energética de Sistemas e Equipamentos Elétricos.

(6) LEONARDO RODRIGUES LIMONGI

É engenheiro eletricitista, possui mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (2006) e doutorado pela Politécnico di Torino (2009). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência, atuando principalmente na área de qualidade de Energia.

(7) GUSTAVO MEDEIROS DE SOUZA AZEVEDO

Possui graduação (2005), mestrado (2007) e doutorado (2011) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco. Trabalhou como pesquisador visitante na Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha, de 2008 a 2009 como parte do programa de doutorado sanduíche. Desde janeiro de 2014, atua como Professor Adjunto A no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: microrredes, geração distribuída, energias renováveis, sistemas fotovoltaicos e qualidade de energia.

(8) ROGÉRIO DE LIMA E SÁ

Engenheiro Elétrico formado pela Universidade de Pernambuco (UPE - 2007).- Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE - 2020).Trabalha no segmento de distribuição de energia elétrica, com mais de 14 anos de experiência em manutenção de subestações e linhas de transmissões.- Atualmente é Supervisor da Manutenção da Subtransmissão - COELBA / Grupo Neoenergia (Maio/21 até o momento).- Atuou

como Engenheiro de Planejamento, Programação e Controle da Manutenção da Subtransmissão, chegando a ocupar o cargo de Engenheiro Sênior.