



Grupo de Estudo de Subestações e Equipamentos de Alta Tensão-GSE

OTIMIZAÇÃO DOS ESPAÇAMENTOS ENTRE OS CONDUTORES DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO OBJETIVANDO A MELHORIA DA SEGURANÇA DA SUBESTAÇÃO E A REDUÇÃO DE CUSTOS NO PROJETO

Geybson Diego Candido da Silva (*)
CHESF

Fabio Nepomuceno Fraga
CHESF

RESUMO

O presente trabalho apresentará uma análise do impacto provocado pela otimização da distribuição dos espaçamentos entre os condutores de uma malha de terra aplicada a projetos de sistemas de aterramento para subestações objetivando alcançar eficiência na equalização dos potenciais gerados sobre o solo, aumentando a confiabilidade relativa à segurança da instalação e a redução de custos no projeto executivo.

Para este estudo, aplicou-se uma metodologia baseada na determinação dos espaçamentos ótimos entre os condutores de uma malha com arranjo não uniforme. Utilizou-se o método da distribuição exponencial na determinação desses espaçamentos calculados para um solo estratificado em duas camadas.

PALAVRAS-CHAVE

Sistema de Aterramento de Subestações, Técnicas de Otimização de Malhas de Aterramento, Equalização dos Potenciais de Terra.

1.0 - INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico tem como objetivo principal efetuar uma adequada ligação dos componentes condutivos da instalação (massas, carcaças de equipamentos elétricos ou eletrônicos, estruturais metálicas, etc) à terra de modo que, na ocorrência de um eventual curto-circuito ou descarga atmosférica, possibilite que esse fluxo de carga indesejado seja drenado para a terra por meio de um caminho de baixa impedância, promovendo a proteção das pessoas e equipamentos.

Existem várias maneiras de se aterrar um sistema elétrico, que vão desde uma simples haste, passando por placas de formas e tamanhas diversos, chegando às mais complexas configurações de eletrodos enterrados no solo, entre eles a tão aplicada malha de terra em subestações de energia elétrica.

Uma das partes mais importantes de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) é a subestação na qual exerce papel crucial no processo de transmissão e distribuição da energia elétrica aos consumidores finais. Para que uma instalação desse porte opere satisfatoriamente com uma adequada continuidade do serviço, com um desempenho seguro do sistema de proteção, além de garantir os limites dos níveis de segurança pessoal, é fundamental que o quesito Aterramento Elétrico mereça uma análise avançada e cuidadosa. Essa precaução deve ser traduzida na elaboração de projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam consideradas todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido.

O dimensionamento do projeto de um sistema de aterramento de subestação é um processo extremamente complexo que depende de vários fatores variantes, como níveis de corrente de curto-circuito, tipo do solo e os fatores que influenciam na sua resistividade, tais como teor de umidade, temperatura, composição química, concentração de sais, idade de formação geológica, estratificação, entre outros.

Deve-se levar em consideração todos esses aspectos citados para a concepção do projeto da malha de terra da subestação, para que o mesmo atenda a dois requisitos principais: apresentar reduzido valor de resistência de aterramento assegurando que os valores de tensão de toque sejam satisfatórios e garantir que os potenciais de terra gerados estejam continuamente equalizados a fim de satisfazer os requisitos de tensão de passo, propiciando a segurança daqueles que transitam e operam dentro e fora da subestação.

2.0 - MALHA DE ATERRAMENTO

Malhas de aterramento, ou malhas de terra, são constituídas basicamente por uma rede de eletrodos horizontais e verticais interligados, formados geralmente por cabos de cobre nu e hastes de aço revestidas com cobre, enterrados no solo a uma profundidade sob a área do sistema elétrico a ser protegido. Esse tipo de eletrodo é normalmente aplicado em instalações que exigem grandes sistemas de aterramento com potencial de dispersão de elevados valores de corrente elétrica, principalmente quando possuem considerável quantidade de equipamentos a serem protegidos, como, por exemplo, as subestações integrantes de sistemas de transmissão ou subtransmissão de energia cuja inoperância pode comprometer o fornecimento de energia elétrica para milhares de consumidores. Pode-se dizer que dimensionar uma malha de terra é verificar se os potenciais que surgem na superfície de um sistema elétrico, quando da ocorrência da máxima falta à terra, são inferiores aos máximos potenciais de passo e toque que uma pessoa possa suportar sem sofrer fibrilação ventricular. Além disso, deve-se dimensionar o condutor da malha de forma a suportar os esforços mecânicos e térmicos a que estarão sujeitos ao longo da vida útil da instalação (2).

A etapa inicial do dimensionamento de uma malha de aterramento consiste na seleção de uma geometria básica que deve considerar a delimitação da área da subestação a ser abrangida pela malha, incluindo, no mínimo, todo o pátio. O critério de definição da geometria inicial da malha deve levar em consideração a distribuição dos equipamentos e edificações existentes no interior da área em questão, bem como o modelo do solo previamente determinado

2.1 Roteiro para o Dimensionamento da Malha de Terra

Para a elaboração do projeto da malha de terra de uma subestação são necessários realizar alguns procedimentos pré-definidos bem como informações do local onde a mesma será construída, além de premissas e parâmetros que deverão ser adotados, conforme diretrizes da norma IEEE Std 80 (3), tais como: resistividade e espessura do material de recobrimento do pátio da subestação; tempo de duração da corrente falta ou tempo de atuação do sistema de proteção; profundidade de enterramento da malha, peso de massa corporal mínimo a ser considerado para o cálculo dos potenciais máximos suportáveis, entre outros.

Após definido todas essas premissas necessárias para a elaboração do projeto da malha de terra, deve-se realizar as seguintes etapas do roteiro de dimensionamento do sistema de aterramento da subestação:

- a) Medição da resistividade do solo. Neste trabalho adotou-se o Método de Wenner de acordo com (4);
- b) Determinação da estratificação do solo (para este trabalho adotou-se o método de estratificação em duas camadas);
- c) Determinação da resistividade aparente do solo;
- d) Cálculo das tensões máximas suportáveis pelo corpo humano ($V_{\text{toque-suportável}}$ e $V_{\text{passo-suportável}}$);
- e) Dimensionamento do condutor da malha e dos cabos de aterramento (rabichos) dos equipamentos e estruturais metálicas;
- f) Determinação de uma configuração geométrica para a disposição dos cabos que constituem a malha, abrangendo todo o pátio da subestação;
- g) Determinação da resistência da malha e da corrente líquida que flui por ela na ocorrência de uma falta fase-terra;
- h) Cálculo dos gradientes de potencial gerado sobre a malha ($V_{\text{toque-malha}}$ e $V_{\text{passo-malha}}$) no solo, em virtude da circulação de correntes de defeito nos seus condutores;

Após cumprido todas essas etapas, faz-se uma análise comparativa entre os potenciais gerados na malha e as máximas tensões suportáveis. Caso seja constatado que a concepção preliminar do projeto da malha acusou a existência de potenciais perigosos na subestação, devem ser estudadas e aplicadas medidas para eliminar todas as deficiências detectadas no projeto inicial. Uma dessas medidas é a aplicação de hastes de aterramento, principalmente ao longo do seu perímetro, visto que é nas extremidades da malha que são gerados os maiores potenciais de passo e toque. Além dessa estratégia para melhoria da malha, existem outras técnicas de otimização que permitem obter avanços significativos no seu desempenho, elencadas a seguir:

- a) Diminuir a resistência total da malha: uma diminuição na resistência total da malha diminuirá seu GPR e, portanto, a tensão máxima transferida. A maneira mais eficaz de diminuir a resistência da malha de terra é aumentando a área ocupada pela mesma. Também podem ser utilizadas hastes para esse propósito, caso a área disponível seja limitada e impossibilite o aumento dimensional da malha.
- b) Diminuir o espaçamento entre os condutores da malha: utilizando um arranjo com distâncias de espaçamento menores entre os condutores da malha a condição ideal de placa contínua pode ser alcançada. Potenciais perigosos dentro da subestação podem assim ser eliminados a um custo, pois essa alternativa exige a adição de mais cabos condutores para formar uma rede mais condensada impactando no orçamento do projeto.
- c) Desviar parte da corrente de falta por caminhos alternativos: ao conectar cabos de aterramento de linhas de transmissão ou diminuir as resistências de pé de torre na vizinhança da subestação, parte da corrente de falta será desviada da malha para os cabos para-raios das linhas, fazendo com que seu sistema de blindagem atmosférica funcione como um aterramento auxiliar conectado em paralelo com a malha de terra da subestação. No entanto, deve-se levar em conta o efeito sobre os gradientes de potencial próximo das bases da torre.
- d) Variar os espaçamentos entre os condutores em pontos específicos: aumentar a concentração de condutores na periferia da malha pode atenuar os elevados gradientes de potencial que surgem nas suas extremidades. Este agrupamento de cabos pode ser reduzido em direção ao centro da malha, não necessitando que todo seu reticulado apresente os mesmos espaçamentos. Essa alternativa traz grandes vantagens econômicas, pois, com a mesma quantidade de condutores, pode-se otimizar uma malha apenas ajustando a distribuição dos seus espaçamentos, sem acarretar custos adicionais ao projeto. Na próxima seção será apresentado uma

técnica de otimização de malhas de terra com ênfase na distribuição dos seus espaçamentos, ou seja, será abordado uma metodologia de projeto de malhas com espaçamentos não uniforme.

3.0 - IMPACTO DA OTIMIZAÇÃO DOS ESPAÇAMENTOS ENTRE CONDUTORES DE UMA MALHA DE TERRA

Geralmente, quando se projeta uma malha de aterramento é natural a opção por uma configuração de condutores espaçados de maneira uniforme, ou seja, um arranjo no qual a distância entre os condutores é basicamente a mesma. No entanto, o princípio de uma malha de terra com espaçamentos não uniformes (desigual) propõe o efeito da blindagem dos condutores externos sob os condutores do centro da malha. Para isso, seus condutores devem ser escassos no seu centro e mais concentrados nas extremidades, a fim de fazer pleno uso de todos os condutores (1). Um exemplo de malha com espaçamento desigual é apresentado na Figura 1 onde se verifica uma consistência maior de condutores próximo da periferia e escassez de condutores no seu centro.

De acordo com (1), ao projetarmos malha de aterramento com arranjo dos seus condutores distribuídos de maneira não uniforme obtém-se as seguintes vantagens:

- Melhor distribuição da densidade de corrente entre os condutores, no qual a diferença entre os valores de corrente que fluem pelos condutores periféricos e centrais não é tão acentuada como ocorre em malhas desenhadas com espaçamento uniforme; isto é, a diferença de corrente de um condutor para o outro é significativamente reduzida, possibilitando a ideia de potencial constante em toda a malha.
- Redução e equalização dos potenciais de toque e passo em todo seu reticulado, se comparado com uma malha de arranjo uniforme considerando a mesma quantidade de condutores em ambas as configurações, em virtude da eficiente equalização dos potenciais gerados na malha com arranjo desigual.
- Considerando o mesmo limite de segurança para o projeto da malha, um arranjo de espaçamento não uniforme pode proporcionar uma diminuição da quantidade de cabos que compõem a rede, tornando o projeto do sistema de aterramento da subestação mais econômico.

3.1 Distribuição Exponencial dos Espaçamentos

Diversos trabalhos já publicados propõem técnicas para a determinação dos espaçamentos entre os condutores da malha de terra em projetos de sistemas de aterramento de subestações com o objetivo de equalizar os potenciais de terra do sistema. Neste trabalho, utilizaremos uma metodologia que possibilita o cálculo dos espaçamentos ótimos entre os condutores, denominada de método da Distribuição Exponencial para o dimensionamento de malha aplicada à subestação com solo estratificado em duas camadas.

Esta técnica de distribuição exponencial dos espaçamentos é fundamentada na concepção do projeto ideal, cujo princípio consiste em posicionar adequadamente todos os condutores da malha de terra proporcionando uma melhor distribuição da corrente de fuga entre eles e, conseqüentemente, equalizando os gradientes de potencial na superfície do solo da subestação.

No arranjo da malha com regularidade exponencial os espaçamentos entre os condutores diminuem gradualmente do centro para as extremidades, conforme se verifica no exemplo de malha com geometria quadrada (100x100 m²) apresentada na Figura 2.

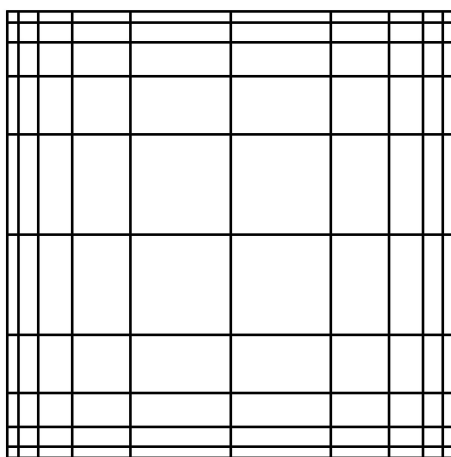


FIGURA 1 – Malha com arranjo de espaçamento não uniforme

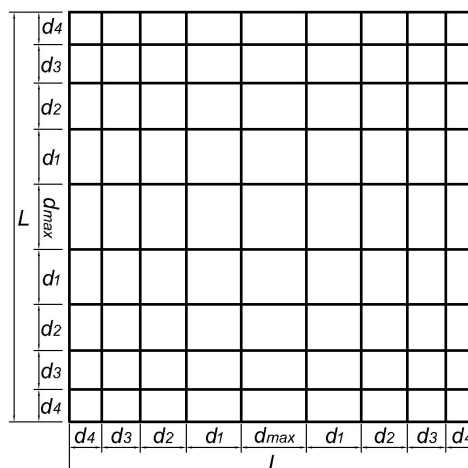


FIGURA 2 – Arranjo de Malha com Distribuição Exponencial dos Espaçamentos

3.1.1 Cálculo dos Espaçamentos Distribuídos Exponencialmente

A metodologia utilizada na determinação dos espaçamentos da malha projetada com distribuição exponencial (Figura 2) consiste no cálculo da distância máxima (d_{max}) entre os condutores dos reticulados centrais; em seguida, calcula-se os espaçamentos dos reticulados adjacentes (d_1 , d_2 , d_3 e d_4 ,...) ao longo do comprimento e da largura da malha. Todos esses espaçamentos são determinados em função da relação de compressão (C) para um solo estratificado em duas camadas. Este fator (C) fornece a relação entre espaçamentos de condutores consecutivos. A partir do condutor central da malha, as distâncias entre os condutores até a periferia estão na razão da relação de compressão determinada. As expressões para o cálculo dos espaçamentos são as seguintes:

$$d_n = d_{max} \cdot C^n \quad (1)$$

$$d_{max} = \frac{L(1-C)}{1+C-2C^{N/2}}, \text{ quando } N \text{ for par} \quad (2)$$

$$d_{max} = \frac{L(1-C)}{2(1-C^{(N-1)/2})}, \text{ quando } N \text{ for ímpar} \quad (3)$$

Em que,

- d_n - é o espaçamento da n ésima quadricula contada a partir do reticulado central [m];
- n - é o n ésimo espaçamento entre os condutores a partir do reticulado central;
- d_{max} - é o espaçamento máximo entre os condutores dos reticulados centrais [m];
- L - é o comprimento do condutor em relação ao eixo X (L_x) ou Y (L_y) [m];
- N - é o número de condutores distribuídos ao longo dos eixos X (N_x) ou Y (N_y);
- C - é a relação de compressão dos espaçamentos da malha, onde $0 \leq C \leq 1$. Quando $C = 1$, a malha é disposta com espaçamentos iguais (uniforme). À medida que C vai diminuindo, aproximando-se de zero, há um aumento da concentração de condutores na periferia da malha e conseqüente diminuição no seu centro.

De acordo com as equações acima, em posse dos valores das dimensões e do número de condutores da malha a ser projetada, seu arranjo exponencialmente distribuído pode ser concebido se a relação de compressão (C) for determinada.

Quando a área da malha de aterramento e a estrutura do solo são fixas, há uma Relação Ótima de Compressão (ROC) que possibilita a obtenção de um arranjo de condutores cujo potencial de terra e distribuições de tensão de passo são mais uniformes. As expressões empíricas para calcular a ROC para um solo modelado em duas camadas (ρ_1 , ρ_2 e h) foram obtidas pelo ajuste de mínimos quadrados a partir de muitos resultados de análises (1). A relação entre a ROC , a profundidade da primeira camada do solo (h) e o coeficiente de reflexão (K) é ajustada a partir dos resultados calculados, de acordo com o comprimento lateral (L) da malha sob análise, em que a ROC pode ser calculada pelas expressões a seguir:

$$ROC = a_0 + a_1 \cdot e^{(0,0001 \cdot h)} + a_2 \cdot e^{(b \cdot h)} \quad (4)$$

Em que:

$$b = -0,3503 - 9,6311 \cdot e^{(-0,03666 \cdot L)}$$

$$\begin{cases} a_0 = a_{01} + a_{02} \cdot K + a_{03} \cdot K^2 \\ a_1 = a_{11} + a_{12} \cdot K + a_{13} \cdot K^2, \text{ onde } K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \\ a_2 = a_{21} + a_{22} \cdot K \end{cases}$$

Os coeficientes das expressões acima ($a_{01}, a_{02}, a_{03}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{21}$ e a_{22}) são obtidos em função dos comprimentos laterais (L) da malha. Seus valores estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - Coeficientes de Ajustes Para o Cálculo da ROC

Coeficientes	$L \leq 100m$	$100m < L \leq 175m$	$175m < L \leq 250m$	$L > 250m$
a_{01}	0,44	0,38	-0,51	0,32
a_{02}	-77,43	-50,65	-33,18	-15,44
a_{03}	15,63	13,88	18,49	13,42
a_{11}	0,033	0,19	1,15	0,38
a_{12}	76,9	50,21	32,82	15,16
a_{13}	-15,56	-13,83	-18,44	-13,38
a_{21}	-0,067	-0,037	-0,029	-0,022
a_{22}	0,50	0,41	0,34	0,26

Uma malha de aterramento projetada com uma ROC apresenta a melhor segurança, tanto para as pessoas como para os equipamentos da subestação. A alteração da relação de compressão pode mudar o valor da resistência de aterramento da malha, porém, é comprovado que a influência da relação de compressão na resistência da malha é muito pequena. A análise mostra que a tensão de toque é a função alvo para a determinação da ROC , ou seja, a relação de compressão onde a tensão de toque da malha atinge seu valor mínimo é quando a mesma é dimensionada através da sua ROC .

3.1.2 Dimensionamento de Malha de Terra Através da Distribuição Exponencial dos Espaçamentos

Nesta seção apresentaremos uma aplicação da técnica da distribuição exponencial em um exemplo de projeto de malha de terra (fictício), com o objetivo de comprovar a eficácia desse método a partir dos resultados alcançados ao final do estudo. Para a análise do desempenho da malha desenvolvida com essa metodologia, utilizou-se um software (AutoGrid Pro) com a capacidade de realizar simulações e análises avançadas em projetos de sistemas de aterramento de subestações.

A metodologia de projeto a ser desenvolvida nesta seção, consiste das seguintes etapas:

- Etapa 1: A partir de uma malha de referência com espaçamento uniforme, cujos potenciais ($V_{toque-malha}$ e $V_{passo-malha}$) atendam aos limites de segurança estabelecidos ($V_{toque-suportável}$ e $V_{passo-suportável}$), desenha-se uma malha com espaçamento não uniforme, obtida por meio da distribuição exponencial, com a mesma quantidade de condutores da malha de referência;

- Etapa 2: Realiza-se a simulação computacional da malha no software de análise, onde, através do qual, obtém-se o gráfico da distribuição dos potenciais gerados sobre o solo da subestação, ou seja, os valores dos mínimos e máximos potenciais de toque e passo, além de compará-los com os valores de tensões máximas suportáveis ($V_{toque-suportável}$ e $V_{passo-suportável}$) estabelecidos pelos limites de segurança do projeto;
- Etapa 3: Esta etapa consiste da extração de um condutor ao longo de um dos lados (L_x ou L_y) da malha desenhada na etapa anterior. Para o lado escolhido, determina-se os novos espaçamentos distribuídos exponencialmente considerando um condutor a menos. Definido o novo arranjo, realiza-se nova simulação verificando se seu desempenho atende aos limites de segurança;
- Etapa 4: Caso o desempenho da malha, desenhada com um condutor a menos, seja satisfatório, repete-se a etapa anterior, entretanto, retirando-se, desta vez, um condutor ao longo do lado inalterado. Desenha-se a nova malha viabilizando sua simulação no software;
- Etapa 5: Caso o novo arranjo mais compacto continue apresentando resultados satisfatórios nos requisitos de segurança, repete-se as etapas 3 e 4 até obter um arranjo de malha, com espaçamentos não uniformes, mais econômico possível e sem infringir os limites de segurança para as tensões de passo e toque.

A malha de referência com espaçamento uniforme, de área igual a $120 \times 80 \text{ m}^2$, é apresentada na Figura 3. Os dados do projeto também são indicados nesta figura. Para este estudo foi considerado um solo com os valores de resistividades medidos mostrados na Tabela 2 (5), onde “a” são os espaçamentos entre os eletrodos de medição, conforme requisitos do Método de Wenner para medição da resistividade. O solo foi estratificado em duas camadas atendendo aos requisitos da técnica em estudo.

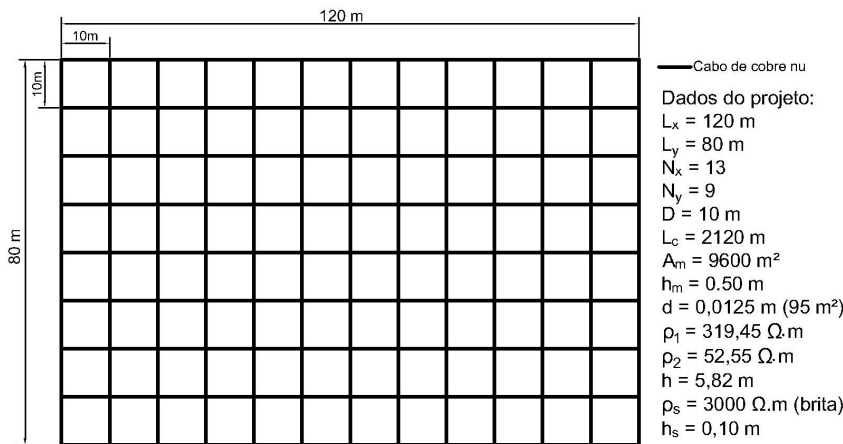


TABELA 2 – Valores de Resistividades do Solo

a (m)	ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
2	286
4	258
8	231
16	193
32	122
64	66
128	52

FIGURA 3 - Malha de Referência Com Espaçamento Uniforme

Para a realização das simulações, considerou-se uma corrente de malha igual a 2500 A, valor razoável para malhas de aterramento de subestações, no qual a corrente de falta fase-terra se divide entre a malha e os cabos para-raios das linhas de transmissão que se conectam à subestação. Para a determinação das máximas tensões de toque e passo suportáveis será respeitado o limite de corrente de choque para indivíduos de 50 kg de massa corporal com um tempo de duração de 0,5 s.

Após entrada dos dados de projeto no software de simulação, são gerados gráficos das distribuições dos potenciais de toque e passo sobre a malha, além de calcular os potenciais máximos suportáveis e indicar os pontos onde eles foram respeitados ou não. Para o cálculo dessas tensões, o software adota as diretrizes estabelecidas na norma IEEE. Std 80 (3), cujos valores calculados foram: $V_{toque-suportável} = 683,30 \text{ V}$ e $V_{passo-suportável} = 2.265,30 \text{ V}$.

Os resultados da simulação da malha de referência são apresentados nas Figuras 4 e 5, nas quais se verifica que as tensões máximas de malha foram aproximadamente: $V_{toque-malha} = 527,70 \text{ V}$ e $V_{passo-malha} = 110,55 \text{ V}$. Logo, os limites de segurança do projeto foram inicialmente atendidos.

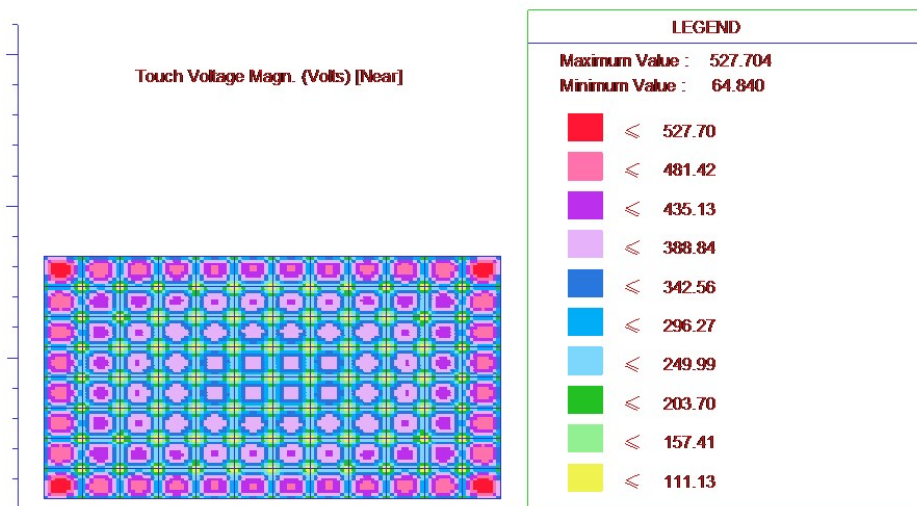


FIGURA 4 - Malha de Referência Uniforme: Distribuição dos Potenciais de Toque

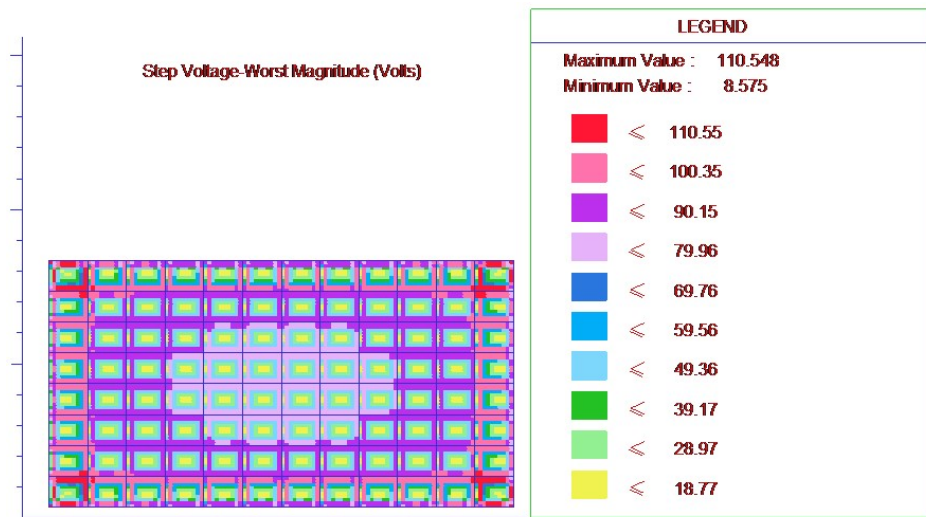


FIGURA 5 - Malha de Referência Uniforme: Distribuição dos Potenciais de Passo

Dando continuidade à primeira etapa, desenhou-se uma malha com espaçamentos distribuídos exponencialmente com a mesma quantidade de condutores da malha de referência. Para isso, empregou-se todas as equações descritas anteriormente, juntamente com os dados que constam na Tabela 1. A Figura 6 apresenta a malha de terra desenhada através desta técnica, além das ROC calculadas ao longo do comprimento (eixo X) e da largura (eixo Y) da malha.

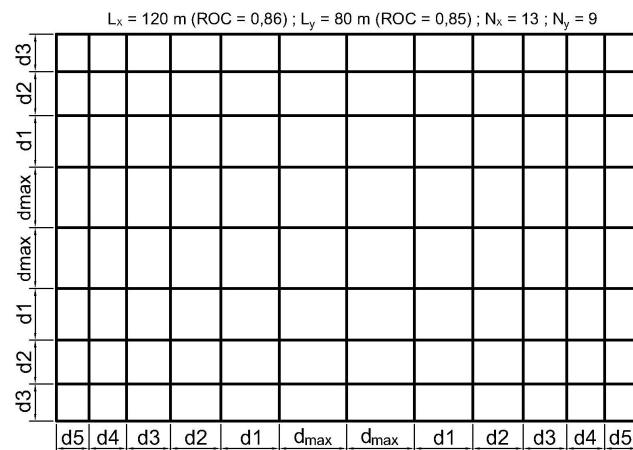


FIGURA 6 – Malha de Referência Com Arranjo Não Uniforme

As distribuições dos potenciais da malha da Figura 6 estão ilustrados nas Figuras 7 e 8. Comparando esses gráficos com os das Figuras 5 e 6, verifica-se uma melhor distribuição dos potenciais por toda a malha, cujos reticulados exibem praticamente o mesmo potencial, consequência de uma melhor distribuição da densidade de corrente em cada condutor. Nota-se também uma diminuição da máxima tensão de toque e dos gradientes de potencial ao longo do perímetro da malha.

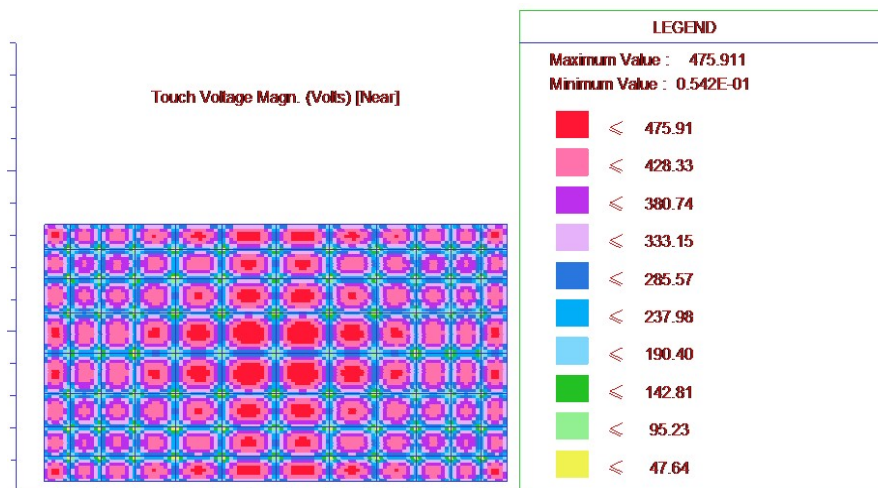


FIGURA 7 - Malha de Referência Não Uniforme: Distribuição dos Potenciais de Toque

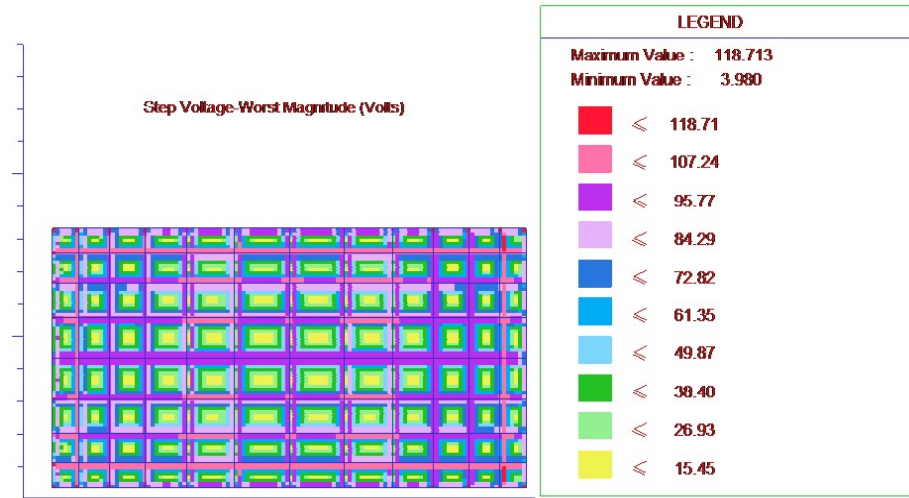


FIGURA 8 - Malha de Referência Não Uniforme: Distribuição dos Potenciais de Passo

Conforme procedimento adotado neste estudo, realizou-se várias vezes todo esse processo de desenho da malha e sua posterior simulação, contemplando em cada caso a extração de um condutor (N_x) ao longo do lado L_x e depois ao longo do lado L_y (N_y) até a obtenção de um arranjo de malha com a menor quantidade de condutores e cujos potenciais sejam inferiores aos máximos suportáveis ($V_{\text{toque-suportável}} = 683,30 \text{ V}$ e $V_{\text{passo-suportável}} = 2265,30 \text{ V}$). A critério de comparação, para cada malha esboçada com espaçamento desigual, desenhou-se uma equivalente com espaçamento uniforme. Os resultados de todas as simulações estão apresentados na Tabela 3, onde L_c é o comprimento total de condutores e R_m é a resistência da malha de terra.

TABELA 3 - Resultados das Simulações

Tipo de Espaçamento	N_x (120 m)	N_y (80 m)	L_c [m]	$V_{\text{toque-malha}}$ [V]	$V_{\text{passo-malha}}$ [V]	R_m [Ω]
UNIFORME (REF.)	13	9	2120	527,70	110,55	0,49986
EXPONENCIAL	13	9	2120	475,91	118,71	0,50119
UNIFORME	12	9	2040	548,28	116,67	0,50565
EXPONENCIAL	12	9	2040	495,18	123,46	0,50593
UNIFORME	13	8	2000	558,43	127,46	0,50873
EXPONENCIAL	13	8	2000	512,83	123,12	0,50947
UNIFORME	12	8	1920	582,00	131,35	0,51546
EXPONENCIAL	12	8	1920	534,63	129,00	0,51716
UNIFORME	11	8	1840	606,41	136,00	0,52282
EXPONENCIAL	11	8	1840	556,30	126,60	0,52395
UNIFORME	11	7	1720	650,27	135,55	0,53534
EXPONENCIAL	11	7	1720	581,69	130,90	0,53332
UNIFORME	10	7	1640	683,44	142,17	0,54496
EXPONENCIAL	10	7	1640	623,34	136,51	0,54413
UNIFORME	11	6	1600	696,20	153,26	0,54985
EXPONENCIAL	11	6	1600	666,51	144,38	0,54865
UNIFORME	10	6	1520	736,82	174,78	0,56142
EXPONENCIAL	10	6	1520	680,76	145,43	0,56155
UNIFORME	11	5	1480	767,39	269,75	0,57559
EXPONENCIAL	11	5	1480	726,04	154,64	0,57020

Analisando os valores da Tabela 3, pode-se inferir que:

- Todas as malhas com espaçamento uniforme, a partir do arranjo com $L_c = 1640 \text{ m}$ ($N_x = 10$ e $N_y = 7$), apresentaram valores de potencial de toque (células vermelhas da tabela) superiores ao máximo suportável;
- Todas as malhas concebidas com a técnica da distribuição exponencial exibiram potenciais de toque inferiores aos apresentados pelas malhas de arranjo uniforme desenhadas com a mesma quantidade de condutores (L_c). Essa redução variou entre 5 e 11%. A Figura 9 ilustra graficamente a diferença da tensão de toque para os dois tipos de arranjo analisado;
- A partir do arranjo com $L_c = 1480 \text{ m}$ a malha com distribuição exponencial não atendeu aos limites de segurança de tensão de toque (célula amarela da tabela);
- Os valores de tensão de passo, predominantemente, apresentaram pequenas variações entre os dois tipos de arranjos para cada L_c , com um aumento acentuado para a malha uniforme esboçada com $L_c = 1480 \text{ m}$. Todavia, o potencial de passo para o arranjo exponencial, em média, manteve-se abaixo dos valores gerados para a malha de arranjo uniforme, conforme mostra o gráfico da Figura 10.
- Os valores de resistência de aterramento da malha (R_m) praticamente não variaram se compararmos os dois tipos de arranjos, desenhados com a mesma quantidade de condutores (L_c), conforme apresentado no gráfico da Figura 11. Este comportamento era esperado, visto que a R_m é mais influenciada pela área total da malha que, nestes exemplos, não foi alterada;

- A configuração de malha mais econômica, ou seja, aquela desenhada com a menor quantidade de condutores e cujos potenciais atenderam aos limites de segurança foi a de arranjo exponencial com $L_C = 1520$ m (células verdes da tabela). O resultado de sua simulação está apresentada na Figura 12.

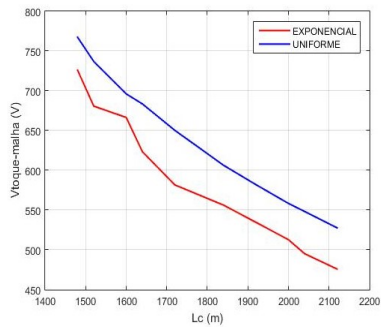
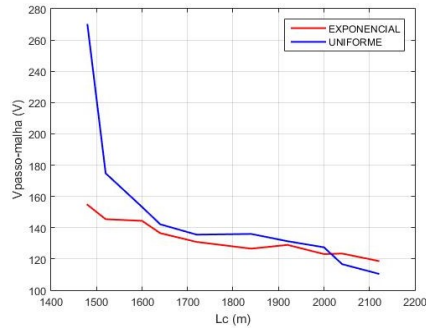
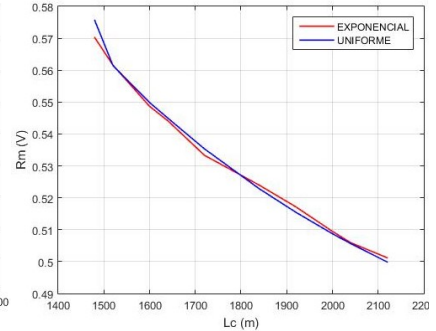
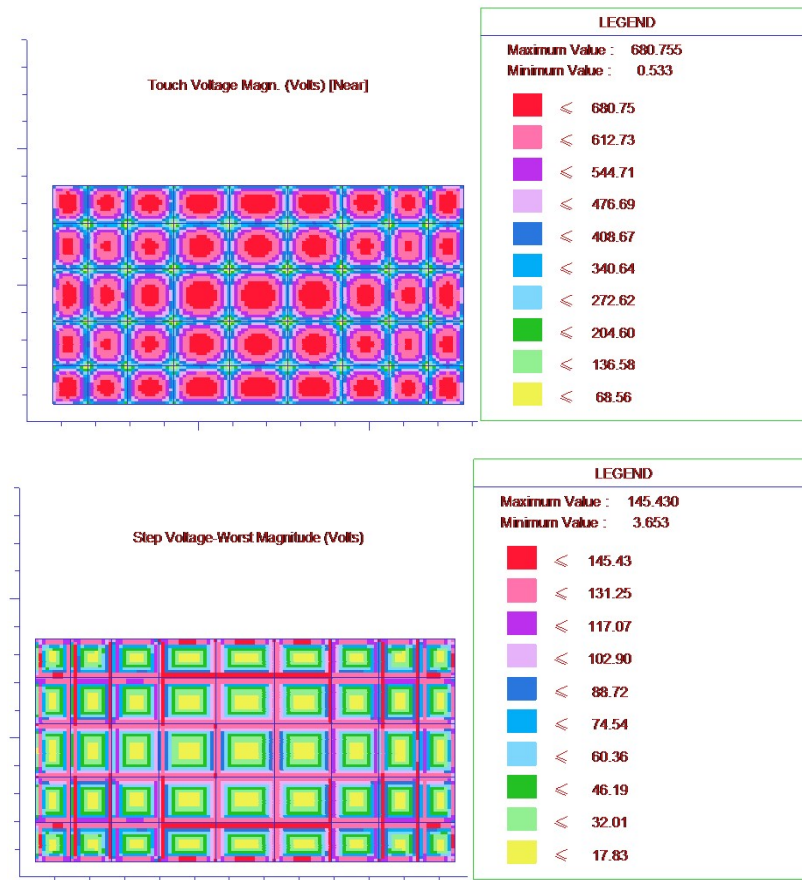
FIGURA 9 - Gráfico: $V_{toque-malha} \times L_C$ FIGURA 10 - Gráfico: $V_{passo-malha} \times L_C$ FIGURA 11 - Gráfico: $R_m \times L_C$ 

FIGURA 12 - Distribuição dos Potenciais de Toque e Passo do Arranjo de Malha Mais Econômico

Fazendo uma análise da economia de condutores, pode-se chegar a dois valores: um referente a quantidade de condutores considerados na malha de referência ($L_C = 2120$ m) e outro levando em consideração a quantidade de condutores da malha uniforme mais econômica, cuja configuração mostrou-se segura aos requisitos de potencial de passo e toque. Esta configuração está apresentada em cor azul na Tabela 3, na qual $L_C = 1720$ m. Segue abaixo os comprimentos de cabos e os percentuais de redução nas duas situações:

- Em relação a malha de referência com arranjo uniforme:
 - ✓ Redução de cabos condutores = $2120 \text{ m} - 1520 \text{ m} = 600 \text{ m}$
 - ✓ Percentual reduzido: **28,30%**
- Em relação a malha uniforme mais econômica:
 - ✓ Redução de cabos condutores = $1720 \text{ m} - 1520 \text{ m} = 200 \text{ m}$
 - ✓ Percentual reduzido: **11,63%**

4.0 - CONCLUSÃO

Diante das análises feitas com os resultados das simulações, constatou-se que a técnica da distribuição exponencial apresentou desempenho satisfatório no quesito da segurança da instalação, na qual foi comprovado que todas as configurações de malha esboçadas por esse método geraram potências de toque inferiores aos valores apresentados por malhas com arranjo uniforme (Figura 9) desenhadas com a mesma quantidade de condutores (L_c), além de uma melhor distribuição dos gradientes de potenciais em todos os reticulados, consequência de uma distribuição mais uniforme da densidade de corrente entre os condutores da malha otimizada.

Do ponto de vista econômico o método de otimização se mostrou lucrativo, onde foi comprovado ser possível economizar até 11,63% de cabos condutores se comparado a um projeto de malha com espaçamento uniforme, para um mesmo limite de segurança. A redução de cabos dos reticulados da malha provocará uma redução da quantidade de soldas exotérmica requeridas. Por conseguinte, necessitará de menos moldes de grafite e cartuchos de solda (pó exotérmico) para a construção da malha. Isso tudo refletirá na redução do custo com Homem-hora (Hh) e na diminuição do tempo de execução da malha de aterramento.

Portanto, os estudos realizados acerca do método de dimensionamento de malhas de terra com espaçamento não uniforme, fundamentados na teoria de espaçamentos distribuídos de forma exponencial, apresentaram resultados satisfatórios, em que foram comprovados, através de um projeto fictício, as vantagens promovidas por esta técnica. Trata-se de uma alternativa interessante para ser aplicada em projetos de sistema de aterramento de subestações, na qual o projetista desenvolverá projetos mais seguros atrelados às suas vantagens econômicas.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SUN, W.; HE, J.; GAO, Y.; ZENG, R.; WU, W; SU, Q. Optimal Design Analysis of Grounding Grids for Substations Built in Nonuniform Soil. Australia: IEEE. 4-7 August 2000. p. 1455-1460.
- (2) CAMPAGNOLO, J. M.; KINDERMANN, G. Aterramento Elétrico. 5ª. ed. Florianópolis: LabPlan, 2002.
- (3) IEEE. Std 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding. New York: IEEE, 2013.
- (4) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7117: Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- (5) LEON, J. A. M. Sistemas de Aterramento. 4ª. ed. São Paulo: Erico do Brasil, 1982.
- (6) SILVA, D. C.; FRAGA, F. N. Projeto de Sistemas de Aterramento de Subestações: Impacto da Otimização dos Espaçamentos Entre os Condutores da Malha de Terra. Recife, 2017.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Geybson Diego Cândido da Silva

Nascido em Recife-PE no ano de 1988. Formado em Engenharia Elétrica, pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (UPE) em 2017; Técnico em Eletrotécnica, pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco (CEFET-PE) em 2009. Em 2013 ingressou na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) onde atuou inicialmente na extinta Divisão de Montagem e Construção de Subestações (atual Departamento de Construção de Subestações) na função de fiscal de obras, até o ano de 2015. Em 2016 iniciou suas atividades no Departamento de Engenharia de Subestações (DETS) da mesma companhia, atuando nos processos de análise e desenvolvimento de projetos eletromecânicos de subestações do sistema de transmissão de energia da Chesf.

Fabio Nepomuceno Fraga



Nascido em Recife-PE no ano de 1975. Formado em Engenharia Elétrica, pela UFPE em 1998, Mestre em Engenharia Elétrica, pela UFPE em 2008. Trabalhou no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) onde atuou na área de normatização da operação e qualidade. Em 2002 ingressou na Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf) onde atua na assessoria da Superintendência de Engenharia de Transmissão. Em 2003 passou a coordenar o subcomitê CE-B3.01 (Novas Concepções) do comitê de estudo CE-B3 do Cigré-Brasil. Entre 2012 e 2018 coordenou o Comitê de Estudos de Subestações B3 do Cigré Brasil. É membro do SAG (Strategic Advisory Group) do SC B3 desde 2015. Entre suas áreas de interesse estão sistemas de aterramento, compatibilidade eletromagnética, projetos e novas concepções de subestação e suas tecnologias.