

Avaliação de Segurança de Pessoas em Redes Rurais que Utilizam o Solo como Meio Condutor

G. Cardoso, Jr.* D.B. Ramos* M.S. Martins*
P.H.B. Sebastiany* R. Stefanello*

**Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Santa Maria, Brasil (e-mail: ghendy@ufsm.br, diego.ramos@ufsm.br, miguel.spa.martins@gmail.com,
ph.sebastiany@gmail.com, roberta_stef@hotmail.com)*

Abstract: Electrical grounding is essential for an electric power distribution system, even more so in networks with the ground return. Amid the expansion of rural power systems, the cost of a three-phase network can make the project impossible, restricting the consumer to a SWER system. Recent studies have proposed the construction of a three-phase network from a SWER system. In this case, the earth is used with a phase conductor. This would make the installation of three-phase networks in rural areas financially viable. However, security issues still need to be evaluated for this type of structure. This work aims to study the security characteristics to implement such a network. The equations and safety assessments were performed in a virtual environment, but the soil stratification was based on results measured in a test terrain that proved to be safe in its operation even with several rods.

Resumo: O aterramento elétrico é indispensável a um sistema de distribuição de energia elétrica, ainda mais em redes com retorno por terra. Em meio a expansão das redes rurais, o custo de uma rede trifásica pode impossibilitar a viabilidade do projeto, restringindo o consumidor a uma rede de MRT ou MRN. Estudos recentes propuseram a construção de uma rede trifásica a partir de uma rede MRT ou MRN. Neste caso utiliza-se a terra com um condutor de fase. Isso viabilizaria financeiramente a instalação de redes trifásicas em zonas rurais. Toda via, questões de segurança ainda precisam ser avaliadas para este tipo de estrutura. Este trabalho visa estudar as características de segurança para que tal rede possa ser implementada. As equações e avaliações sobre segurança foram feitas em ambiente virtual, porém a estratificação do solo se baseou em resultados medidos em um terreno teste que se mostrou seguro em sua operação mesmo com várias hastes.

Keywords: *Earth Return, Safety, SWER, Grounding, Rural power Lines.*

Palavras-chaves: *Retorno por Terra; Segurança; Single Wire Earth Return; Aterramento; Redes Rurais.*

1. INTRODUÇÃO

De acordo com IBGE (2016) a cerca de 15,28% da população brasileira reside em meio rural, o grau de isolamento associado com relativo baixo consumo destas propriedades faz com que o investimento em novas linhas de distribuição se torne pouco atrativo. Contudo, a eletrificação rural tem se tornado um desafio principalmente após programas governamentais exigir a ligação da unidade, não importando o seu consumo e sua localização.

Atualmente, a transmissão em redes rurais é largamente realizada com base em sistemas de distribuição do tipo Single Wire Earth Return (SWER). Contudo, esse sistema limita-se a potências monofásicas. Mesmo com o uso de inversores a jusante para produzir uma linha trifásica alimentando motores, a transmissão é restrita à capacidade de condução do modelo. Pelo mundo, as redes SWER são usadas para levar energia para áreas remotas. Na Austrália, foi o país onde Mandeno implementou as primeiras redes SWER Mandeno (1947), em seguida Uganda, Brasil e até mesmo as áreas mais remotas do Alaska, vieram a utilizar essa topologia para levar energia a

áreas mais afastadas devido ao seu baixo custo e simplicidade de operação.

Para ampliar a capacidade de fornecimento nas zonas rurais, recentemente propôs-se uma estrutura que utiliza dois condutores fase aéreos e a interface com a terra para transferir a energia da terceira fase. Apesar da tecnologia se mostrar atraente ainda são necessários estudos referentes às questões de segurança. Neste contexto, é preciso avaliar as distâncias mínimas para usuários e animais, o surgimento de potências perigosos na superfície do solo, instalação de outras estruturas de aterramento necessárias às proteções dos sistemas elétricos, dentre outros.

2. REDE NÃO CONVENCIONAL

A linha proposta por Borges et al. (2017) é composta por um sistema com dois condutores aéreos de fase, e faz-se uso da terra como terceiro condutor. Essa topologia pode ser usada para fornecer energia trifásica a áreas remotas com um custo menor que uma rede trifásica a três fios. O maior diferencial dessa topologia é que ela pode ser utilizada em sistemas já existentes sem a limitação de redes monofásicas.

Contudo, não basta o sistema ser funcional. O trabalho que apresenta a nova topologia, não é discutida a segurança da rede nem seus limites operacionais. Para responder a essas limitações, este estudo busca encontrar na literatura qual o estado da arte para elaborar uma metodologia que permita avaliar as condições de segurança do sistema.

Destaca-se a análise de documentos internacionais como os padrões internacionais IEEE 80 (IEEE Power and Energy Society 2013) e IEEE 81 (IEEE Power and Energy Society 2012) posterior a análise de documentos com as especificações das concessionárias. Nestes documentos as informações procuradas são de ordem procedural técnica e são referência para documentações específicas de cada localidade, porém deseja-se encontrar uma metodologia que seja flexível e modular, podendo ser aplicada a todos os padrões.

2.1 Rede T2F

As redes SWER são sistemas monofásicos (fase mais neutro), notadamente construídos com transformadores que possuem apenas um cabo na parte de alta tensão, sendo o retorno (fio neutro) efetuado geralmente através de hastes aterradas. Dentre principais vantagens do sistema SWER estão a simplificação da construção, permitindo maior rapidez e menores custos, utilizam estações transformadoras mais simples e baratas, pois os transformadores têm somente um terminal de alta tensão e exigindo, portanto um único para-raios e uma chave monofásica.

A rede T2F proposta tem como objetivo trazer um meio termo entre o sistema monofásico com retorno por terra (MRT) e o trifásico convencional, seu funcionamento é ilustrado nas Fig. 1 e 2. Contudo, ainda não se observa análises sobre os aspectos da segurança pertinentes aos perigos de um gradiente de tensão próximo às torres e alimentadores. O fato de injetar energia no solo, utilizando-o como meio condutor, apresenta novas perspectivas de riscos como, por exemplo, a energização involuntária de elementos estranhos às redes. Como resultado podem surgir tensões de toque e de passos perigosos devido à produção de gradientes elétricos associados gerados no solo.

Para este tipo de rede destaca-se a necessidade de uma proposição normativa quanto às questões de segurança. Para tanto, convém revisar o contexto das normas e padrões de concessionárias vigentes. Além disso, de maneira complementar, é importante estabelecer uma metodologia de avaliação das condições de risco desta estrutura em particular.

3. NORMATIVO

Os estudos de Dalziel (1956) mostram os valores máximos de amplitude e tempo em que a corrente elétrica é suportada pelo corpo humano e seus efeitos caso os limites sejam ultrapassados. Vale destacar que:

- Por volta de 1 mA, tem-se o início da sensibilidade do corpo às correntes elétricas;
- A partir de 10 mA já são consideradas perigosas;
- Acima de 60 mA são consideradas fatais.

O tempo é um fator determinante na segurança de redes, exposições de 0,06 a 0,3 segundos diminuem drasticamente o risco de fibrilação.

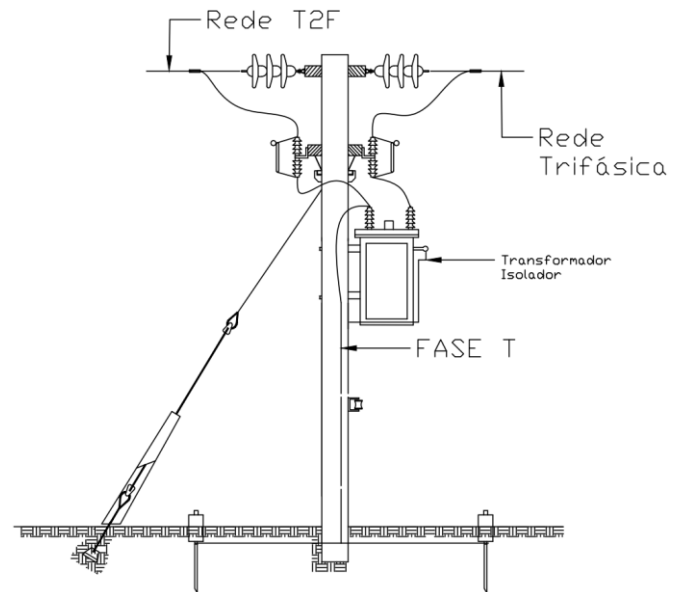


Fig. 1 Estrutura de MRT adaptado para T2F.

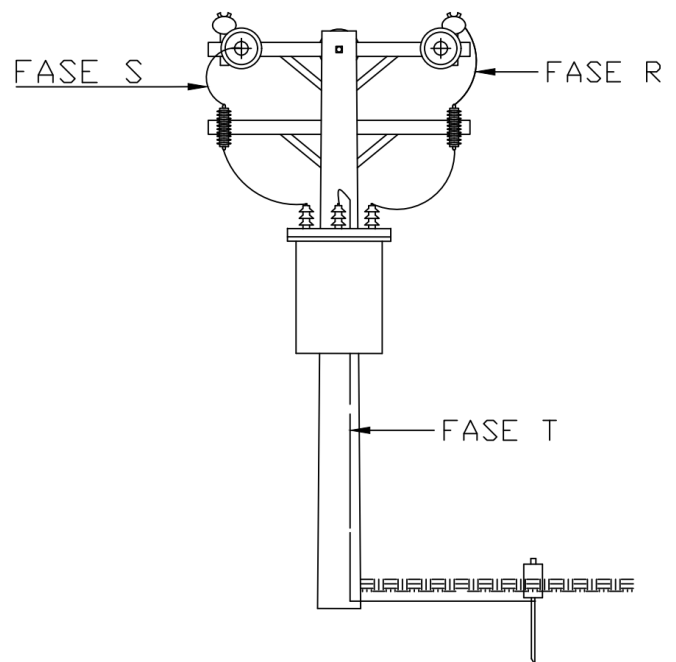


Fig. 2 Estrutura de MRT adaptado para T2F.

Desse modo, (1) determina a corrente máxima para um dado tempo.

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{T_S}} \quad (1)$$

Onde: I_B é a corrente estudada; T_S é o tempo máximo permitido; k é a constante corporal.

Em Mandeno (1947) temos (2) e (3) que representam os máximos valores de tensão de passo e toque permissíveis. O valor de k pode ser definido como 0,116 para um corpo de 50 kg ou 0,157 para 70 kg.

$$E_{touch} = (R_B + 2 \times R_F) * \frac{k}{\sqrt{T_S}} \quad (2)$$

$$E_{step} = \left(R_B + \frac{R_F}{2}\right) * \frac{k}{\sqrt{T_S}} \quad (3)$$

Onde: E_{touch} é a tensão de passo; E_{step} é tensão de toque; R_B é resistência do corpo; R_F é a resistência do pé.

Na Austrália e Nova Zelândia (pioneiros no uso de redes SWER) há um guia para aplicação que continua vigente (New Zealand Committee for the Coordination of Power and Telecommunication Systems 2011). Nele é possível encontrar equações e métodos para construção de uma rede de MRT em alta tensão bem como as limitações para que ele cause interferência em outros sistemas. No Alaska, também é comum a adoção de redes SWER devido a sua baixa densidade populacional, temos a RCA (Denali Commission 2009) que segue a normativas da IEEE 80. Em Uganda, não existe um padrão sobre a segurança. As normativas apenas indicam a resistência de aterramento de 5 Ω e seguir o que está na IEEE 80 (IEEE Power and Energy Society 2013).

Por outro lado, normas brasileiras como a CEEE IT-81.002 (Instrução Técnica para elaboração de projetos de redes aéreas de distribuição rural) costumam trabalhar com valores mais altos, de 10 a 20 ohms, mas há casos como o da Energisa (Energisa 2001) que detém uma tensão máxima de passo e toque, mas não restringe uma máxima resistência de aterramento. A Tabela 1 traz uma relação com as normas descritas acima.

Tabela 1. Parâmetros de Segurança

Norma	Rat max (Ω)	Máxima tensão de passo (V/m)	Máxima tensão de toque (V/m)
EPC 41	5	20	20
IT – 81002 (CEEE)	10 a 20	-	-
RCA	Segue a IEEE STD 80		
Uganda	5	-	-
OT-01 (Energisa)	Variável	12	12

O trabalho apresentado por He et al. (2012) traz conceitos de teóricos de solo como o efeito da umidade e porosidade do solo na condução de corrente elétrica, diferentes propósitos de aterramento e o entendimento inicial do sistema de aterramento.

Em Simon (1971), afirma-se que a variação da resistência de um sistema de aterramento pode comprometer tecnicamente os sistemas monofilar com retorno por terra (MRT), visto que esse depende diretamente do aterramento. Contudo, estudos de Silva Jr et al. (1992) comparando os valores de resistências de aterramento, concluíram que 83% das medições apresentavam erro inferior a 20% entre valor medido e valor calculado. Seus estudos concluíram que a diferença máxima entre os valores medidos e projetados. Destaca-se aqui que um projeto de aterramento deve ser projetado levando em consideração a variação sazonal do solo mas que os valores medidos no projeto, tendem a não divergir dos projetados.

Tagg (1964) determina, através de deduções de equações, o ponto de instalação da haste de potencial, na medição da resistência de aterramento, o qual deve estar a 61,8% da distância correspondente a haste de corrente. Este resultado foi baseado num eletrodo de aterramento esférico ideal, porém pode ser estendido a outras configurações de aterramento.

Paula Filho e Arouca (1976) obtém, através de várias formulações empíricas, as curvas da resistência de aterramento em relação às dimensões e profundidades dos eletrodos de cobre, dos tipos: tubo, tira e placa. Tais resultados comprovaram que dois tubos espaçados (suficientemente para que não haja sobreposição de campos) e ligados em paralelo, são mais eficientes que um tubo de diâmetro igual à soma dos dois.

A primeira consideração a respeito do aterramento das linhas MRT é a proteção da vida de pessoas e animais. Nos trabalhos de Dalziel, tempo, amplitude e frequência são os principais fatores para o desconforto. Equações (2) e (3) mostram que o tempo de exposição máximo para um potencial. Harvey (1959) concluíram que o dimensionamento de um sistema de aterramento deve ser feito de forma que o potencial de passo não ultrapasse 40 V e que, uma tensão de 13 V nas patas de um boi (potencial de pata) chega a causar desconforto.

O Código de Instalação do Sistema MRT australiano aplica um coeficiente de segurança de 2 sobre 40 V, limitando, no código de aterramento, a tensão máxima em 20 V em condições normais de operação. Com tal limitação, o risco de morte é desprezível. O estudo de Sander (1997) ainda estuda aumentar de 20 V para 35 V provando que não há aumento de risco, mas aumenta o retorno econômico.

A origem desse valor é dado por testes conduzidos em gados onde constatou-se que um gradiente médio de 27 V é o suficiente para causar um desconforto pela circulação de corrente. Assumindo que as patas dos animais estão, em média, separadas em 1,5 m, entende-se que um gradiente de 40 V seja o limiar máximo. O Código de prática para aterramento australiano considera ainda aplicar um fator de segurança igual a 2 tornando o valor alvo 20 V.

Contudo, normas mais atuais, como a IEEE 80 e IEC 479-1 (1994) trazem valores menos conservadores com maior dependência da resistividade do solo e tempo de exposição para assumir uma tensão de passo segura. Portanto toma-se como ponto de partida o valor de 20 V para fluxo permanente e utiliza-se (2) e (3) para correntes de curto circuito com tempo determinado pela proteção (como elos fusíveis e relés).

4. ESTUDO DE CASO

O objetivo desse trabalho é garantir a segurança em redes que utilizam a terra como fase ativa de um sistema. Tendo a base teórica necessária, conduz-se o estudo para um ambiente computacional, via Matlab visando analisar os potenciais gerados na superfície do solo.

Para ter uma fidelidade maior nos resultados, realiza-se um sistema em pequena escala dentro do laboratório e utiliza-se um terreno teste para os experimentos.

4.1 Terreno Teste

O terreno teste encontra-se dentro da UFSM e possui um vão livre de aproximadamente de 100 m onde pretende-se construir uma linha teste para o sistema. Utilizando o método de Wenner (conforme recomendado pela IEEE 80), fez-se doze linhas nos dois locais aonde pretende-se injetar e extrair correntes (os limites do vão) os resultados são apresentados na Tabela 2. A Tabela 1 traz uma relação com as normas descritas acima.

Tabela 2. Características do Terreno Teste

H (m)	R (Ω.m)
1	72,88
2	70,05
4	60,32
6	62,32

Esse terreno se encontra dentro da UFSM, o que facilita o levantamento das curvas e foi escolhido um trecho de aproximadamente 100 m. De posse dessas informações, faz-se agora a estratificação do solo em duas camadas conforme as orientações da IEEE 81, resultando em uma primeira camada de 1,295 m com resistividade de 68,285 Ω.m e uma segunda camada infinita de 56,874 Ω.m.

4.2 Hastes

Trabalhos anteriores como He et al. (2012), Kindermann e Campagnolo (2002), Colominas et al. (2007), Dawalibi (1982), Villas e Portela (2003) e Salam e Rahman (2016) discutem a metodologia para o estudar o campo elétrico E_p produzido por uma fonte pontual de corrente I em um solo homogêneo. Este campo elétrico pode ser sintetizado através de (4). Considerando-se que a que a corrente se distribui uniformemente entre uma esfera de raio r , pode-se determinar respectivamente a área da esfera equivalente A_e e a densidade de corrente conforme J_p em (5) e (6). Substituindo-as em (4), pode-se avaliar a distribuição de campo E_p através de (7).

$$E_p = \rho * J_p \quad (4)$$

$$A_e = 4\pi r^2 \quad (5)$$

$$J_p = \frac{I}{A_e} \quad (6)$$

$$E_p = \frac{\rho * I}{4\pi r^2} \quad (7)$$

A partir de (7) a distribuição do potencial produzido V_p pode ser determinado com o auxílio de (8) ao incluir-se a resistividade do meio no qual a fonte pontual está inserida.

$$V_p = \int_p^\infty \frac{\rho * I}{4\pi r^2} \quad (8)$$

Para estimar os potenciais elétricos na superfície de um solo de duas camadas, utiliza-se um algoritmo em Matlab, baseado em Alves (1998). O equacionamento fornecido para a distribuição do potencial é a base para este algoritmo, porém com algumas correções devidas ao surgimento de imagens e imagens refletidas da fonte pontual de corrente Alves (1998).

Assim sendo, é possível estimar o potencial elétrico em um ponto qualquer, localizado na primeira camada do solo, a partir da injeção de corrente em um ponto J, através de um eletrodo puntiforme na segunda camada.

Por exemplo, seja I uma corrente injetada em um ponto J, localizado na coordenada x_j, y_j e z_j . O potencial V_p em um ponto P(x, y, z) pode ser calculado através de (9), a qual precisa ainda de (10)-(12).

$$V_p(x, y, z) = \frac{\rho_1 * (1+k) * I}{4\pi} \left[\frac{1}{r_{0j}^+} + \frac{1}{r_{0j}^-} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{r_{nj+}^+} + \frac{1}{r_{nj-}^-} \right) \right] \quad (9)$$

$$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (10)$$

$$r_{nj+}^+ = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + [2 * n * h + (z_j + z)]^2} \quad (11)$$

$$r_{nj-}^- = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + [2 * n * h + (z_j - z)]^2} \quad (12)$$

Onde: ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo; ρ_2 é a resistividade da segunda camada; k é o coeficiente que relaciona as duas camadas do solo; r_{0j}^+ é a distância entre o ponto P e o ponto J; r_{0j}^- distância entre o ponto P e a imagem ponto J; r_{nj+}^+ é a distância entre o ponto P e o ponto J refletido; r_{nj-}^- é a distância entre o ponto P e a imagem do ponto J refletida; h é a profundidade da primeira camada.

Caso exista uma configuração de aterramento com mais de um eletrodo injetando corrente no solo, deve-se calcular a contribuição de potencial de cada haste pelo método da superposição, considerando que a corrente se divide uniformemente entre as hastes.

4.3 Análise de Segurança

O conceito de segurança é definido por um conjunto de medidas assumidas para proteger a si e outros, implicando na qualidade ou o estado de estar seguro. Seguindo a revisão bibliográfica, os pontos principais para segurança são as tensões de passo e toque (também chamadas de tensões perigosas), resistividade superficial e o tempo de exposição a falha. Esses pontos serão os pilares para caracterizar um sistema como seguro. Segundo Danziel o limiar de sensibilidade é perto de 1 mA, contudo, para que esta corrente circule pelo corpo faz-se necessário que exista uma tensão suficientemente grande para tal.

Utilizando as equações da subseção 4.2, pode-se obter o potencial gerado ponto a ponto, mas não o potencial de passo ou toque. Para tal, um algoritmo é gerado verificando metro a metro utilizando as medidas geradas, resultando em sinalizadores. Todo ponto é comparado ao seu vizinho desde que o mesmo esteja 1m de distância, se não estiver, o algoritmo pode compensar para calcular o passo sempre nesta distância. Ainda, o script retorna o maior valor de passo encontrado. Os possíveis sinalizadores são:

- Caso o ponto possua uma tensão maior que 12 V com algum ponto vizinho, será sinalizado o valor 1;

- Caso o ponto possua uma tensão maior que a calculada por (2) ou (3) com algum ponto vizinho, será sinalizado o valor 2;
- Caso o ponto apresente ambas as sinalizações 1 e 2, será gerada uma sinalização 3;
- Caso o ponto seja seguro em todas as instâncias sinalizado com 0.

5. RESULTADOS

Para a análise dos potenciais elétricos no solo, considera-se o solo modelado na seção anterior, com quatro configurações diferentes de aterramento, sendo elas: Hastes verticais simples, duas hastes alinhadas, hastes em triângulo e hastes em quadrado vazio.

1) *Hastes simples*: Nessa configuração, injeta-se uma corrente de 10 A no solo através de uma haste simples. A Fig. 3 e a Fig. 4 apresentam a distribuição de potencial na superfície para hastes de respectivamente 1,8 m e 2,2 m de comprimento. Como podemos ver, nenhuma delas apresenta potenciais perigosos. Demais análises foram feitas mas foram suprimidas pelo autor.

2) *Hastes alinhadas*: Da mesma forma, injeta-se 10 A no solo, que se divide entre as duas hastes. As Fig. 5 à 8 apresentam, respectivamente, os casos para hastes separadas por 2 m com 1,8 m e 2,2 m de profundidade e hastes separadas de 4 m com 1,8 m e 2,2 m de profundidade.

3) *Hastes dispostas em triângulo*: Nesse caso, injeta-se 10 A no solo, que se divide igualmente entre as três hastes, dispostas em um triângulo equilátero com 4 m de lado. A Fig. 9 e a Fig. 10 apresentam os resultados para hastes com 1,8 m e 2,2 m de comprimento.

4) *Hastes em quadrado vazio*: Nesse caso, injeta-se uma corrente 10 A no solo, que se divide entre 8 hastes dispostas em um quadrado vazio com 4 m de lado. A Fig. 11 apresenta os resultados obtidos para a distribuição de potencial elétrico no solo em uma configuração quadrado vazio com hastes de 2,2 m de comprimento.

A Tabela 2 mostra os resultados do algoritmo para máxima tensão de passo obtida para cada configuração de haste, geometria e espaçamento.

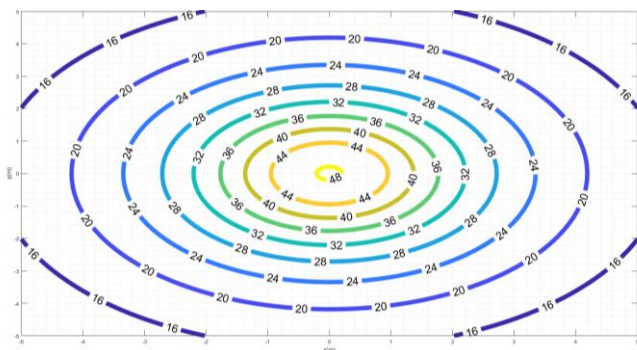


Fig. 3. Tensões na superfície do solo de uma haste simples com 1,8 m de comprimento.

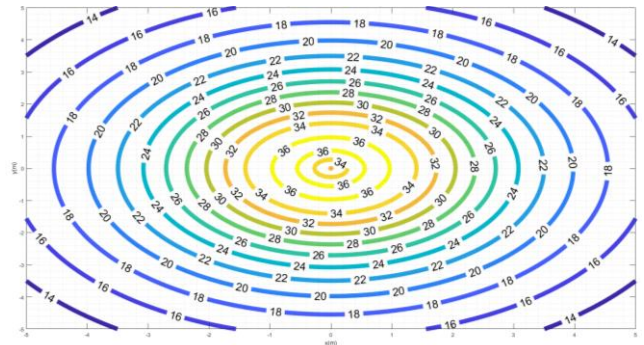


Fig. 4. Tensões na superfície do solo para uma haste simples com 2,2 m de comprimento.

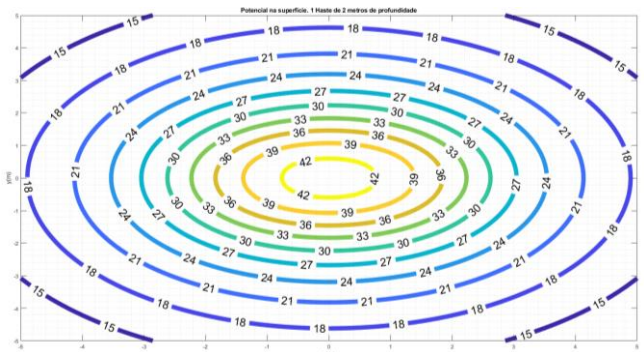


Fig. 5. Tensões na superfície do solo com hastes de 1,8 m de comprimento, alinhadas e afastadas 2 m.

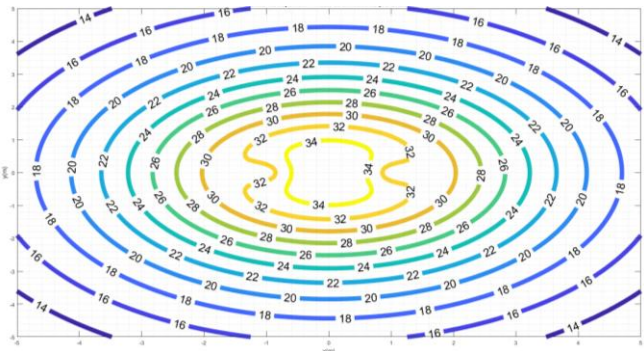


Fig. 6. Tensões na superfície do solo com hastes de 2,2 m de comprimento, alinhadas e afastadas 2 m.

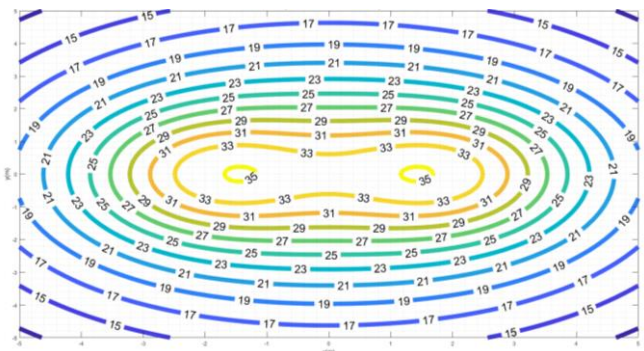


Fig. 7. Tensões na superfície do solo com hastes de 1,8 m de comprimento, alinhadas e afastadas 4 m.

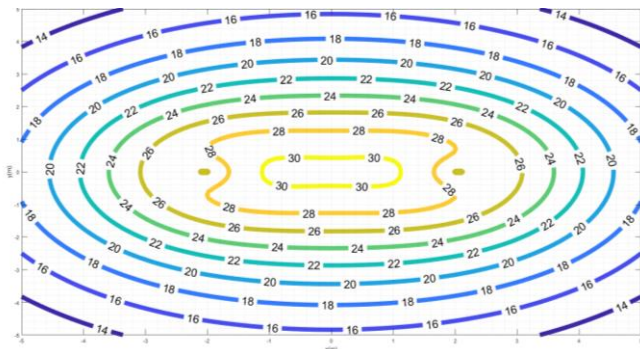


Fig. 8. Tensões na superfície do solo com hastes de 2,2 m de comprimento, alinhadas e afastadas 4 m.

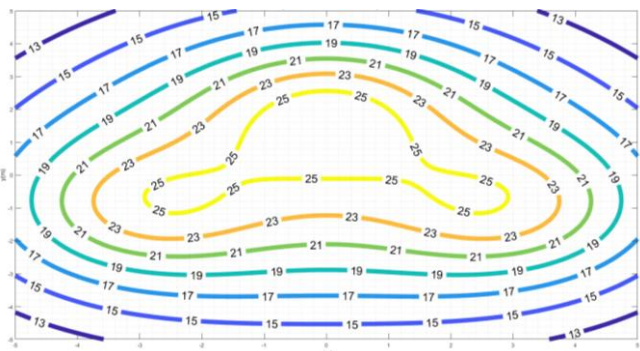


Fig. 9. Tensões na superfície do solo com hastes em triângulo de 4 m de lado, com hastes de 1,8 m de comprimento.

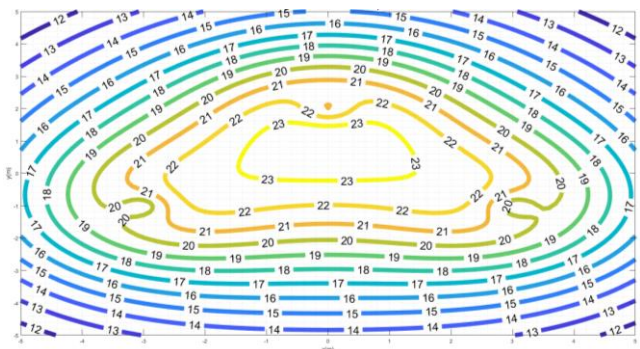


Fig. 10. Tensões na superfície do solo com hastes em triângulo de 4 m de lado, com hastes de 2,2 m de comprimento.

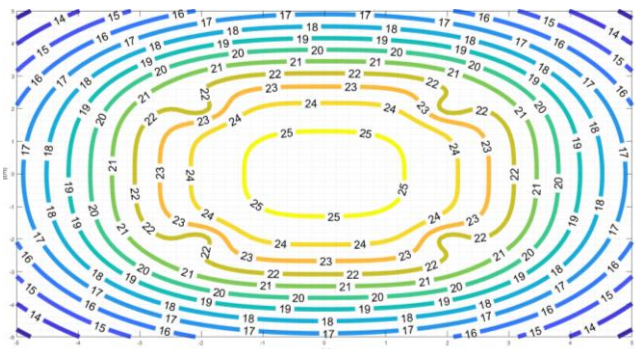


Fig. 11. Tensões na superfície do solo para configuração de quadrado vazio com 4 m de lado.

Tabela 2 - Máxima tensão de passo calculada (V)

Configuração	Haste de 1,8 m	Haste de 2,2 m
1 Haste	9,7391	6,2570
2 Hastes Alinhadas (2 m)	7,8209	5,4862
2 Hastes Alinhadas (4 m)	6,1908	4,2103
Hastes em Triângulo	4,2667	3,027
Hastes em Quadrado Vazio	-	2,8722

6. CONCLUSÕES

O elevado custo dos investimentos na eletrificação rural, associado às dificuldades na obtenção de recursos, impõe a necessidade de estudos de racionalização do sistema elétrico, de modo a adequá-lo às características das cargas elétricas nas áreas rurais brasileiras.

Dentre esses estudos, destaca-se o sistema trifásico utilizando dois condutores aéreos tornado o sistema mais economicamente viável. Contudo, a segurança passa a ser questionada por ter uma fase sendo conduzida pelo solo em si. Esse trabalho buscou na literatura, conceitos e metodologias para avaliar e dimensionar esse sistema inovador bem como, estabelecer os critérios para sua condução segura.

Os resultados obtidos pelas simulações, usaram um solo real como parâmetro e mostram resultados seguros para operação nominal do sistema. Mesmo o sistema com apenas uma haste, não apresentou tensões acima de 12 V em um espaço de 1 m, categorizando-o com seguro.

Com isso, espera-se atender a demanda rural, mais rapidamente, pois a linha T2F oferece um menor custo de instalação, contudo, mais estudos sobre operação em curto circuito e descarga elétrica são necessários.

REFERÊNCIAS

- Alves, H.N. (1998). Avaliação do potencial em solo de duas camadas baseada no modelo do potencial constante. , 1998, p.98.
- Borges, P.R.O., Ramos, J.E., Carvalho, C.A.T., Pires, V.A., Cardoso, G., Ramos, D.B. e de Moraes, A.P. (2017). Repowering rural single-phase distribution network: A non-conventional proposal using two overhead wires and the ground as the third phase. *Electric Power Systems Research*, 150, p.105–117.
- CEEE - D (2015) *Instrução técnica para elaboração de projetos de redes aéreas de distribuição rurais*. IT-91.002
- Colominas, I., Navarrina, F. e Casteleiro, M. (2007). Numerical simulation of transferred potentials in earthing grids considering layered soil models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), p.1514–1522.
- Dalziel, C.F. (1956). Effects of electric shock on man. *IRE Transactions on Medical Electronics*, PGME-5, p.44–62.
- Dawalibi, F. (1982). *Transmission-line grounding*.
- Denali Commission. (2009). *Transmission system for remote Alaska applications*. , 2009.
- Energisa. (2001). *Fornecimento de energia elétrica no sistema monofásico com retorno por terra (MRT)*. , 2001.
- Harvey, J.L.W. (1959). Single wire earth return high voltage distribution for victorian rural areas. *Electrical & Mechanical Engineering Transactions*, 1959, p.1–11.
- He, J., Zeng, R. e Zhang, B. (2012). *Methodology and*

- Technology for Power System Grounding*. 1º ed Wiley-IEEE Press, org.
- IBGE. (2016). *Pesquisa nacional por amostra de domicílios: síntese de indicadores 2015*. Rio de Janeiro.
- IEC-479-1 (1994) - *Effects of Current on human beings and livestock*.
- IEEE Power and Energy Society. (2012). *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System - Redline*.
- IEEE Power and Energy Society. (2013). *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. IEEE Std 80-2013 (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015)*, 2013, p.1–226.
- Kindermann, G. e Campagnolo, J.M. (2002). *Aterramento elétrico*. LabPlan.
- Mandeno, L. (1947). Rural power supply, especially in back country areas. *Proceedings of the New Zealand Institution of Engineers*, 33, p.234.
- New Zealand Committee for the Coordination of Power and Telecommunication Systems. (2011). *High voltage single wire earth-return (SWER) systems (guide)*. , 2011.
- Paula Filho, W. e Arouca, M. (1976). Estudo comparativo de vários tipos de eletrodos de aterramento, quanto a capacidade de transporte de carga e resistência elétrica, aplicados ao retorno de corrente pela terra. , 1976, p.277.
- Salam, M. e Rahman, Q. (2016). *Power Systems Grounding*.
- Sander, C.H.L. (1997). *An Earthing Design Guide For Single Wire Earth Return (Swer) Systems In The Northern Cape Region*.
- Silva Jr, A.R., Lopes, D.S. e Seraphim, O.J. (1992). Valores de resistência de aterramento projetados e medidos. In: *Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Pesquisas*. São Paulo.
- Simon, W. (1971). El sistema SWER - um interesante método para la electrificación rural. In: *Simpósio sobre Electrificación Rural*. Buenos Aires: Asociación Argentina de Electrotécnica.
- Tagg, G.F. (1964). *Earth resistances*. London: George Newnes.
- Villas, J.E.T. e Portela, C.M. (2003). Calculation of electric field and potential distributions into soil and air media for a ground electrode of a HVDC system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), p.867–873.