

“GROUNDINGGRID”: UM PACOTE R PARA ENSINAR ASPECTOS FUNDAMENTAIS DE MALHAS DE ATERRAMENTO

José F. M. Pessanha^{1,2} e Sergio L. Varricchio¹

¹*Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 21941-911, RJ, Brasil*

²*Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 20550-900, RJ, Brasil*

Palavras-chave: Engenharia Elétrica, Malha de Aterramento, Otimização de Sistemas de Aterramento, Programação em R, Subestações Elétricas.

Resumo. Este trabalho apresenta um pacote R para calcular a distribuição de potencial na superfície acima de malhas de aterramento quadradas ou retangulares, compostas por condutores paralelos e ortogonais enterrados horizontalmente em solos homogêneos. Apesar de assumir premissas simplificadoras, o pacote pode ser útil para projetar e ensinar malhas de aterramento, por exemplo, permite mostrar o efeito do arranjo dos condutores nas malhas de aterramento sobre as distribuições de potencial na superfície do solo, conforme ilustrado pelo estudo de caso com malha de aterramento com espaçamento não uniforme entre os condutores.

E-mail addresses: francisc@cepel.br, slv@cepel.br.

“GROUNDINGGRID”: A R PACKAGE TO TEACH FUNDAMENTALS ASPECTS OF GROUNDING GRID

Keywords: Electrical Engineering, Grounding Grid, Grounding Grid Optimization, R Programming, Substations.

Abstract. This work presents an R package to calculate the potential distribution on the surface above square or rectangular grounding grids, composed of parallel and orthogonal conductors buried horizontally in homogeneous soils. Despite assuming simplifying assumptions, the package can be useful for designing and teaching grounding grids, for example, it allows show the effect of the conductor arrangement in the grounding grid on the potential distributions over the ground surface, as illustrated by the case study with grounding grid with non-uniform spacing between the conductors.

1 INTRODUÇÃO

Uma malha de aterramento é constituída por um conjunto de condutores interconectados enterrados no solo, cuja função é dispersar as correntes de defeito e correntes de impulsos geradas por manobras ou descargas atmosféricas [20]. Quando uma corrente circula pela malha de aterramento o solo na sua vizinhança sofre uma elevação de potencial. Esta elevação não se distribui de forma uniforme, sendo uma função crescente da resistividade do solo e da corrente injetada na malha. A distribuição não-uniforme da elevação de potencial no solo faz com que uma pessoa, na vizinhança da malha, seja submetida à uma diferença de potencial que provoca a circulação de uma corrente pelo seu corpo.

Assim, no projeto de uma malha de aterramento, o arranjo dos condutores deve produzir uma distribuição mais uniforme do potencial induzido no solo, a fim de que as diferenças de potencial em pontos no solo ou entre estruturas aterradas e o solo não represente risco para as pessoas, i.e., uma probabilidade inferior a 0,5 % de que as diferenças de potencial provoquem fibrilação ventricular [1].

Neste trabalho são apresentados aspectos fundamentais de malhas de aterramento quadradas/retangulares de subestações elétricas (SEs), considerando o regime quase-estacionário, i.e., a frequência fundamental. São apresentados resultados para malhas quadradas com espaçamentos uniformes e não uniformes entre condutores [5, 7]. O objetivo é fornecer conhecimentos básicos importantes sobre sistemas de aterramento para estudantes e engenheiros que desejem ou necessitem iniciar atividades nesta área.

A complexidade dos cálculos envolvidos em um projeto de malhas de aterramento aponta para a necessidade de ferramentas computacionais [8] que agilizem a execução de cálculos tediosos e a visualização dos resultados obtidos de forma prática. Para alcançar os objetivos didáticos pretendidos, o presente trabalho descreve o programa *groundingRid*, um pacote em linguagem R [17] para o ensino de malhas de aterramento. Vale destacar que o *groundingRid* contribui para a implementação da aprendizagem baseada em projetos.

A seguir, são apresentados os critérios usados na avaliação das condições de segurança de um sistema de aterramento. Nas três seções subsequentes são apresentados os aspectos fundamentais da metodologia para o cálculo da matriz de resistências de aterramento, determinação da tensão da malha e cálculo do potencial induzido no solo. Na sequência, apresenta-se o pacote *groundingRid*, desde a sua instalação até a sua utilização. A aplicação em projetos de malha de aterramento é ilustrada na penúltima seção. Por fim, as principais conclusões são apresentadas na última seção.

2 CONDIÇÕES DE SEGURANÇA

A segurança de um projeto de aterramento de SE se baseia nas magnitudes das tensões de toque e de passo [1], cujos valores máximos admissíveis são definidos pela norma ABNT NBR 15751-2013 [2].

Na ocorrência de uma falta para a terra, a corrente de curto-circuito flui pelo aterramento gerando tensões no solo. Assim, a tensão de passo corresponde à diferença de potencial entre dois pontos no solo separados por uma distância de 1 m, tipicamente a distância percorrida pelo passo de uma pessoa (Figura 1). Já a tensão de toque acontece quando uma pessoa toca um componente energizado e, portanto, corresponde à diferença de potencial entre um ponto no solo e um ponto em uma estrutura aterrada separados por 1 m de distância, e.g., a ligação por uma das mãos e os pés de uma pessoa, conforme ilustrado na Figura 2. Vale destacar que, geralmente, a tensão de toque não é muito sensível à distância entre os pés de uma pessoa, mas

a corrente que atravessa o corpo nesta situação será máxima quando os pés estiverem afastados. Enquanto isso, a tensão de passo é tipicamente proporcional a esta distância, mas a corrente também será máxima quando os pés estiverem afastados. Os parâmetros básicos para efeito de segurança são a amplitude e a duração da corrente através do corpo humano, nas condições de passo e de toque [15].

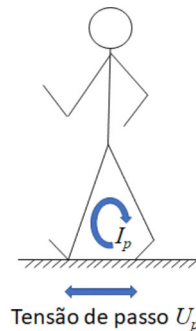


Figura 1: Tensão de passo

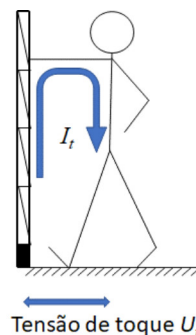


Figura 2: Tensão de toque

Na condição de passo, a amplitude da corrente através do corpo é dada por:

$$I_p = \frac{U_p}{R_{corpo} + R_p} \quad (1)$$

em que R_{corpo} é a resistência do corpo humano, R_p é a resistência de contato e U_p a tensão de passo entre dois pontos no solo, na ausência de qualquer pessoa.

Já na condição de toque, a corrente através do corpo é dada por:

$$I_t = \frac{U_t}{R_{corpo} + R_t} \quad (2)$$

em que R_t é a resistência de contato e U_t a tensão de toque entre o ponto de contato com o elemento em tensão e o solo, na ausência de qualquer pessoa.

Segundo [15], é razoável considerar a resistência do corpo humano como uma função da tensão U a ele aplicada:

$$R_{corpo} = 2900 U^{-0,2} \quad (3)$$

A Eq. (3) pode ser expressa em termos da corrente que circula pelo corpo, pois esta constitui o parâmetro básico para efeito de segurança. Então, substituindo U pelo produto entre a resistência do corpo e a corrente máxima admissível I que pode circular por ele, tem-se:

$$R_{corpo} = \exp \left[\frac{\ln(2900) - 0,2 \ln(I)}{1,2} \right] \quad (4)$$

Segundo [16], para um solo homogêneo com resistividade ρ_2 e uma fina camada de brita de resistividade ρ_1 e considerando que os pés de uma pessoa estejam afastados de 1 m quando se deslocam pela malha de aterramento, a resistência de contato para tensão de toque é dada por:

$$R_t = 1,271 F_1 \rho_1 \quad (5)$$

e a resistência de contato para tensão de passo é dada por:

$$R_p = 4,461 F_2 \rho_1 \quad (6)$$

em que F_1 e F_2 são determinados em função da razão ρ_2 / ρ_1 [16].

3 MATRIZ DE RESISTÊNCIAS

A malha de aterramento deve ser projetada de tal forma que as tensões de passo e de toque na SE e sua vizinhança não atinjam valores superiores aos permissíveis. Para a manutenção de um nível de segurança adequado, é fundamental uma pequena resistência de aterramento, cuja magnitude depende da resistividade do solo ρ , da área ocupada pela malha, do arranjo dos condutores e da profundidade H da malha no solo. Segundo [6], a resistência mútua entre dois condutores de comprimentos a e b é, genericamente, dada por:

$$R_{a,b} = \frac{1}{4\pi\sigma ab} M \quad (7)$$

onde σ é a condutividade do solo (inverso da resistividade ρ).

Note que a resistência própria de um condutor é obtida fazendo $a = b$ na Eq. (7). A seguir, serão apresentadas as expressões de M para o cálculo das resistências próprias dos condutores e mútuas entre eles [6, 9, 11, 14].

3.1 Resistência própria

$$M = 2a \left[\frac{r}{a} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2} + \ln \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2} + 1}{\frac{r}{a}} \right] \quad (8)$$

onde r é o raio do condutor.

3.2 Resistência mútua entre condutores paralelos

Para o caso ilustrado na Figura 3, tem-se:

$$M = 2a \left[\frac{d}{a} - \sqrt{1 + \left(\frac{d}{a}\right)^2} + \ln \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{a}\right)^2} + 1}{\frac{d}{a}} \right] \quad (9)$$



Figura 3: Condutores idênticos em paralelo

Já para o caso de dois condutores em paralelo com comprimentos diferentes (Figura 4) o valor de M é dado por:

$$\begin{aligned}
 M = & d_{11} - d_{12} - d_{21} + d_{22} \\
 & + L_{11} \ln (d_{11} - L_{11}) - L_{12} \ln (d_{12} - L_{21}) \\
 & - L_{21} \ln (d_{21} - L_{21}) + L_{22} \ln (d_{22} - L_{22})
 \end{aligned} \quad (10)$$

em que

$$L_{11} = \varepsilon_1 + \frac{a}{2} \quad (11)$$

$$L_{12} = \varepsilon_2 + \frac{a}{2} \quad (12)$$

$$L_{21} = \varepsilon_1 - \frac{a}{2} \quad (13)$$

$$L_{22} = \varepsilon_2 - \frac{a}{2} \quad (14)$$

$$d_{11} = \sqrt{L_{11}^2 + n^2} \quad (15)$$

$$d_{12} = \sqrt{L_{12}^2 + n^2} \quad (16)$$

$$d_{21} = \sqrt{L_{21}^2 + n^2} \quad (17)$$

$$d_{22} = \sqrt{L_{22}^2 + n^2} \quad (18)$$

3.3 Resistência mútua entre condutores colineares

Para condutores colineares faça $n = 0$ nas componentes da Eq. (10).

3.4 Resistência mútua entre condutores ortogonais

Para o caso de dois condutores ortogonais com comprimentos a e b , conforme ilustrado na Figura 5, o valor de M é dado por:

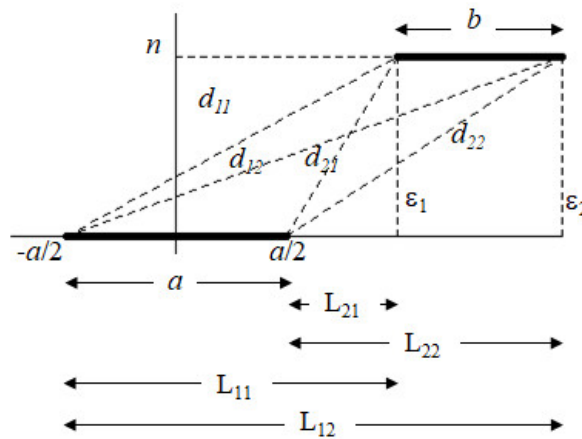


Figura 4: Condutores em paralelo

$$\begin{aligned}
 M = n & \left[\arctan \left(\frac{\varepsilon_2 \delta_2}{n d_{22}} \right) - \arctan \left(\frac{\varepsilon_1 \delta_2}{n d_{12}} \right) \right. \\
 & \left. - \arctan \left(\frac{\varepsilon_2 \delta_1}{n d_{21}} \right) + \arctan \left(\frac{\varepsilon_1 \delta_1}{n d_{11}} \right) \right] \\
 & - \varepsilon_2 \ln \left(\frac{\delta_2 + d_{22}}{\delta_1 + d_{21}} \right) + \varepsilon_1 \ln \left(\frac{\delta_2 + d_{12}}{\delta_1 + d_{11}} \right) \\
 & + \delta_2 \ln \left(\frac{d_{22} - \varepsilon_2}{d_{12} - \varepsilon_1} \right) - \delta_1 \ln \left(\frac{d_{21} - \varepsilon_2}{d_{11} - \varepsilon_1} \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

em que

$$d_{11} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \delta_1^2 + n^2} \tag{20}$$

$$d_{12} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \delta_2^2 + n^2} \tag{21}$$

$$d_{21} = \sqrt{\varepsilon_2^2 + \delta_1^2 + n^2} \tag{22}$$

$$d_{22} = \sqrt{\varepsilon_2^2 + \delta_2^2 + n^2} \tag{23}$$

As equações acima permitem calcular a matriz de resistências pelo método das imagens, em que se considera, também, uma segunda malha imaginária situada acima da superfície do solo em uma altura igual a profundidade da malha real [6, 9, 14]. Para ilustrar o cálculo da matriz de resistências, considere a malha quadrada formada por quatro condutores na Figura 6.

A matriz de resistências é simétrica. Para este caso, a matriz tem a seguinte estrutura:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{34} \\ R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} \end{bmatrix} \tag{24}$$

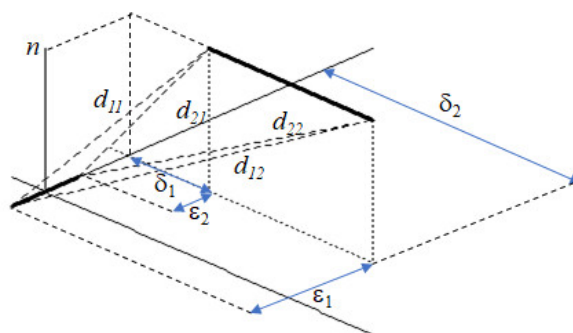


Figura 5: Condutores ortogonais

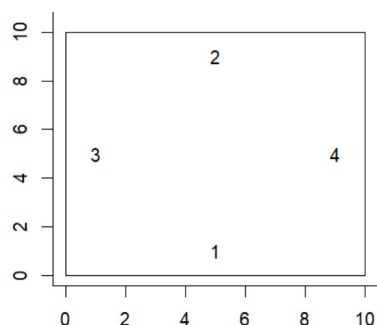


Figura 6: Malha de aterramento quadrada

em que

$$R_{ii} = R_{p_{ii}} + R_{m_{ii'}} \tag{25}$$

$$R_{ij} = R_{m_{ij}} + R_{m_{ij'}} \tag{26}$$

sendo $R_{p_{ii}}$ a resistência própria do condutor i , $R_{m_{ii'}}$ a resistência mútua entre o condutor i e sua imagem i' , $R_{m_{ij}}$ a resistência mútua entre o condutor i e o condutor j , $R_{m_{ij'}}$ a resistência mútua entre o condutor i e a imagem do condutor j .

Para cada elemento R_{ii} na diagonal da matriz \mathbf{R} , o valor de M na Eq.(7) será dado pela soma dos resultados da Eq. (8) e da Eq.(9) para o i -ésimo condutor.

No cálculo dos elementos fora da diagonal principal da matriz \mathbf{R} , deve-se considerar a posição relativa entre os condutores. Por exemplo, os valores de M dos elementos R_{12} e R_{34} são calculados pela Eq. (9), dado que os condutores 1 e 2 e suas imagens são paralelos, assim como para os condutores 3 e 4 e suas imagens. Já para os elementos R_{13} , R_{14} , R_{23} e R_{24} os valores de M são calculados pela Eq. (19), dado que os condutores 1 e 3 e suas imagens são ortogonais, assim como para os condutores 1 e 4, 2 e 3 e 2 e 4.

A partir das equações anteriormente apresentadas e considerando uma condutividade do solo igual a 0,001 S/m, profundidade da malha de 1 m, condutores com raios de 0,0075 m e comprimentos iguais a 10 m, obteve-se a seguinte matriz de resistências da malha:

$$R = \begin{bmatrix} 133,403 & 14,742 & 25,778 & 25,778 \\ 14,742 & 133,403 & 25,778 & 25,778 \\ 25,778 & 25,778 & 133,403 & 14,742 \\ 25,778 & 25,778 & 14,742 & 133,403 \end{bmatrix} \quad (27)$$

4 TENSÃO DA MALHA

Considere uma malha de aterramento formada por condutores cilíndricos de raio r , enterados horizontalmente à uma profundidade H . Suponha condutores com condutividade muito superior à do meio homogêneo envolvente (solo) de condutividade σ , delimitado por um plano horizontal. Adicionalmente, considere a malha em regime quase estacionário com corrente de deslocamento desprezível.

Seja I a corrente injetada na malha devida a uma falta. Como resultado das suposições consideradas, tem-se as seguintes condições de fronteira na superfície do solo: 1) componente do vetor densidade de corrente \mathbf{J} ortogonal ao solo nula; 2) componente do vetor campo elétrico \mathbf{E} tangencial à superfície do solo contínua.

Assim, os campos dos vetores \mathbf{E} e \mathbf{J} na superfície do solo, para solo homogêneo, são idênticos aos campos originados pela malha e sua imagem em relação à superfície do solo. Tanto a malha quanto sua imagem injetam uma corrente I no meio envolvente homogêneo e ilimitado em todos os sentidos. Note que, matematicamente, a consideração da imagem da malha transforma o meio homogêneo original, delimitado por um plano horizontal, em um meio homogêneo ilimitado.

O problema a ser resolvido consiste em encontrar a corrente que cada condutor da malha injeta no solo, sabendo que a malha é uma equipotencial com tensão U em relação a pontos muito afastados. A tensão U e a corrente que cada condutor injeta no solo devem satisfazer ao seguinte sistema de equações:

$$\mathbf{U} = \mathbf{R} \mathbf{I} \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n I_i = I \quad (29)$$

em que n é o número de condutores da malha, \mathbf{U} um vetor cujas n componentes são iguais à tensão U da malha, \mathbf{I} um vetor cuja componente I_i é igual a corrente que o condutor i ($i = 1, n$) da malha injeta no solo e \mathbf{R} a matriz de resistências da malha, como já definida anteriormente.

Para a malha quadrada ilustrada na Figura 6, o sistema matricial na Eq. (28) possui quatro equações escalares, sendo o objetivo determinar as correntes I_1 , I_2 , I_3 e I_4 conhecendo a matriz \mathbf{R} , dada na Eq. (27), e a corrente total I injetada na malha, por exemplo, 10 A. Para resolvê-lo, inicialmente faz-se o vetor $\mathbf{U}^T = [1, 1, 1, 1]$ (o sobrescrito T denota transposição de vetor ou matriz) para obter um sistema trivial, cuja solução é I_1 , I_2 , I_3 e I_4 . A resistência da malha é dada por:

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^4 I_i} = \frac{U}{I} \quad (30)$$

logo:

$$U = \frac{I}{\sum_{i=1}^4 I_i} \quad (31)$$

Neste caso, $U = 499,254 \text{ V}$ e as correntes que os condutores injetam no solo são dadas pela solução da Eq. (28), considerando o verdadeiro valor do vetor \mathbf{U} (com todas as quatro componentes iguais a $499,254 \text{ V}$), resultando em $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 2,5 \text{ A}$. Logo, a resistência da malha, dada pela razão U / I , é de $49,93 \Omega$.

5 POTENCIAL INDUZIDO NO SOLO

A distribuição de potencial no solo corresponde ao somatório dos potenciais que todos os condutores e suas respectivas imagens induzem no solo [4, 6, 9, 11, 14]. O potencial ϕ em um meio linear, homogêneo e isotrópico, gerado por uma corrente I que passa em um condutor com comprimento a é dado por:

$$\phi = \frac{I}{4\pi\sigma a} \ln \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{a}{2} - x\right)^2 + y^2 + z^2} + \left(\frac{a}{2} - x\right)}{\sqrt{\left(\frac{a}{2} + x\right)^2 + y^2 + z^2} - \left(\frac{a}{2} + x\right)} \right) \quad (32)$$

em que (x, y, z) denota a posição de um ponto qualquer em um sistema de coordenadas com um eixo solidário ao comprimento do condutor, x , e eixos ortogonais y e z , conforme indicado na Figura 7.

Logo, o potencial em um ponto no solo produzido por uma malha de aterramento (e sua imagem) com n condutores é dado por:

$$\phi^{malha} = \sum_{i=1}^n (\phi_i^{real} + \phi_i^{imagem}) \quad (33)$$

em que ϕ_i^{real} e ϕ_i^{imagem} denotam os potenciais produzidos pelo i -ésimo condutor real e sua imagem, respectivamente.

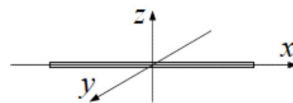


Figura 7: Sistema de coordenadas

Considere uma malha de aterramento de dimensões $a \times b$, formada por condutores de raio r , paralelos e ortogonais coplanares, enterrados a uma profundidade H em solo com condutividade σ . Adicionalmente, conforme ilustrado na Figura 8, a malha é uma grade formada pelo cruzamento de n condutores posicionados nas abscissas $(a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n)$ e m condutores nas ordenadas $(b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_m)$. As abscissas e ordenadas indicadas na Figura 8 formam os vetores \mathbf{cx} e \mathbf{cy} :

$$\mathbf{cx} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_i \ \dots \ a_n] \quad (34)$$

$$\mathbf{cy} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_j \ \dots \ b_m] \quad (35)$$

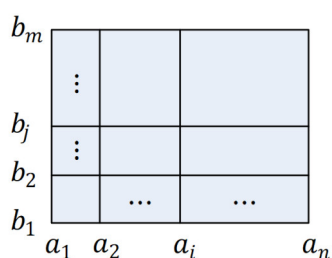


Figura 8: Malha de aterramento

O cálculo do potencial induzido no solo começa com a segmentação dos $n+m$ condutores da malha em $m(n-1)+n(m-1)$ segmentos [6] e a formação de uma matriz com as coordenadas inicial e final de cada um deles.

Vale observar que o cálculo das resistências próprias dos condutores e mútuas entre eles assume distribuição uniforme de correntes [6]. No entanto, a distribuição de corrente em um condutor cilíndrico equipotencial não é uniforme: quanto mais próximo das suas extremidades maior sua concentração. A segmentação dos condutores objetiva uma melhor aproximação da real distribuição de correntes. De forma geral, quanto mais segmentos, maior a exatidão dos cálculos. Na sequência, a matriz de resistências é calculada com base em todos segmentos, i.e., esta matriz tem dimensão igual a $m(n-1)+n(m-1)$. Obtida a matriz de resistências, a tensão na malha e as correntes que os segmentos dos condutores injetam no solo são calculadas pelas Eq. (28), Eq. (29) e Eq. (31), a partir da corrente de curto circuito I injetada na malha. Por fim, a partir da Eq. (32) e da Eq. (33) calcula-se a distribuição de potencial induzido no solo (perfil de potencial), com base nas coordenadas e profundidade de cada segmento e a respectiva corrente injetada no solo.

6 PACOTE GROUNDINGGRID

Trata-se de um conjunto de rotinas computacionais, desenvolvidas em linguagem R [17], com a finalidade de agilizar o cálculo dos potenciais no solo induzidos por malhas de aterramento quadradas ou retangulares.

A opção pela linguagem R deve-se ao fato de ser um *software* livre, com um vasto conjunto de rotinas para análise de dados e geração de gráficos. A linguagem R tem sido muito utilizada na previsão de carga [12], na previsão da geração renovável e na modelagem das incertezas da geração eólica [13], apenas para citar algumas aplicações reais no âmbito do setor elétrico.

A primeira versão do pacote *groundingRid* está disponível em <https://groundinggrid.webs.com>. Vale destacar alguns exemplos de programas com propostas semelhantes em Python [3, 10, 19], Julia [10] e Matlab [8, 10, 21], contudo nem todos estão disponíveis publicamente, como o pacote *groundingRid*.

Apesar das hipóteses simplificadoras assumidas pelo programa: solo homogêneo com apenas uma camada, frequência fundamental e malhas quadradas ou retangulares com condutores complanares, paralelos e ortogonais, o pacote cumpre uma finalidade didática e pode contribuir para o ensino de sistemas de aterramento de SEs.

A utilização do *groundingRid* requer a instalação do R, que pode ser realizada a partir do endereço <https://www.r-project.org/>. Uma vez instalado o programa R e baixado o pacote *groundingRid*, acesse a opção *Pacotes* na barra de opções do R e escolha *Install package(s) from local files* para informar o arquivo com o *groundingRid*. O procedimento de instalação é feito apenas uma vez, mas sempre que utilizar o pacote digite `library(groundingRid)`.

A vista superior da malha de aterramento, com a ilustração do arranjo dos condutores, é gerada pela função `plotgrid(cx, cy, fence)`, cujos parâmetros são descritos a seguir:

- `cx` é o vetor na Eq. (34) com as abscissas dos condutores verticais;
- `cy` é o vetor na Eq. (35) com as ordenadas dos condutores horizontais;
- `fence` é uma matriz 4×2 em que cada linha contém a abscissa e a ordenada de um vértice da cerca, caso não considere a cerca faça `fence = 0`.

Por exemplo, o código na Figura 9 gera a Figura 10 com a vista superior de uma malha de aterramento quadrada, sem cerca e com condutores de 10 m de comprimento. Adicionalmente, considere o interesse em avaliar e visualizar o perfil de potencial no solo ao longo da direção indicada pela linha tracejada na Figura 10, cujas coordenadas correspondem aos elementos dos vetores `px` e `py` definidos na Figura 9. O comando `seq(-2, 12, 1)` gera a sequência -2, -1, 0, 1, ..., 12, i.e., o vetor `px`, com 15 abscissas separadas de 1 m, a mesma distância considerada no cálculo das tensões de toque e passo. Já o comando `length(px)` calcula o número de elementos em `px`, enquanto `rep(5, length(px))` repete 15 vezes o número 5. Para incluir a direção do perfil no desenho da malha use o comando `lines(px, py, lty = 2)`, em que `lty = 2` indica o tipo de linha.

```
cx=c(0,10) # abscissas condutores verticais (m)
cy=c(0,10) # ordenadas condutores horizontais (m)
cerca=0 # SE sem cerca
plotgrid(cx,cy,cerca) # desenha a malha
px=seq(-2,12,1) # abscissas do perfil (m)
py=rep(5,length(px)) # ordenadas do perfil (m)
lines(px,py,lty=2) # marca local do perfil avaliado
```

Figura 9: Comandos para desenhar malha

Os potenciais induzidos no solo, ao longo da direção dada pelas coordenadas (`px`, `py`), dependem do raio do condutor r , da profundidade da malha H , da condutividade do solo σ , da corrente de curto circuito I_{cc} e do arranjo dos condutores em `cx` e `cy`. Assim, considere a malha de aterramento formada por condutores de raio 0,0075 m, enterrados a 1 m de profundidade em solo com condutividade igual a 0,001 S/m. Adicionalmente, considere uma corrente de curto circuito de 10 A e que os máximos valores admissíveis para as tensões de toque U_t e de passo U_p sejam, respectivamente, 239,99 V e 674,39 V. Todas estas informações podem ser inseridas por meio do código R na Figura 11 para alimentar a função `plotprofile`, cuja finalidade consiste em calcular o perfil de potencial e as tensões de toque/passos nas coordenadas (`px`, `py`), além de apresentá-los graficamente na Figura 12.

No canto superior esquerdo da Figura 12 (*potential profile*), a linha em vermelho indica o potencial da malha U e a linha em verde indica a tensão da malha menos a tensão de toque admissível, i.e., $U - U_t$. A diferença entre cada ponto no perfil de potencial em azul e a linha em vermelho representa a tensão de toque no ponto. Neste caso, todos os pontos mostrados no perfil de potencial em azul estão posicionados entre as linhas vermelha e verde, indicando que a tensão de toque, ao longo da malha e na vizinhança externa à mesma, é menor que o máximo valor admissível.

A mesma informação pode ser obtida a partir do gráfico localizado no canto superior direito da Figura 12 (*touch voltage*), no qual a linha em vermelho indica a tensão de toque admissível

($U_t = 239,99$ V) e a curva em azul mostra as tensões de toque ao longo da direção do perfil analisado. Já no canto inferior esquerdo da Figura 12 (*step voltage*) tem-se o perfil da tensão de passo e a máxima tensão de passo admissível ($U_p = 674,39$ V), indicada pela reta em vermelho. Os resultados apontam para a segurança ao longo do perfil avaliado, cuja direção está indicada pela reta em azul no canto inferior direito da Figura 12 (*grounding grid*).

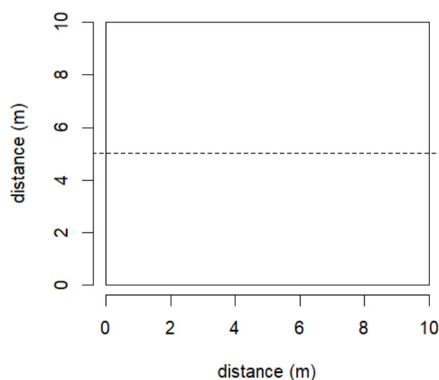


Figura 10: Malha e direção do perfil avaliado

```
H=1 # profundidade da malha (m)
r=0.0075 # raio do condutor (m)
sigma = 0.001 # condutividade do solo (S/m)
Icc=10 # corrente de curto circuito (A)
Ut = 239.99 ; Up = 674.39 # Volts
out = T # gera figuras
output=plotprofile(cx, cy, H, r, sigma, Icc, Ut, Up, px, py, out, cerca)
```

Figura 11: Cálculo do perfil de potencial

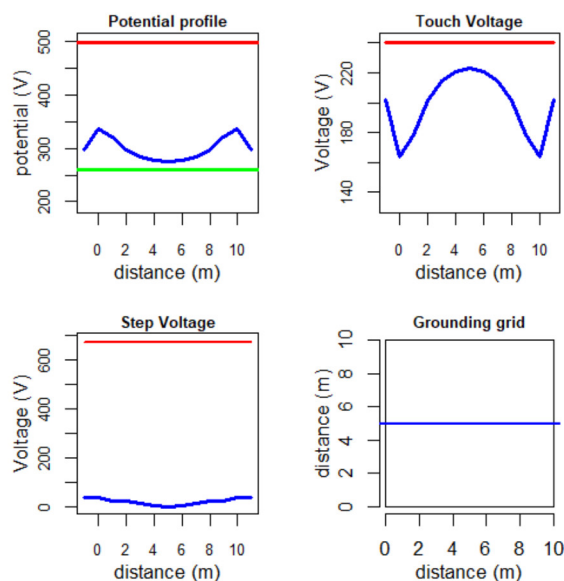


Figura 12: Perfil de potencial e tensões de toque/passo

Além da Figura 12, a função *plotprofile* retorna resultados numéricos como a tensão da malha, as correntes que os segmentos dos condutores injetam no solo, a resistência da malha, a matriz de resistências e o vetor com o perfil de potencial induzido no solo, acompanhado das respectivas tensões de passo e toque na direção informada. Os resultados gerados pela função *plotprofile* são armazenados no objeto *output* e podem ser acessados pelos comandos indicados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados da função *plotprofile*

Resultado	Comando R
Tensão da malha (V)	output\$U
Distribuição de correntes (A)	output\$I
Resistência da malha (Ω)	output\$Rgrid
Matriz de resistências (Ω)	output\$Rmatrix
Perfil de potencial (V)	output\$profile
Tensão de passo (V)	output\$step
Tensão de toque (V)	output\$touch

Para visualizar mais de um perfil, use a função *plotmultiprofile*, cujos argumentos de entrada incluem o objeto resultante de uma ou mais execuções da rotina *plotprofile* (neste caso o objeto *output*) e o tipo de gráfico a ser gerado (1 para perfil de potencial, 2 para tensão de toque e 3 para tensão de passo). O código na Figura 13 gera a Figura 14 e a Figura 15 que permitem visualizar os perfis de potencial na borda (ordenada 1 m) e no centro da malha (ordenada 5 m).

```

out = F # inibe as figuras com resultados
ordenadas=c(1,5) # ordenadas dos perfis horizontais (m)
matperfil=c()
for (i in ordenadas) { # percorre perfis
  py=rep(i, length(px)) # ordenada do perfil avaliado (m)
  aux=plotprofile(cx, cy, H, r, sigma, Icc, Ut, Up, px, py, out, cerca)
  matperfil=append(matperfil, aux)} # guarda resultados
windows(); plotmultiprofiles(matperfil, 2)
windows(); plotmultiprofiles(matperfil, 3)

```

Figura 13: Vários perfis em um mesmo gráfico

7 ARRANJO DA MALHA

Para ilustrar a aplicação do pacote *groundingRid*, considere o projeto de uma malha de aterramento de dimensões $90\text{ m} \times 90\text{ m}$, formada por condutores de raio $r = 0,0075\text{ m}$ dispostos em um plano horizontal enterrado a 1 m de profundidade (H) em solo com resistividade $\rho = 60\ \Omega\text{m}$. A malha deve ser projetada para uma corrente de curto circuito I_{cc} de 10 kA e o pátio da subestação deve abranger uma área de $80\text{ m} \times 80\text{ m}$ centrada na malha e com cercas localizadas a 5 m de cada uma de suas bordas. Dado que a malha é quadrada, com o vértice inferior esquerdo posicionado na origem, os vértices da cerca correspondem aos pontos $(5, 5)$, $(5, 85)$, $(85, 5)$ e $(85, 85)$, delimitando a área em cinza na Figura 16. Inicialmente, propõe-se uma malha com condutores espaçados uniformemente em intervalos de 9 m , conforme indicado na Figura 16 gerada pelo código na Figura 17, no qual as primeiras três linhas contêm parâmetros de entrada (cx , cy e $fence$).

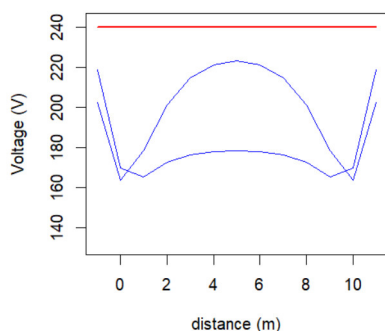


Figura 14: Perfis da tensão de toque

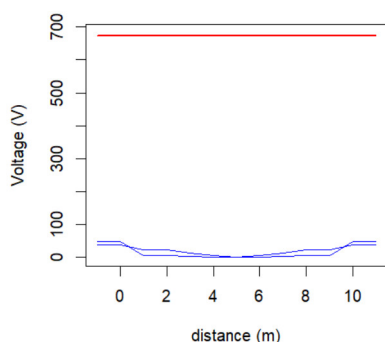


Figura 15: Perfis da tensão de passo

A partir da Eq. (5) e da Eq. (6), admitindo solo homogêneo e uma camada de brita de 5,83 cm com resistividade $3000 \Omega\text{m}$, tem-se resistências de contato de $1,83 \text{ k}\Omega$ e $7,26 \text{ k}\Omega$ nas condições de toque e passo, respectivamente. Por meio da Eq. 4, obtém-se uma resistência de $1169,9 \Omega$ para o corpo humano, considerando que a máxima corrente admissível através do corpo é de 80 mA durante 1 s . A partir da Eq. (1) e da Eq. (2) tem-se que os valores admissíveis para as tensões de toque U_t e de passo U_p são $239,99 \text{ V}$ e $674,39 \text{ V}$, respectivamente.

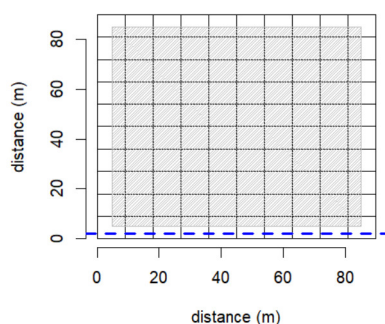


Figura 16: Malha com espaçamento uniforme

O perfil de tensão na vizinhança da borda da malha é apresentado na Figura 18, gerada pela função *plotprofile* na Figura 19, cujos resultados apontam para uma tensão da malha da ordem de 2920 V (comando *out\$U*) e uma resistência da malha igual a $0,292 \Omega$ (comando *out\$Rgrid*). Na Figura 18, as linhas verticais tracejadas indicam a região delimitada pela cerca da SE.

```

cx=seq(0,90,9) # condutores verticais (m)
cy=seq(0,90,9) # condutores horizontais (m)
vc=rbind(c(5,5),c(5,85),c(85,5),c(85,85)) # cerca
plotgrid(cx,cy,vc) # desenha malha
abline(h=2,lty=2,col="blue",lwd="3") # local do perfil avaliado

```

Figura 17: Desenha a malha de aterramento

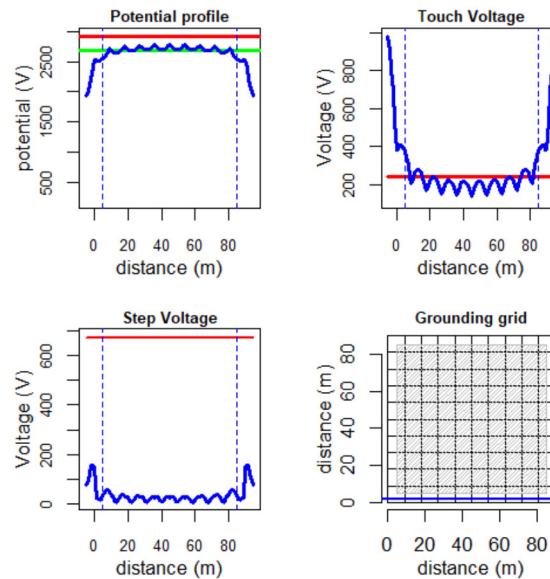


Figura 18: Resultados com espaçamento uniforme

Conforme ilustrado pelos gráficos na parte superior da Figura 18, a malha de aterramento não atende ao critério de segurança, pois a tensão de toque supera o máximo admissível. Contudo, conforme indicado no canto inferior esquerdo, o critério da tensão de passo é atendido.

Para reduzir as tensões de toque nas regiões próximas à cerca, pode-se adotar espaçamentos não uniformes entre os condutores [7], por exemplo, considerando-se os seguintes espaçamentos (m): 3, 7, 10, 12, 13, 13, 12, 10, 7, 3. Logo, em uma nova malha quadrada, os condutores devem ser posicionados nas seguintes abscissas (m) e ordenadas (m): 0, 3, 10, 20, 32, 45, 58, 70, 80, 87 e 90, conforme indicado no canto inferior direito da Figura 20, gerada pela função *plotprofile* na última linha da Figura 21.

O novo arranjo dos condutores reduziu a resistência e a tensão da malha para 0,2898 Ω e 2898 V, respectivamente. Adicionalmente, as tensões de toque e passo foram reduzidas ao longo de toda a extensão da borda da malha, conforme indicado na Figura 20.

Um projeto de malha de aterramento envolve a análise de perfis de potencial em várias direções [18], por exemplo, a análise dos perfis horizontais nas ordenadas 2, 4, 6, 22 e 38 (m), indicados na Figura 22, gerada pelo código na Figura 23. Para visualizar os perfis no conjunto de direções selecionadas, deve-se utilizar a função *plotmultiprofile*, conforme ilustrado na Figura 24, para produzir a Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27.

Conforme ilustrado na Figura 25, a distribuição não-uniforme dos condutores aproximou os perfis de potencial na borda e no centro da malha, i.e., reduziu o gradiente de potencial na malha [7]. As tensões de toque e de passo também atendem ao critério de segurança ao longo de toda a malha de aterramento, conforme ilustrado na Figura 26 e na Figura 27.


```

Ut=239.99; Up=674.39; Icc = 10000; H=1; r=0.0075; sigma =1/60
px=seq(-5,95,1) # abscissas do perfil de potencial (m)
py=rep(2,length(px)) # ordenadas do perfil de potencial (m)
out=plotprofile(cx,cy,H,r,sigma,Icc,Ut,Up,px,py,T,vc)
    
```

Figura 19: Calcula perfil na borda da malha

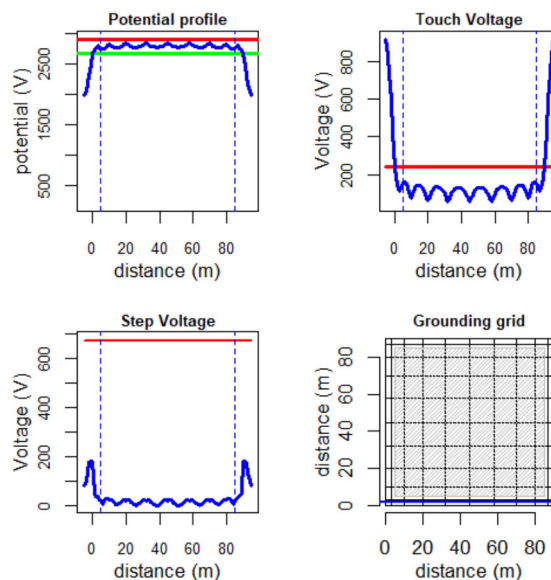


Figura 20: Resultados para a nova configuração

```

cx=c(0,3,10,20,32,45,58,70,80,87,90); cy=cx # malha quadrada
windows()
out=plotprofile(cx,cy,H,r,sigma,Icc,Ut,Up,px,py,T,vc)
    
```

Figura 21: Desenha a nova malha

Por fim, é importante avaliar o perfil de potencial na diagonal da malha, i.e., a direção com os maiores gradientes de potencial. Conforme ilustrado na Figura 28, gerada pelo comando na Figura 29, o perfil de potencial ao longo da diagonal atende aos critérios de segurança.

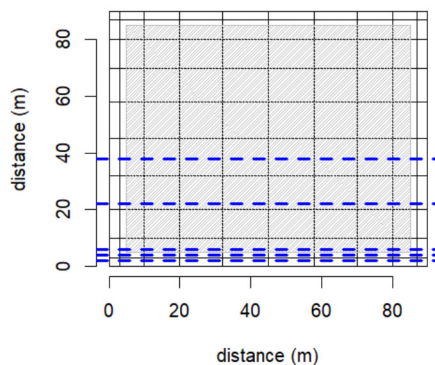


Figura 22: Malha com espaçamento não uniforme

```

windows()
plotgrid(cx,cy,vc) # desenha malha
ordenadas=c(2,4,6,22,38)
for (i in ordenadas) {
  abline(h=i,lty=2,col="blue",lwd="3")
}

```

Figura 23: Direções dos perfis

```

matperfil=c()
for (i in 1:length(ordenadas)){ # percorre perfis horizontais
  py=rep(ordenadas[i],length(px))
  out=plotprofile(cx,cy,H,r,sigma,Icc,Ut,Up,px,py,F,vc)
  matperfil=append(matperfil,out) # guarda resultados
}
windows() ; plotmultprofiles(matperfil,1) # potential profile
windows() ; plotmultprofiles(matperfil,2) # touch voltage
windows() ; plotmultprofiles(matperfil,3) # step voltage

```

Figura 24: Perfis ao longo de diferentes direções

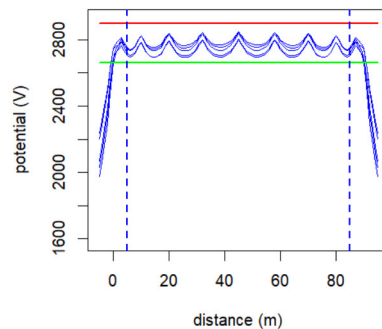


Figura 25: Perfis de potencial na nova configuração

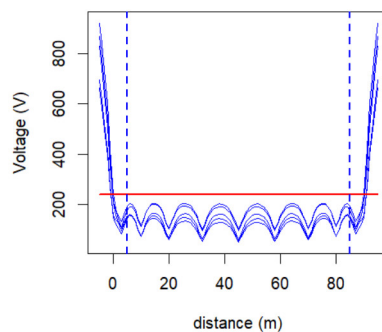


Figura 26: Tensões de toque na nova configuração

Adicionalmente, o código R na Figura 30 gera a Figura 31, na qual são apresentados os perfis de potencial, espaçados de 1 m, na região que cobre o pátio da SE até 3 m além da cerca, i.e., o intervalo [2, 88] ao longo de toda a malha.

Conforme ilustrado na Figura 31, o critério da tensão de toque é atendido em toda região no interior da SE e na vizinhança externa à mesma.

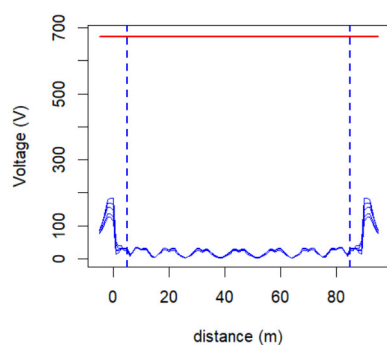


Figura 27: Tensões de passo na nova configuração

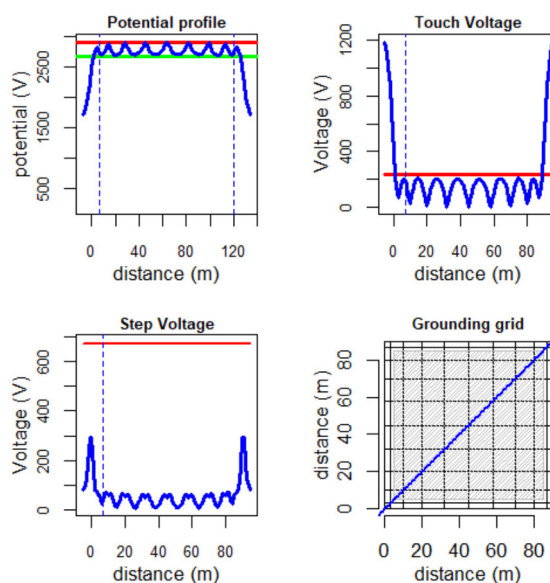


Figura 28: Resultados para a diagonal da malha

```
out=plotprofile(cx,cy,H,r,sigma,Icc,Ut,Up,px,px,T,vc)
```

Figura 29: Exibe o perfil na diagonal da malha

```
pxx=seq(2,88,1) # abscissas dos pontos avaliados (m)
matperfil=c()
for (i in 2:88){
  pyy=rep(i,length(pxx)) # ordenadas dos pontos avaliados (m)
  out=plotprofile(cx,cy,H,r,sigma,Icc,Ut,Up,pxx,pyy,F,vc)
  matperfil=append(matperfil,out)
}
windows()
plotmultiprofiles(matperfil,1)
```

Figura 30: Calcula perfis de potencial em toda a área da malha de aterramento

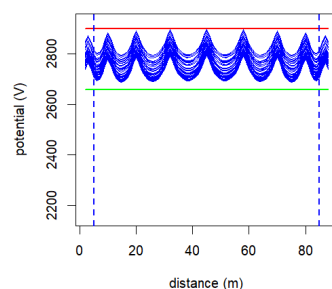


Figura 31: Perfis de potencial em toda a área da malha de aterramento

8 CONCLUSÕES

O pacote *groundingRid* assume algumas simplificações nos projetos de malha de aterramento, como malhas quadradas ou retangulares, solos homogêneos e condutores coplanares dispostos paralelamente ou ortogonalmente. Apesar das simplificações, o programa permite mostrar de forma clara o efeito da distribuição dos espaçamentos entre os condutores sobre a distribuição do potencial induzido no solo e como este efeito pode ser usado no projeto de malhas de aterramento. Espera-se que o programa seja útil no aprendizado sobre sistemas de aterramento e que os leitores interessados expandam o programa com a inclusão de novas características como, por exemplo, condutores oblíquos e hastes verticais.

REFERÊNCIAS

- [1] A. C. B. Alves. Contributions to the calculation of reduction factor of contact resistance of the foot in grounding projects. *IEEE Latin America Transactions*, 12(2):153–160, 2014.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 15751:2013 Sistemas de Aterramento de subestações – Requisitos. ABNT/CB-003 Eletricidade, 2013.
- [3] I. Colominas, J. París, D. Fernández, F. Navarrina e M. Casteleiro. A numerical simulation tool for multilayer grounding analysis integrated in an open-source CAD interface. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 45(1):353–361, 2013.
- [4] A. P. R. Coura, C. M. V. Tahan, J. A. Jardini, R. P. Casolari, J. G. M. Andrade e M. Lopes. Otimização de sistemas de aterramento em subestações 34,5 / 13,8 kV. In *Citenel*. Campinas - SP, Brasil, 2007.
- [5] O. E. Gouda, G. M. Amer, O. M. Salim e E. A. Elsayed. Techniques used for unequally spaced grounding grid design. *Journal of Multidisciplinary Research and Reviews*, 1(6):78–86, 2018.
- [6] R. J. Heppel. Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 98(6):1978–1989, 1979.
- [7] L. Huang, X. Chen e H. Yan. Study of unequally spaced grounding grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(2):716–722, 1995.
- [8] P. Kapijan, S. Potivejkul e P. Yutthagowith. Grounding system design of substation using Matlab program. In *International Electrical Engineering Congress*. Pattaya, Thailand, 2017.
- [9] M. Leoloian, R. Velazquez e D. Mukhedkar. Review of analytical methods for calculating the performance of large grounding electrodes, Part II: Numerical results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 104(11):3134–3141, 1985.
- [10] R. A. R. Moura, M. A. O. Schroeder, J. A. Jardini, S. J. S. Silva, E. G. Nepomuceno,

- P. H. N. Vieira e A. C. S. Lima. The usage of Julia programming in grounding grids simulations. In *XV International Symposium on Lightning Protection*. São Paulo - SP, Brasil, 2019.
- [11] R. P. Nagar, R. Velazquez, M. Loeloeian, D. Mukhedkar e Y. Gervais. Review of analytical methods for calculating the performance of large grounding electrodes, Part I: Theoretical considerations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 104(11):3123–3133, 1985.
- [12] J. F. M. Pessanha, V. A. Almeida, F. P. Menezes, M. H. T. Azevedo, M. P. Santos, M. R. Peixoto, F. Bou-Issa, E. L. Mendes e G. A. Gonçalves. Emprego de técnicas de aprendizagem de máquina na previsão de carga para o programa mensal da operação energética - PMO. In *XIV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Recife - PE, Brasil, 2018.
- [13] J. F. M. Pessanha, F. L. C. Oliveira e R. C. Souza. Teaching statistical methods in engineering courses through wind power data. *Revista de Ensino de Engenharia*, 34:85–92, 2015.
- [14] C. Portela. *Apostilas do Curso de Sobretensões e Coordenação de Isolamento*, volume I, II, III e IV. COPPE-UFRJ, 1977.
- [15] C. Portela. Aspectos básicos das condições de segurança de pessoas em relação com descargas atmosféricas em subestações e linhas de transmissão. Exemplos de aplicação. In *VIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. São Paulo - SP, Brasil, 1986.
- [16] C. Portela. Determinação das resistências de contato com o solo levando em conta camadas de brita ou revestimento. In *IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Belo Horizonte - MG, Brasil, 1987.
- [17] R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019. Disponível em <<https://www.R-project.org/>>. Acessado em dezembro de 2020.
- [18] N. Santiago, S. Varricchio, A. Costa e C. Campos. Estudo do sistema de aterramento da subestação rio claro iii. Relatório técnico,, Fluxo Engenharia S.A., 1989. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/328542407_Estudo_do_Sistema_de_Aterramento_da_Subestacao_de_Rio_Claro_III>. Acessado em dezembro de 2020.
- [19] F. B. Silva, R. R. A. Coelho e R. S. T. Pontes. Groundmesh: a freeware toolbox for grounding system design. In *International Conference on Grounding and Earthing*. Manaus - AM, Brasil, 2014.
- [20] R. P. Sodré, B. L. Pereira, L. L. Sidrim, J. F. S. Almeida e C. L. S. S. Sobrinho. Optimization of grounding grids design for square-shape mesh. *IEEE Latin America Transactions*, 16(1):135–139, 2018.
- [21] K. A. Vyas e J. G. Jamnani. Development of IEEE complaint software ‘economical substation grounding system designer’ using Matlab GUI development environment. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 4(2):335–346, 2012. ISSN 2087-5886.