

Marcella Campos Guarilha de Moraes

# **Algoritmo para cálculo de sistemas de aterramento de subestações**

*Mestrado em Energias Renováveis e Eficiência Energética*

Orientadores:

Luís Manuel Frólén Ribeiro

Paulo Victor de Souza Borges

Bragança

2021

Marcella Campos Guarilha de Moraes

# **Algoritmo para cálculo de sistemas de aterramento de subestações**

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla Diplomação entre o Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca e o Instituto Politécnico de Bragança, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética.

Orientador: Luís Manuel Frólén Ribeiro  
Orientador: Paulo Victor de Souza Borges

Bragança

2021

# Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus por todas as bênçãos que Ele derramou sobre minha vida, por sempre me proteger e iluminar a minha trajetória. Tudo graças a Ele.

Todo amor e carinho aos meus pais, Cristiane e Marcelo, meus guerreiros e heróis, que nunca mediram forças para cuidar de mim e sempre me apoiaram em todos os meus objetivos.

Agradeço aos meus irmãos Amanda e Matheus por acreditarem em mim e sempre estarem ao meu lado. À toda minha família pelas mensagens de carinho e apoio durante a minha jornada, e um agradecimento especial a minha tia Rosely, minha segunda mãe, que sempre me acolheu com muito amor.

Ao Matheus Costa, meu melhor amigo e companheiro de vida, por sempre me lembrar que sou capaz, pela paciência e atenção em todos os momentos.

A todos os meus amigos que foram essenciais durante este processo. À equipe de cheelearding Wolfteam. Aos meus amigos de Bragança, por fazerem eu me sentir em casa mesmo estando em outro país. Um agradecimento especial aos meus dois amigos e irmãos Sandy e Carlos Antônio pelo cuidado e amor, o que temos é forte e abençoado por Deus.

Agradeço aos meus companheiros de trabalho da Ghenova por todo aprendizado e confiança.

A todos os meus professores, em especial ao Luís Fabián Mederos e ao Alan Ferreira por sempre acreditarem e apoiarem seus alunos. Agradeço aos orientadores deste projecto, Luís Manuel Frólén Ribeiro e Paulo Victor de Souza Borges pela paciência, atenção e por todo o ensinamento.

# Resumo

Foi desenvolvido um algoritmo para o cálculo do sistema de aterramento de subestações considerando o modelo IEEE simplificado e fórmulas de correção para solos heterogêneos estratificados até duas camadas. O programa foi criado como aplicativo e consiste na verificação da rede de aterramento para a segurança de pessoas e equipamentos elétricos instalados na subestação.

O sistema de aterramento é responsável por dissipar correntes elétricas geradas por curto-circuitos em equipamentos ou descargas atmosféricas. Seus principais elementos são cabos condutores, soldas ou conectores à compressão, e eléctrodos verticais de aterramento quando necessários.

Para que o aplicativo efetue todos os cálculos é necessário que o utilizador tenha conhecimento de parâmetros sobre: o tipo do solo; o condutor que será implementado; a geometria da malha; e o estudo de curto-circuito. Além de mostrar se rede de aterramento encontra-se dentro dos limites de segurança, o aplicativo também auxilia na otimização do projecto através do comprimento mínimo de condutores ao longo da malha.

Foram simuladas redes de aterramento quadradas com eléctrodos verticais em sua periferia instaladas em solos considerados homogêneos e heterogêneos de duas camadas. O aplicativo também é capaz de verificar redes de terra retangulares.

O algoritmo foi desenvolvido através da interface *App Designer* disponível no programa *MatLab*. Ele é executado como um aplicativo e não é necessário que o utilizador tenha o *MatLab* instalado em seu computador.

# Abstract

An algorithm was developed for the calculation of the substation earthing system considering the simplified IEEE model and correction formulas for heterogeneous soils stratified up to two layers. The program was created as an application and consists of checking the grounding network for the safety of people and electrical equipment installed in the substation.

The grounding system is responsible for dissipating electrical currents generated by short circuits in equipment or lightning discharges. Its main elements are conductive cables, welds or compression connectors, and vertical grounding electrodes when necessary.

For the application to perform all calculations, it is necessary that the user has knowledge of parameters on: the type of soil, the conductor to be implemented, the geometry of the earth grid; and the study of short circuit. In addition to showing if the grounding network is within the safety limits, the application also helps to optimize the project through the minimum length of conductors along the grid.

Square grounding networks were simulated with vertical electrodes on their periphery installed in soils considered homogeneous and heterogeneous in two layers. The application is also capable of checking rectangular ground networks.

The algorithm was developed through the App Designer interface available in the MatLab program. It runs as an application and it is not necessary for the user to have MatLab installed on their computer.

# Conteúdo

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Enquadramento .....	1
1.3 Organização da tese .....	2
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	3
2.1 Estado da arte .....	3
2.2 Resistividade do solo .....	5
2.3 Condutores de aterramento .....	7
2.4 Fibrilação ventricular do coração humano através do choque elétrico.....	9
2.5 Potenciais máximos admissíveis.....	10
2.6 Corrente da malha .....	13
2.7 Sistema de aterramento para solos heterogêneos.....	15
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
3.1 Análise dos parâmetros de rede de aterramento .....	25
3.2 Desenvolvimento do aplicativo utilizando a plataforma <i>App Designer</i> .....	26
3.2.1 Etapa 1: Cálculo da secção dos condutores de aterramento .....	27
3.2.2 Etapa 2: Cálculo dos potenciais máximos admissíveis .....	29
3.2.3 Etapa 3: Cálculo da resistência de aterramento da rede .....	30
3.2.4 Etapa 4: Cálculo do GPR.....	31
3.2.5 Etapa 5: Cálculo dos potenciais máximos da rede e da cerca .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	35
4.1 Interface do aplicativo .....	35
4.1.1 Parâmetros de entrada.....	35
4.2 Validação do aplicativo .....	40
4.3 Condições finais do aplicativo .....	44

<b>5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>45</b>
5.1 Conclusões .....	45
5.2 Trabalhos futuros .....	46
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>47</b>

# Lista de Figuras

Figura 1 – Escoamento da corrente de falta num solo estratificado em duas camadas.(a) Com resistividade da segunda camada nula. (b) Com resistividade da segunda camada maior que a da primeira. (c) Com resistividade da segunda camada menor que a da primeira. (d) Com resistividade da segunda camada tendendo ao infinito [18].	5
Figura 2 – Solo estratificado em "n" camadas. (a) Sistema real. (b) Sistema aproximado.	6
Figura 3 – Acessórios para a rede de aterramento. (a) Condutor. (b) Conexão aparafusada. (c) Solda exotérmica tipo "T". (d) Solda exotérmica tipo "X". (e) Cadinho de solda [17].	8
Figura 4 – Corrente elétrica para o dimensionamento do condutor de aterramento [18].	9
Figura 5 – Potencial de toque [18].	11
Figura 6 – Potencial de passo [18].	12
Figura 7 – Correntes da malha e as que fluem pelo circuito formado pelos cabos para-raios e torres da linha de transmissão [26].	14
Figura 8 – Corrente de defeito dissipada na periferia da malha de aterramento [18].	17
Figura 9 – Corrente de defeito dissipada na periferia da malha e nos elétrodos verticais de aterramento [18].	20
Figura 10 – Distância “ m” para o cálculo do potencial de toque na cerca metálica [17 adaptada].	23
Figura 11 – Tensão transferida ou GPR. Elevação de potencial total da malha referida ao infinito [27].	23
Figura 12 – Exemplo de sistema de aterramento de uma subestação com 0,80 m de profundidade. (a) Malha de aterramento. (b) Rede de aterramento com elétrodos verticais em sua periferia.	26
Figura 13 – Algoritmo de cálculo para o desenvolvimento do aplicativo.	26
Figura 14 – Algoritmo para o cálculo da secção dos condutores da malha de aterramento.	28
Figura 15 – Algoritmo para o cálculo da secção dos condutores dos equipamentos.	28
Figura 16 – Algoritmo para o cálculo dos potenciais admissíveis.	30
Figura 17 – Algoritmo para o cálculo da resistência da rede de aterramento.	31
Figura 18 – Algoritmo para o cálculo do GPR.	32

Figura 19 – Algoritmo para o cálculo dos potenciais máximos da rede e da cerca.....	34
Figura 20 – Interface do aplicativo SASEE: Sistema de Aterramento de Subestações Elétricas. ....	35
Figura 21 – Rede de aterramento com elétrodos verticais na periferia. Comprimentos em metros. ....	36
Figura 22 – Menu características do solo. ....	37
Figura 23 – Menu características do solo com camada protetora na superfície. ....	37
Figura 24 – Menu secções dos condutores de aterramento com secções definidas. ....	37
Figura 25 – Menu secções dos condutores de aterramento sem secções definidas. ....	38
Figura 26 – Menu características da rede de aterramento. ....	38
Figura 27 – Menu características de curto-circuito. ....	39
Figura 28 – Resultados dos cálculos da rede de aterramento projectada. ....	39
Figura 29 – Configuração atualizada da rede de aterramento com mais condutores horizontais e elétrodos verticais. Comprimentos em metros. ....	40
Figura 30 – Resultados do ajuste da rede de aterramento. ....	40
Figura 31 – Configuração da rede de terra do cenário 1. Comprimentos em metros [9 adaptada]. ....	41
Figura 32 – Configuração da rede de terra do cenário 3. Comprimentos em metros [6 adaptada]. ....	43

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Parâmetros de entrada do exemplo ilustrativo.....	36
Tabela 2 – Parâmetros de entrada dos 3 cenários.....	41
Tabela 3 – Cenário 1: Resultados de resistência da rede de aterramento para solo homogêneo. ....	42
Tabela 4 – Cenário 1: Resultados de resistência da rede de aterramento para solo heterogêneo.....	42
Tabela 5 – Cenário 3: Resultados gerais. ....	43

# Lista de Símbolos

## Caracteres Gregos

$\rho_1$	Resistividade da primeira camada do solo	$\Omega.m$
$\rho_2$	Resistividade da segunda camada do solo	$\Omega.m$
$\rho_S$	Resistividade da camada protetora	$\Omega.m$
$\theta_a$	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
$\theta_m$	Temperatura máxima permissível	$^{\circ}C$

## Caracteres Latinos

$A$	Área ocupada pelo sistema de aterramento	$m^2$
$A_0$	Correção da área da malha de terra considerada 1 $m^2$	$m^2$
$C_B$	Fator de correção da camada superficial	-
$C_m$	Fator de correção de não uniformidade do solo	-
$C_r$	Fator de correção de não uniformidade do solo	-
$C_s$	Fator de correção de não uniformidade do solo	-
$D$	Espaçamento entre condutores da rede de terra	$m$
$D_f$	Fator de decremento para a duração da falta	-
$D_m$	Máxima distância entre dois pontos da malha de terra	$m$
$d$	Diâmetro do condutor horizontal da malha de aterramento	$m$
$E_{cerca, heterogêneo}$	Potencial de toque máximo da cerca que envolve a subestação	$V$
$E_{m, heterogêneo}$	Potencial de toque máximo da rede de terra para solos heterogêneos	$V$
$E_{passo}$	Potencial de passo máximo admissível	$V$
$E_{s, heterogêneo}$	Potencial de passo máximo da rede de terra para solos heterogêneos	$V$
$E_{toque}$	Potencial de toque máximo admissível	$V$
$f$	Frequência do sistema	$Hz$
$GPR$	Elevação do potencial total da rede de terra referida ao infinito	$V$
$H$	Profundidade da primeira camada do solo	$m$
$H_0$	Correção da profundidade da primeira camada do solo considerada 1 $m$	$m$

$h$	Profundidade da malha de aterramento	m
$h_0$	Profundidade de referência da malha considerada 1 m	m
$h_s$	Espessura da camada protetora	m
$I$	Corrente de defeito que flui pelo condutor	A
$I_B$	Corrente elétrica limite para a não ocorrência de fibrilação	A
$I_{curto\text{máx}}$	Corrente máxima de curto-circuito	A
$I_m$	Corrente que flui pela malha de terra	A
$K_c$	Coefficiente que relaciona os elementos da rede de terra com a posição do indivíduo que toca a cerca	-
$K_h$	Fator de correção da profundidade da malha de terra	-
$K_i$	Fator geométrico	-
$K_{ii}$	Fator de ponderação corretiva	-
$K_m$	Fator de espaçamento	-
$K_s$	Coefficiente que relaciona os elementos da rede de terra que induzem potenciais na superfície do solo	-
$L_C$	Comprimento total de condutores horizontais da malha de terra	m
$L_M$	Comprimento efetivo de condutores da rede de terra	m
$L_{\text{mín}}$	Comprimento mínimo estimado de condutores da rede de terra	m
$L_p$	Perímetro da malha de terra	m
$L_R$	Comprimento total de elétrodos verticais da rede de terra	m
$L_r$	Comprimento de um elétrodo vertical	m
$L_s$	Comprimento efetivo de condutores para sistemas de aterramento com ou sem elétrodos verticais	m
$L_x$	Comprimento máximo da malha de terra em x	m
$L_y$	Comprimento máximo da malha de terra em y	m
$m$	Distância da periferia da malha de terra ao ponto considerado	m
$N$	Número de elétrodos verticais da rede de terra	-
$n$	Fator geométrico da malha quadrada	-
$R_B$	Resistência elétrica do corpo humano	$\Omega$
$R_f$	Resistência de contacto	$\Omega$

$R_g$	Resistência de aterramento	$\Omega$
$R_u$	Resistência dos elétrodos verticais em conjunto com os condutores horizontais da malha de terra	$\Omega$
$S_{cobre}$	Secção do condutor de cobre	mm <sup>2</sup>
$S_f$	Fator de distribuição da corrente de defeito	-
$T_A$	Tempo de deslocamento da corrente contínua	s
$t_{defeito}$	Duração do defeito	s
$\frac{X}{R}$	Razão no local da falta de acordo com a malha de terra	-
$x$	Constante	-
$y$	Constante	-
$z$	Constante	-

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste estudo foi desenvolver um algoritmo na interface *App Designer* do programa *MatLab* capaz de calcular os principais parâmetros para a análise e o dimensionamento de sistemas de aterramento de subestações elétricas instaladas em solos homogêneos e heterogêneos estratificados até duas camadas.

O algoritmo fornece um conjunto de resultados da rede de terra projectada pelo utilizador. Tais resultados possibilitam a garantia da segurança pessoal e da proteção de equipamentos, e a otimização do sistema de aterramento da subestação.

## 1.2 Enquadramento

A resistividade do solo possui diferentes valores, que dependem do tipo do solo, do teor de humidade, da temperatura e de sua composição química. Os solos que apresentam resistividades mais baixas são os que contêm resíduos vegetais, os pantanosos e os situados no fundo de vales e nas margens de rios. Os de maiores resistividades são os arenosos, os rochosos e os situados em locais altos e desprovidos de vegetação [1]. Subestações elétricas podem ser construídas em diversos locais, com diferentes valores de resistividade do solo. No caso de solos com resistividades elevadas, as dificuldades de projectar sistemas de aterramento são maiores. É fundamental um projecto íntegro de rede de aterramento para que a subestação elétrica opere corretamente com um sistema de proteção seguro de alto desempenho, garantindo a proteção da vida humana e de seus equipamentos. O aterramento é composto por uma rede de cabos condutores nus e eléctrodos verticais, podendo ter diversas geometrias.

A resistência de aterramento da malha de terra deve ser suficientemente baixa para atender os padrões de segurança elétrica, o que é especialmente difícil de alcançar em ambientes problemáticos [2], [3], [4]. Ela deve ser estimada numa fase inicial do projecto para garantir que um sistema de aterramento seja dimensionado corretamente [5], ou seja, o processo é iterativo, deve-se arquitetar uma malha típica e verificar se os potenciais na superfície do solo, considerando o pior defeito, são inferiores aos valores máximos suportáveis por um ser humano de 50 ou 70 kg, conforme definido pela norma ANSI/IEEE Std. 80 [6]. Este dimensionamento é realizado por uma série de cálculos envolvendo características como a resistividade do solo, a corrente de curto-circuito, a duração do curto, entre outras. Há programas no mercado capazes de realizar tais cálculos,

como o TecAt, o ETAP, o CEDEGS e o SEGround, porém, são caros e de difícil manuseio.

Existem estudos sobre malha de aterramento [7], [8] baseados nos cálculos de Wenner e nos métodos de estratificação de solos de duas camadas. Porém, tais estudos não apresentam alguns resultados interessantes como o potencial máximo de toque na cerca metálica que envolve a subestação e a quantidade mínima de condutores que compõem a malha de terra, auxiliando na otimização do projecto.

### **1.3 Organização da tese**

Esta dissertação será composta por 5 capítulos: O primeiro capítulo apresenta o enquadramento do tema e os principais objetivos deste estudo; o segundo capítulo contém o estado da arte, onde são apresentados estudos de sistemas de aterramento de subestações elétricas, e a fundamentação teórica, composta pelos métodos e fórmulas utilizadas no desenvolvimento do aplicativo; o terceiro capítulo mostra a metodologia empregada na interface *App Designer* para a construção do aplicativo e os principais parâmetros de avaliação da rede de terra; o quarto capítulo apresenta os resultados simulados e as condições finais do algoritmo; o quinto capítulo contém a conclusão deste estudo e as propostas de trabalhos futuros.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste Capítulo serão abordadas as principais formulações do modelo IEEE simplificado [6] para o cálculo de sistema de aterramento em subestações elétricas.

Serão apresentadas as equações de potenciais de toque e passo da malha de terra baseadas em [9], [10] para o cálculo de aterramento em terrenos cuja resistividade do solo varia de acordo com a profundidade da camada estratificada, ou seja, terrenos heterogêneos.

### **2.1 Estado da arte**

Serão indicados estudos recentes sobre sistema de aterramento de subestações elétricas considerando solos de até duas camadas e limites de segurança estipulados pela norma regulamentadora IEEE Std. 80 [6].

Um algoritmo para a análise e o dimensionamento de sistema de aterramento desenvolvido na interface GUI do programa MATLAB é apresentado em [11]. O algoritmo proposto é capaz de calcular diversos parâmetros de desempenho do sistema de aterramento para dados de entrada relacionados à geometria da rede e às características do solo. O método efetua dois tipos de análise: de desempenho simples, tomando os dados de entrada relacionados à geometria da rede de aterramento e às características do solo; e do projecto ideal para cinco formas de rede (quadrada, retangular, triangular, formato T e formato L) assim como para solos de até duas camadas. A partir de tais análises, o algoritmo apresenta a geometria mais adequada, segura e econômica da rede de aterramento.

Em [12] são analisados dois principais fatores: segurança das pessoas e custo dos materiais do projecto para a otimização do sistema de aterramento. O método de otimização do projecto usa duas técnicas de inteligência artificial e é realizado em duas etapas: primeiramente, utiliza-se o algoritmo genético (AG) para pesquisa global; e em seguida, utiliza-se a pesquisa de padrão para uma busca mais precisa, chegando ao resultado final otimizado. O algoritmo desenvolvido é capaz de apresentar as dimensões ideais da rede de aterramento e de efetuar cálculos para solos de até duas camadas, gerando resultados de potenciais e resistência da rede. Porém, ele apenas admite cálculos para malhas quadradas de subestações elétricas.

O algoritmo genético também é utilizado em [13] para minimizar os custos do projecto de um sistema de aterramento. O estudo é baseado em uma rede de terra de dimensões 100 x 100 m em solo homogêneo. A profundidade de instalação da malha e o

comprimento das hastes foram comparados entre projectos com a finalidade de manter sempre o menor custo. Os autores simulam apenas malhas quadradas, mas projectos de aterramento com outras geometrias podem seguir a mesma solução de otimização.

Em [14] é apresentada uma estratégia evolutiva com a finalidade de se obter um projecto ideal de sistema de aterramento. Essa técnica é utilizada em solos de até duas camadas e baseada na comparação entre fatores de qualidade e geometria da rede de terra em questão com os demais fatores obtidos nas geometrias mais modernas. Obtem-se potenciais dentro do limite de segurança a um custo mais baixo, quando o sistema de aterramento é otimizado. A implementação de condutores verticais diminui os potenciais da rede, porém, o estudo mostra que algumas vezes essa redução não é significativa comparada ao custo que tais condutores terão no projecto.

Uma função de custo foi proposta em [15] com base em fatores eficazes que afetam diretamente e indiretamente o desempenho da rede de terra. Tais fatores incluem o comprimento de condutores horizontais e verticais, a área em que esses condutores serão instalados e a profundidade da rede de terra. O estudo foi realizado no projecto de uma subestação 220/22 kV localizada no Egito com o objetivo de se obter os menores custos para a sua construção. São apresentados dois métodos de pesquisa para avaliar a geometria da rede de aterramento: o método tradicional, que visa apenas o custo do material descartando o impacto dos parâmetros sobre o desempenho da rede; e o método proposto, que fornece uma solução baseada no resultado de cada parâmetro considerando todos os seus materiais. Os resultados obtidos provam que ambos os métodos fornecem soluções plausíveis, porém, o proposto oferece melhor e mais opções realistas de geometria da malha.

Em [16] aborda-se a otimização de um projecto de rede de aterramento através de técnicas de inteligência artificial. O principal objetivo é analisar o custo do projecto de uma rede de terra considerando o valor dos materiais que serão instalados. As técnicas de inteligência artificial Otimização por Enxame de Partículas (OEP) e Algoritmo Genético são utilizadas separadamente para melhorar o projecto. O estudo prova que, estatisticamente, ambos atingem a solução ideal, porém, o OEP é mais rápido. Os resultados confirmam aquilo que já se sabia: quando o limite de potencial do solo é baixo, as dimensões da malha têm que ser maiores para diminuir a resistência de aterramento, e assim, o custo do projecto é aumentado.

## 2.2 Resistividade do solo

É importante ter conhecimento prévio sobre as características do solo, principalmente no que diz respeito à homogeneidade de sua constituição, para o projecto de um sistema de aterramento [17]. Há vários fatores capazes de influenciar a resistividade do solo: tipo, humidade, temperatura, composição química dos sais dissolvidos na água retida e a estratificação do solo.

A maioria dos solos não é homogênea, possuindo diversas camadas e profundidades diferentes [18]. Como cada camada possui resistividade diferente, a dispersão da corrente elétrica no solo também será diferente em cada uma delas. A Figura 1 mostra o comportamento da corrente em solos estratificados em duas camadas, onde as linhas pontilhadas são as superfícies equipotenciais e as cheias são as correntes elétricas fluindo no solo.

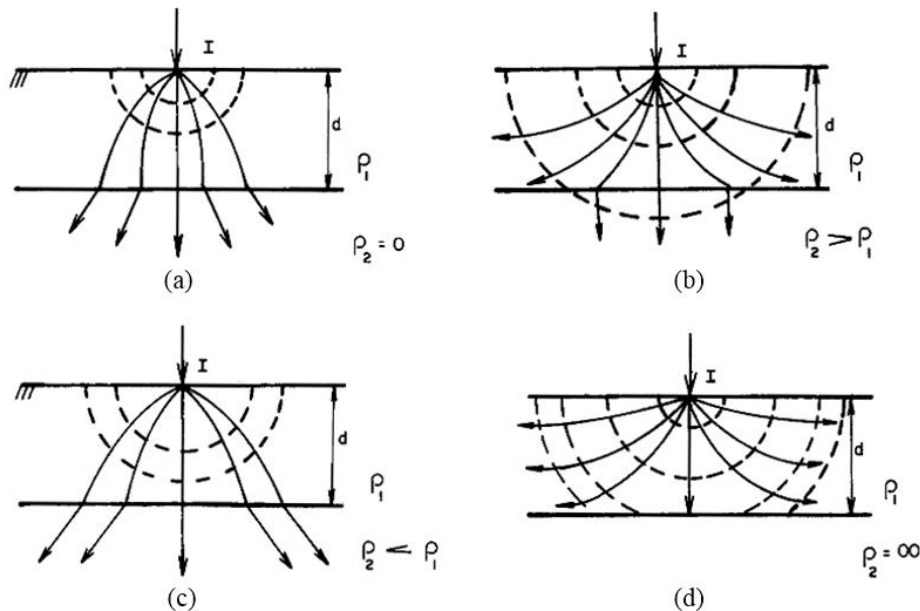


Figura 1 – Escoamento da corrente de falta num solo estratificado em duas camadas. (a) Com resistividade da segunda camada nula. (b) Com resistividade da segunda camada maior que a da primeira. (c) Com resistividade da segunda camada menor que a da primeira. (d) Com resistividade da segunda camada tendendo ao infinito [18].

A maior parte da parcela de corrente flui na camada onde a resistividade do solo é menor. É satisfatório para o sistema de aterramento quando a resistividade da primeira camada é maior que a da segunda, uma vez que uma parcela maior da corrente de falta irá se dissipar mais longe da superfície, ou seja, longe de qualquer indivíduo que possa estar na subestação elétrica.

Há métodos de medição de resistividade de solo confiáveis e precisos, capazes de entregar valores característicos de resistividade em “n” camadas [18]. Os modelos mais utilizados são os de Wenner e de Schlumberger-Palmer.

O sistema real do solo possui características que variam de acordo com a distância horizontal do terreno. As discrepâncias verticais do sistema são insignificantes, uma vez que tendem a manter uma variação constante. A Figura 2 (a) apresenta um sistema real de solo estratificado em “n” camadas.

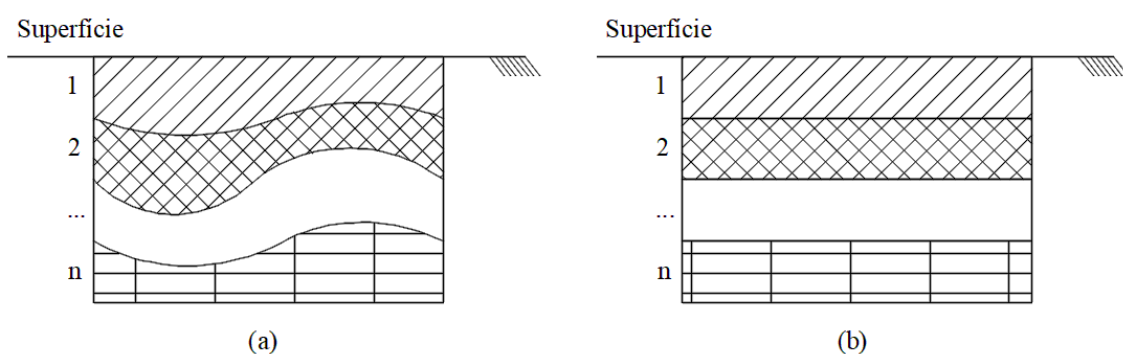


Figura 2 – Solo estratificado em “n” camadas. (a) Sistema real. (b) Sistema aproximado.

Considerando as características que normalmente apresentam os solos em virtude da sua própria formação geológica ao longo dos anos, a modelação em camadas horizontais estratificadas tem produzido excelentes resultados comprovados na prática [18]. Os métodos de estratificação do solo mais utilizados são o Método de Estratificação de Duas Camadas, o Método de Pirson e o Método Gráfico, que usam curvas e técnicas de otimização.

Tais modelos não serão aprofundados neste trabalho, uma vez que nosso foco é a análise e a avaliação de rede de aterramento a partir da estratificação do solo até duas camadas, porém em [18], [19], [20], [21] encontram-se o detalhamento de alguns métodos.

O tamanho do sistema de aterramento corresponde à profundidade de penetração das correntes escoadas. Essa penetração determina as camadas do solo envolvidas com o aterramento e, conseqüentemente, a sua resistividade aparente, que é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerando a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas [18].

De acordo com [22], quando o solo possui uma variação de resistividade moderada entre suas camadas, da ordem de 30 %, ele é considerado homogêneo, caso contrário, é

considerado um solo heterogêneo. É possível obter a resistividade aparente apenas em solos homogêneos.

### 2.3 Condutores de aterramento

O condutor da malha de terra é dimensionado considerando os esforços mecânicos e térmicos que ele pode suportar. Utiliza-se condutor de cobre de, no mínimo, 50 mm<sup>2</sup> capaz de suportar esforços mecânicos da movimentação do solo e dos veículos que transportam os equipamentos. Para o dimensionamento térmico é usada a Fórmula de Onderdonk, equação (1), válida somente para cabos de cobre. Ela considera o calor produzido pela corrente de curto-circuito totalmente restrito ao condutor [18].

$$I = 226,53 \cdot S_{cobre} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_{defeito}} \ln \left( \frac{\theta_m - \theta_a}{234 + \theta_a} + 1 \right)} \quad (1)$$

$$I = 0,60 \cdot I_{curto_{máx}} \quad (2)$$

Onde

$I$  é a corrente de defeito através do condutor [A];

$S_{cobre}$  é a secção do condutor de cobre [mm<sup>2</sup>];

$t_{defeito}$  é o tempo máximo de duração do choque, que pode variar entre 0,03 e 3 s [s].

$\theta_m$  é a temperatura máxima permissível [°C];

$\theta_a$  é a temperatura ambiente [°C];

$I_{curto_{máx}}$  é a corrente máxima de curto-circuito [A].

Para condutores de cobre, o  $\theta_m$  é limitado pelo tipo de conexão adotado. As conexões podem ser do tipo:

- Conexão cavilhada com juntas de bronze, conexão tradicional por aperto (pressão), cuja temperatura máxima é de  $\theta_m = 250$  °C;
- Solda convencional feita com elétrodo revestido, cuja fusão se dá através do arco elétrico produzido pela máquina de solda. Sua temperatura máxima é de  $\theta_m = 450$  °C;
- Brasagem com liga foscooper, uma união feita usando maçarico (Oxi-Acetileno), cuja temperatura máxima é de  $\theta_m = 550$  °C. Foscooper é uma liga de cobre e

fósforo, onde a união é feita por brasagem, popularmente conhecida como heterógena;

- Solda exotérmica, conhecida também como aluminotermia, cuja conexão é feita pela fusão obtida com a ignição e a combustão dos ingredientes no cadinho (mais utilizada em aterramento de parque eólico e subestações). Sua temperatura máxima é de  $\theta_m = 850 \text{ }^\circ\text{C}$ .

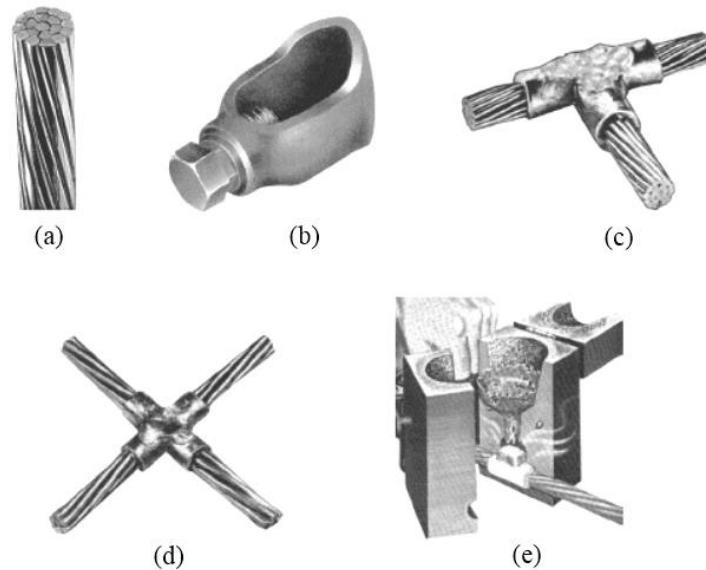


Figura 3 – Acessórios para a rede de aterramento. (a) Condutor. (b) Conexão aparafusada. (c) Solda exotérmica tipo "T". (d) Solda exotérmica tipo "X". (e) Cadinho de solda [17].

A Figura 3 apresenta alguns dos materiais utilizados para a construção do sistema de aterramento de uma subestação elétrica.

Para dimensionar o condutor de aterramento deve-se considerar o circuito compreendido por condutores de fase, neutro e terra, mutuamente acoplados. As fases contribuem para a corrente de falta; o neutro (dependendo do esquema do aterramento adotado) e o eletrodo de aterramento são caminhos de escoamento dessa corrente (ou fração dela) para o solo [23].

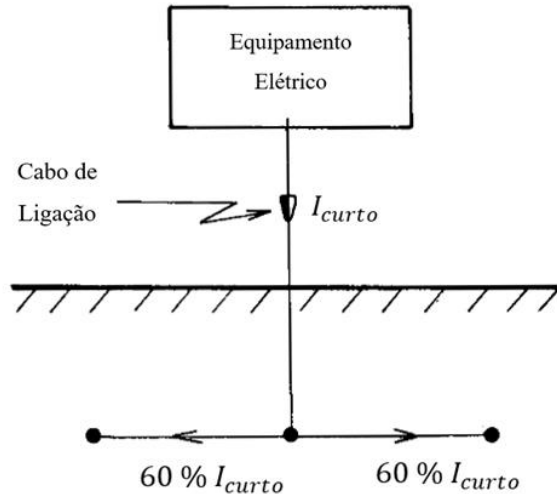


Figura 4 – Corrente elétrica para o dimensionamento do condutor de aterramento [18].

Antigamente, eram construídas malhas diferentes para o aterramento de para-raios e equipamentos de baixa e média tensões. Entretanto, verificou-se que interligando tais malhas à malha principal da subestação obtinha-se um aterramento de maior eficiência e segurança. O sistema de aterramento produz maior segurança quando construído sob o local onde foram instalados os equipamentos que serão conectados a ele, pois esse procedimento equipotencializa a área em questão [17].

De acordo com a Figura 4, a corrente de defeito para o cálculo da seção do cabo de ligação dos equipamentos elétricos à malha de aterramento da subestação, a ser empregada na equação (1), é a corrente total máxima de curto-circuito fase-terra.

$$I = I_{curto_{máx}} \quad (3)$$

Além dos condutores e de suas conexões, os elétrodos verticais são elementos extremamente importantes para o sistema de aterramento. Eles podem ser constituídos de aço galvanizado ou cobreado [17].

#### 2.4 Fibrilação ventricular do coração humano através do choque elétrico

O acidente mais comum a que estão submetidas as pessoas, principalmente as que trabalham em processos industriais ou desempenhando tarefas de manutenção e operação de sistemas industriais, é o contato acidental em partes metálicas energizadas, ficando o corpo ligado eletricamente sob tensão fase-terra [17].

O principal objetivo do sistema de aterramento é ser capaz de produzir, no momento do curto-circuito máximo com a terra, uma distribuição de corrente elétrica no perfil dos potenciais de passo e toque abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração. Os defeitos no sistema elétrico, que geram correntes de sequência zero, terão suas correntes passando pelo aterramento. A área do aterramento é a região de concentração das correntes de defeitos, portanto os potenciais são elevados e cuidados especiais devem ser observados [18].

A tensão de toque é a diferença entre a ponta de uma estrutura metálica, situada ao alcance da mão do indivíduo, e um ponto no chão, situado a 1 m da base da estrutura. Já a tensão de passo é a diferença de potencial existente entre os dois pés do indivíduo. Para o choque elétrico devido a essas tensões do sistema de aterramento durante o defeito na rede elétrica, a manifestação mais significativa é a fibrilação ventricular do coração [18].

Com base nos estudos de Dalziel [24], pode-se afirmar que 99,5 % das pessoas com o peso igual ou superior a 50 kg suportariam, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente elétrica expressa pela equação (4) [6].

$$I_{B,50} = \frac{0,116}{\sqrt{t_{defeito}}} \quad (4)$$

Onde

$I_B$  é a corrente elétrica limite para a não ocorrência de fibrilação [A].

A corrente elétrica de fibrilação é considerada uma função dependente do peso corporal do indivíduo. Estudos adicionais de Dalziel [25] levam um valor alternativo, quando se trata de indivíduos com peso igual ou maior que 70 kg.

$$I_{B,70} = \frac{0,157}{\sqrt{t_{defeito}}} \quad (5)$$

## 2.5 Potenciais máximos admissíveis

O corpo humano pode ser aproximado por uma resistência elétrica para frequências de 50 e 60 Hz. A resistência do corpo humano pode ser diminuída por danos ou perfuração da pele no ponto de contato direto [6].

A norma IEEE Std. 80 [6] assume que as resistências de contato da mão e do pé são nulas, assim como as das luvas e dos sapatos. Também é considerado um valor de

resistência elétrica do corpo humano das mãos aos pés e também de mão a mão ou pé a pé igual a  $1000 \Omega$ .

É possível determinar potenciais toleráveis entre quaisquer dois pontos de contato usando valores de corrente elétrica e de resistência estabelecidos por Dalziel [6]. O potencial máximo originado por um sistema de aterramento durante o período de falta não pode gerar uma corrente elétrica maior que a determinada por Dalziel [18].

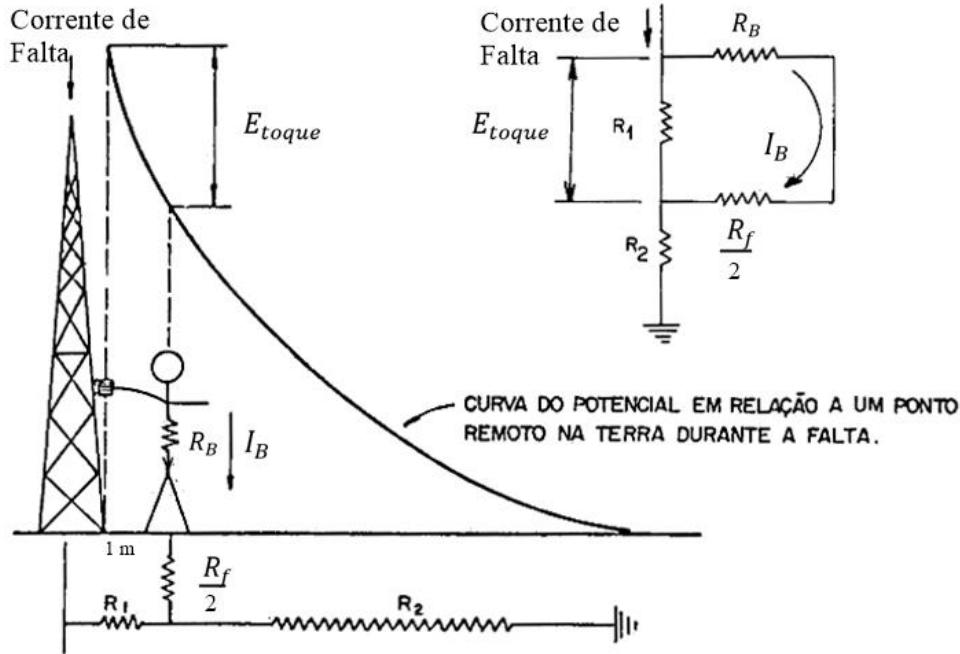


Figura 5 – Potencial de toque [18].

Pode-se determinar a equação do potencial de toque máximo admissível aplicando o Teorema de Thévenin no circuito equivalente da Figura 5.

$$E_{toque} = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \cdot \rho_1 \right) \cdot I_B \quad (6)$$

Onde

$E_{toque}$  é o potencial de toque máximo admissível [V];

$R_B$  é a resistência elétrica do corpo humano considerada pela norma IEEE Std. 80 [6] igual a  $1000 \Omega$ ;

$R_f$  é a resistência de contato considerada pela norma IEEE Std. 80 [6] igual a  $3 \Omega$ ;

$\rho_1$  é a resistividade da primeira camada do solo [ $\Omega \cdot m$ ].

As tensões de passo ocorrem quando os membros de apoio se encontram sobre linhas equipotenciais diferentes. Essas linhas se formam na superfície do solo através do escoamento da corrente de falta. Se os dois pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial, não haverá tensão de passo em um breve espaço de tempo [18].

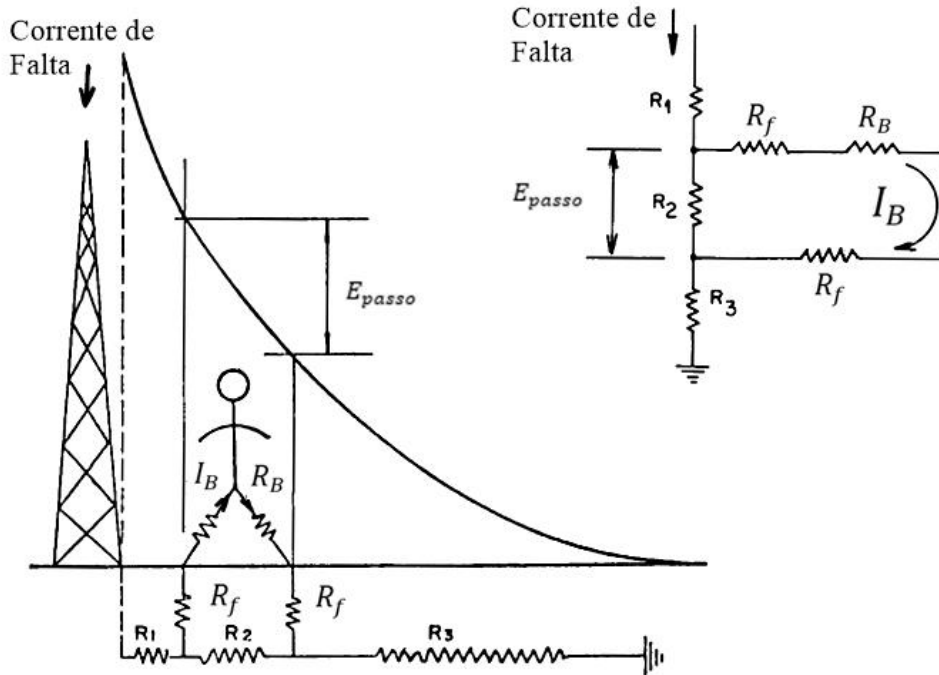


Figura 6 – Potencial de passo [18].

Pode-se determinar a equação do potencial de passo máximo admissível aplicando o Teorema de Thévenin no circuito equivalente da Figura 6.

$$E_{passo} = (R_B + 2 \cdot R_f \cdot \rho_1) \cdot I_B \quad (7)$$

Onde

$E_{passo}$  é o potencial de passo máximo admissível [V].

Utiliza-se uma camada superficial de um material com resistividade alta (geralmente gravilha, que possui uma resistividade de  $3000 \Omega \cdot m$ ) para aumentar os potenciais máximos admissíveis.

O material é espalhado na superfície da terra acima do sistema de aterramento para aumentar a resistência de contato entre o solo e os pés das pessoas presentes na subestação no momento da falta. Se o solo subjacente possuir uma resistividade menor do que a do

material da superfície, apenas uma parcela da corrente elétrica de falta irá subir a camada fina do material, e a tensão será quase igual a que sem o mesmo. Portanto, a parcela da corrente que percorrerá o indivíduo será reduzida consideravelmente com a adição de uma camada protetora [6].

Para a correção dos valores de potenciais máximos admissíveis, a norma IEEE Std. 80 [6] apresenta um fator de correção aproximado expresso na equação (8).

$$C_B = 1 - \frac{0,09 \cdot \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_S}\right)}{2 \cdot h_s + 0,09} \quad (8)$$

Onde

$C_B$  é o fator de correção da camada superficial;

$\rho_S$  é a resistividade do material implementado na superfície do solo [ $\Omega \cdot m$ ];

$h_s$  é a espessura do material da superfície [m].

Por fim, os potenciais máximos admissíveis com a inserção de uma camada protetora na superfície do solo terão as seguintes equações:

$$E_{toque} = \left( R_B + \frac{R_f}{2} \cdot \rho_1 \cdot C_B \right) \cdot I_B \quad (9)$$

$$E_{passo} = \left( R_B + 2 \cdot R_f \cdot \rho_1 \cdot C_B \right) \cdot I_B \quad (10)$$

## 2.6 Corrente da malha

Quando ocorre uma falta de curta duração na subestação elétrica, uma corrente simétrica de defeito é injetada na malha de aterramento, e se divide por toda a rede. Desse modo, os componentes do sistema têm a função de escoar uma fração de tal corrente.

A corrente da malha é a parcela da corrente de defeito que escoar para o solo através do sistema de aterramento [26]. Quando há cabo para-raios ou neutro, a corrente de defeito flui por outros caminhos além da malha de aterramento a ser analisada, Figura 7.

Como é essencial a instalação de cabo para-raios nas subestações, a corrente da malha de aterramento é menor que a de falta, devido a capacidade desse condutor de drenar parte dela.

É necessário conhecer alguns fatores importantes para o cálculo da corrente da malha. O sistema de aterramento deve ser modelado convenientemente por um circuito

equivalente considerando que a terra é um dos caminhos de retorno para a corrente da malha [26].

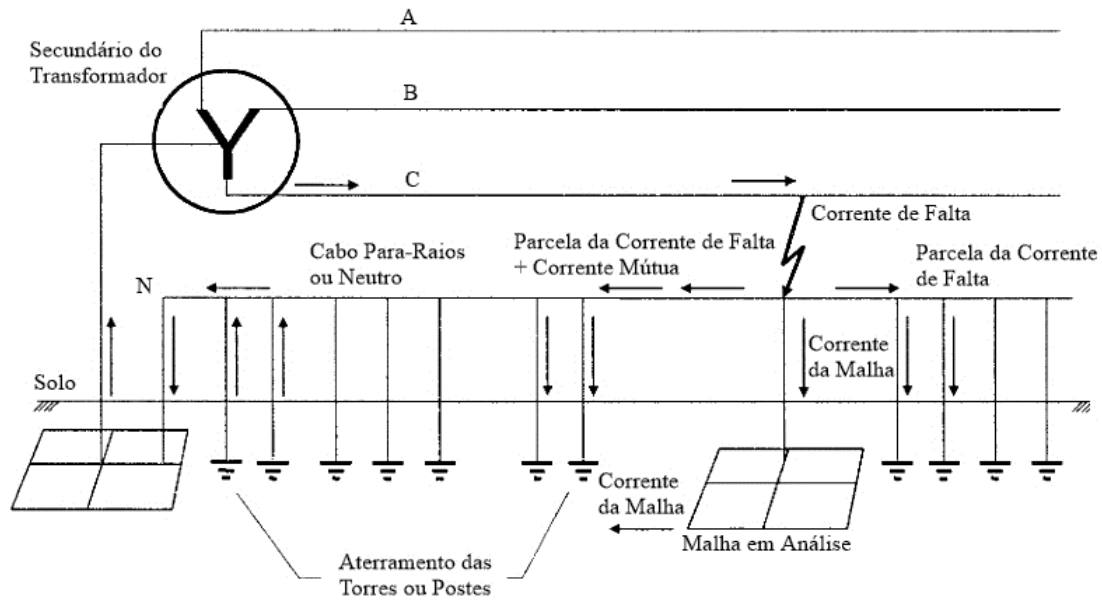


Figura 7 – Correntes da malha e as que fluem pelo circuito formado pelos cabos para-raios e torres da linha de transmissão [26].

A Figura 7 apresenta a distribuição das correntes de falta de uma subestação elétrica. O fator de decremento permite a obtenção do valor eficaz equivalente da corrente de falta para um determinado tempo de eliminação da mesma. Seu valor varia inversamente com o tempo de eliminação do defeito e aumenta com a relação “ $X/R$ ” do sistema. Ele pode ser considerado unitário para faixa de tempo de eliminação de faltas igual ou superior a 0,50 s [26].

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_A}{t_{defeito}} \left(1 - e^{-\frac{2t_{defeito}}{T_A}}\right)} \quad (11)$$

$$T_A = \frac{X}{R} \frac{1}{2\pi f} \quad (12)$$

Onde

$D_f$  é o fator de decremento para a duração da falta;

$T_A$  é o tempo de deslocamento da corrente contínua [s];

$\frac{X}{R}$  é a razão no local da falta de acordo com a malha;

$f$  é a frequência do sistema [Hz].

O fator de distribuição,  $S_f$ , fornece a parcela da corrente de falta que escoar para a terra através da malha de aterramento da subestação elétrica [26]. Ele depende da impedância equivalente das linhas de transmissão ou distribuição conectadas à subestação.

O cálculo desse fator pode ser simples, quando a impedância mútua é desprezível comparada à própria [26]. A equação (13) apresenta o cálculo da corrente da malha, que depende diretamente dos dois fatores supracitados e da corrente de falta do sistema.

$$I_m = D_f \cdot S_f \cdot I_{curto_{m\acute{a}x}} \quad (13)$$

Onde

$S_f$  é o fator de distribuição da corrente de falta;

$I_m$  é a corrente da malha de aterramento [A].

## 2.7 Sistema de aterramento para solos heterogêneos

Há diferentes tipos de solos com as mais diversas resistividades, que dependem de características vistas no início deste capítulo. Todos os parâmetros para o estudo de aterramento apresentados até o momento não dependem da variação da resistividade em relação às camadas do solo, portanto, seus cálculos podem ser utilizados em qualquer tipo de solo (homogêneo ou heterogêneo).

Os solos heterogêneos são solos não uniformes, que possuem diferentes resistividades de acordo com suas camadas. Com isso, ele não pode ser reduzido a uma resistividade aparente, tendo que levar em consideração todas as resistividades para os cálculos do sistema de aterramento.

Como o objetivo deste estudo é analisar sistemas de aterramento para solos heterogêneos de até duas camadas, a partir de agora serão exibidas formulações para o projecto de um sistema de aterramento de subestação elétrica, que dependem da variação da resistividade do solo. Todas as equações que serão apresentadas são oriundas das referências [9] e [10].

A resistência da rede depende, principalmente, da área a ser ocupada pelo sistema de aterramento. Após o início do projecto, o projectista deverá ter em mente as dimensões da malha, assim como o comprimento total de condutores enterrados.

É necessário incluir um fator de correção para o cálculo da resistência de aterramento de solos heterogêneos estratificados em duas camadas. De acordo com [9], esse fator foi

calculado para 2200 casos diferentes variando a disposição dos condutores e a área da rede de aterramento, sendo seus resultados satisfatórios.

$$R_g = C_r \cdot R_u \quad (14)$$

$$R_u = 0,13 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\sqrt{A}}\right) \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot L_r}{3 \cdot \sqrt{A}}\right) \cdot \log_{10} \left(\frac{2400\sqrt{A}}{N}\right) \quad (15)$$

$$C_r = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^x \quad (16)$$

Onde

$R_g$  é a resistência de aterramento da subestação [ $\Omega$ ];

$C_r$  é o fator de correção de não uniformidade do solo;

$R_u$  representa a resistência dos elétrodos verticais em conjunto com a malha de aterramento [ $\Omega$ ];

$A$  é a área ocupada pelo sistema de aterramento [ $m^2$ ];

$L_r$  é o comprimento de cada eletrodo vertical da rede de terra [m];

$N$  é o número de elétrodos verticais da rede de aterramento;

$\rho_2$  é a resistividade da segunda camada [ $\Omega \cdot m$ ].

Quando a razão entre a resistividade da segunda camada e a da primeira for inferior a 1, deve-se utilizar a equação (17).

$$x = 0,59 \cdot \log_{10} \left(\frac{15,5}{H}\right) + 0,016 \cdot \log_{10}(4,2 \cdot H) \cdot \left(\log_{10}(N \cdot \sqrt{A})\right)^2 \quad (17)$$

Quando essa razão for superior a 1, utiliza-se a equação (18).

$$x = 0,57 \cdot \log_{10} \left(\frac{8,5}{H}\right) + 0,06 \cdot \log_{10}(10 \cdot H) \cdot \log_{10}(N \cdot A) \quad (18)$$

Onde

$x$  representa uma constante;

$H$  é a profundidade da primeira camada do solo [m].

Quando essa razão for igual a 1, a constante “ $x$ ” será nula.

Além da resistência é muito importante calcular os três potenciais da rede projectada para avaliar o sistema de aterramento. O Potencial de toque da rede é definido como o potencial de toque máximo encontrado dentro de uma submalha, quando ocorre o máximo defeito fase-terra em algum equipamento da subestação [18].

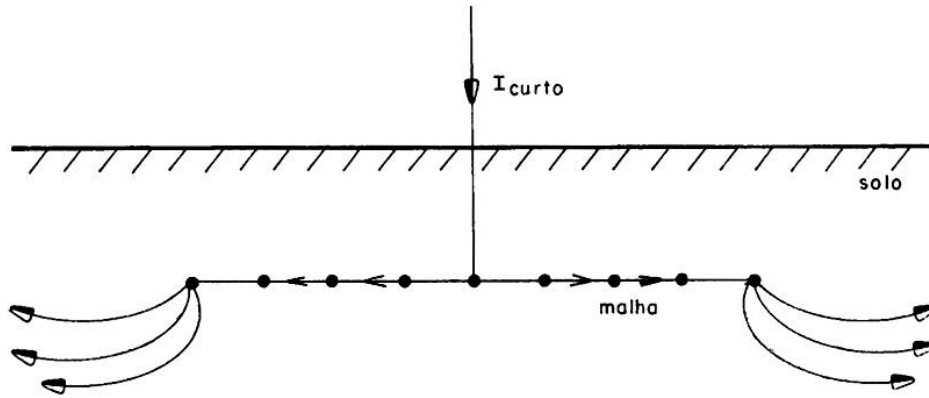


Figura 8 – Corrente de defeito dissipada na periferia da malha de aterramento [18].

A corrente de defeito escoo preferencialmente pelas bordas da rede de terra, Figura 8. Isso acontece por causa da interação entre os condutores no interior da rede, que forçam o escoamento da corrente pelas bordas. Assim, o potencial de toque máximo da rede de aterramento encontra-se em sua periferia [18].

Também será necessário aplicar um fator de correção para solos heterogêneos estratificados em duas camadas nos potenciais do sistema de aterramento. O potencial de toque máximo da rede de terra pode ser obtido através da equação (19).

$$E_{m,heterog\tilde{e}neo} = C_m \cdot \frac{\rho_1 \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_m}{L_M} \quad (19)$$

$$C_m = \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^y \quad (20)$$

$$K_m = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{(D + 2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{h}{4 \cdot d} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left( \frac{8}{\pi \cdot (2 \cdot n - 1)} \right) \right\} \quad (21)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (22)$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (23)$$

Onde

$E_{m,heterog\tilde{e}neo}$  é o potencial de toque máximo da rede de aterramento para solos heterogêneos [V];

$C_m$  é o fator de correção para solos heterogêneos;

$K_m$  é o fator de espaçamento para o potencial da rede de aterramento;

$K_i$  é o fator geométrico da rede de aterramento;

$L_M$  é o comprimento efetivo de condutores da rede de aterramento [m];

$D$  é o espaçamento entre condutores ao longo da malha [m];

$h$  é a profundidade da malha de aterramento [m];

$d$  é o diâmetro do condutor horizontal da malha [m];

$K_{ii}$  é o fator de ponderação corretiva;

$K_h$  é a correção de profundidade da rede de aterramento;

$n$  é o fator geométrico da malha quadrada;

$h_0$  é a profundidade de referência da malha, e pode ser considerado igual a 1 m.

Para rede de aterramento com elétrodos verticais cravados ao longo de sua periferia, utiliza-se o fator de ponderação corretiva,  $K_{ii}$ , como unitário. Quando a rede não possuir elétrodos verticais em sua periferia deve-se utilizar a equação (24).

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \cdot n)^{\frac{2}{n}}} \quad (24)$$

O número efetivo de condutores paralelos em uma malha de aterramento quadrada,  $n$ , pode ser também aplicado em malhas retangulares ou irregulares para representar o número de condutores paralelos equivalente [6].

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (25)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_c}{L_p} \quad (26)$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \cdot \sqrt{A}}} \quad (27)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \cdot A}{L_x \cdot L_y}} \quad (28)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (29)$$

Onde

$n_b = 1$  para malhas quadradas;

$n_c = 1$  para malhas quadradas e retangulares;

$n_d = 1$  para malhas quadradas, retangulares e em L;

$L_c$  é o comprimento total de condutores horizontais da malha [m];

$L_p$  é o perímetro da malha [m];

$L_x$  é o comprimento máximo da malha em x [m];

$L_y$  é o comprimento máximo da malha em y [m];

$D_m$  é a distância máxima entre 2 pontos da malha [m].

Quando a resistividade da segunda camada for menor que a da primeira, deve-se utilizar a equação (30).

$$y = 0,33 \cdot \log_{10} \left( \frac{10 \cdot H}{H_0} \right) \quad (30)$$

Quando for maior, utiliza-se a equação (31).

$$y = 0,16 \cdot \log_{10} \left( \frac{H}{H_0} \sqrt{\frac{A}{A_0}} \right) - 0,1 \quad (31)$$

Onde

$y$  representa uma constante;

$H_0$  é a correção da profundidade da primeira camada do solo e pode ser considerado igual a 1 m;

$A_0$  é a correção da área da malha de aterramento e pode ser considerado igual a 1 m<sup>2</sup>.

Quando forem iguais, a constante “ $y$ ” será nula.

Para malhas sem ou com poucos elétrodos verticais de aterramento espalhados por sua periferia, o comprimento efetivo,  $L_M$ , é definido como

$$L_M = L_C + L_R \quad (32)$$

Onde

$L_R$  é o comprimento total de elétrodos verticais conectados na malha de aterramento [m].

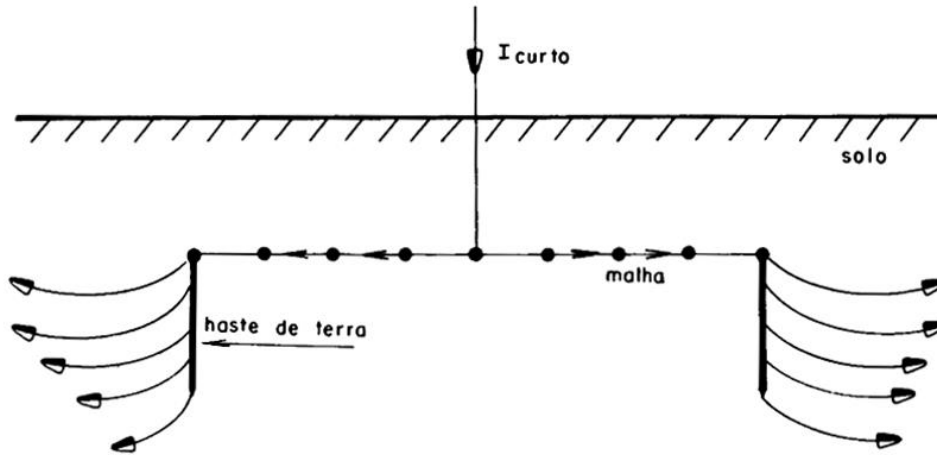


Figura 9 – Corrente de defeito dissipada na periferia da malha e nos elétrodos verticais de aterramento [18].

Para malhas onde são colocados elétrodos verticais cravados ao longo de seu perímetro, as correntes possuem maior facilidade de escoamento, Figura 9, assim, faz-se uma correção no comprimento das hastes na periferia da malha, equação (33).

$$L_M = L_C + L_R \left[ 1,55 + 1,22 \cdot \left( \frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \quad (33)$$

O Potencial de Passo da malha de aterramento ocorre em sua periferia e leva em consideração a diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1 m na malha. Ele pode ser calculado através da equação (34).

$$E_{s,heterogêneo} = C_s \frac{\rho_1 \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_m}{L_s} \quad (34)$$

$$C_s = \left( \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^z \quad (35)$$

$$L_s = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (36)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[ \frac{1}{2 \cdot h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} \cdot (1 - (0,5)^{n-2}) \right] \quad (37)$$

Onde

$E_{s, \text{heterog\^e}neo}$  é o potencial de passo máximo da rede de aterramento para solos heterogêneos [V];

$C_s$  é o fator de correção para solos heterogêneos;

$K_s$  é o coeficiente que introduz no cálculo a maior diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1 m. Ele relaciona todos os parâmetros da malha que induzem tensões na superfície da terra;

$L_s$  é o comprimento efetivo de condutores enterrados para malhas com ou sem elétrodos verticais [m];

$z$  representa uma constante.

Para a utilização das fórmulas simplificadas para o cálculo do potencial de passo da rede, deve-se assumir  $0,25 \text{ m} \leq h \leq 2,5 \text{ m}$ .

Quando a resistividade da segunda camada for menor que a da primeira, deve-se utilizar a equação (38).

$$z = 0,475 \cdot \log_{10} \left( 140 \cdot \sqrt{\frac{N \cdot A_0}{A}} \right) + 0,14 \cdot \log_{10} \left( \frac{H}{H_0} \right) \quad (38)$$

Quando for maior, utiliza-se a equação (39).

$$z = 0,032 \cdot \log_{10}(2850 \cdot N) \cdot \log_{10} \left( 2810 \cdot \frac{H_0}{H} \right) \quad (39)$$

Quando forem iguais, a constante “z” será nula.

É importante lembrar que todas as formulações de resistência e potenciais máximos de toque e passo da rede de aterramento para solos heterogêneos foram baseadas em [9] e [10].

Pode-se calcular uma estimativa do comprimento mínimo de condutores que a rede de aterramento deve possuir para permanecer dentro do limite de segurança utilizando as equações (9) e (19).

$$L_{\min} \geq C_m \cdot \frac{\rho_1 \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_m}{E_{\text{toque}}} \quad (40)$$

Onde

$L_{\min}$  é o comprimento mínimo estimado de condutores da rede de aterramento [m].

Se  $L_{\min} > L_M$  não significa que a rede esteja projectada corretamente dentro dos limites de segurança. Deve-se efetuar todos os cálculos de aterramento do mesmo jeito.

Também é interessante analisar o potencial de toque da cerca perimetral da malha para o projectista decidir como ela deverá ser instalada. Usualmente, costuma-se isolar a malha através de duas maneiras: muro de alvenaria ou cerca metálica. A cerca metálica é mais econômica comparada ao muro de alvenaria, mas sendo condutora fica submetida aos potenciais oriundos das correntes de curto-circuito da subestação. Dessa maneira, qualquer indivíduo que tocá-la ficará sujeito a uma diferença de potencial. Portanto, o potencial de toque máximo na cerca metálica também deve ser calculado para verificar se seu valor é inferior ao limite do potencial de toque tolerável [18].

$$E_{\text{cerca,heterogêneo}} = C_m \cdot \frac{\rho_1 \cdot K_c \cdot K_i \cdot I_m}{L_M} \quad (41)$$

$$K_c = \frac{1}{2 \cdot \pi} \left\{ \ln \left[ \frac{(h^2 + m^2) \cdot [h^2 + (D + m)^2]}{h \cdot d \cdot (h^2 + D^2)} \right] + 2 \cdot \ln \left\{ \left[ \frac{2 \cdot D + m}{2 \cdot D} \right] \cdot \left[ \frac{3 \cdot D + m}{3 \cdot D} \right] \cdots \left[ \frac{(n - 1) \cdot D + m}{(n - 1) \cdot D} \right] \right\} \right\} \quad (42)$$

Onde

$E_{\text{cerca,heterogêneo}}$  é o potencial de toque máximo que surge na cerca, quando ocorre um defeito máximo à terra [V];

$K_c$  é o coeficiente que relaciona todos os parâmetros da rede com a posição do indivíduo que toca a cerca;

$m$  é a distância da periferia da malha ao ponto considerado (indivíduo) [m].

O comprimento efetivo dos condutores,  $L_M$ , deverá ser calculado levando em consideração os mesmos princípios da existência de hastes cravadas na periferia da rede vistos anteriormente. A Figura 10 ilustra a distância “ $m$ ”.

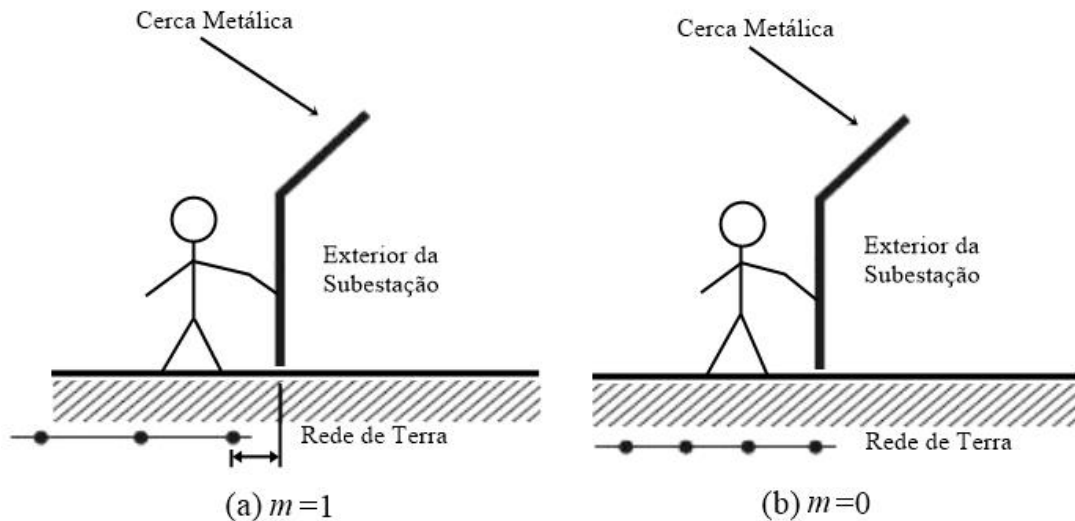


Figura 10 – Distância “ $m$ ” para o cálculo do potencial de toque na cerca metálica [17 adaptada].

Os equipamentos elétricos também precisam ter suas partes metálicas conectadas na rede de aterramento da subestação. É muito importante calcular a elevação de potencial total da malha referida ao infinito ( $GPR$ ), Figura 11.

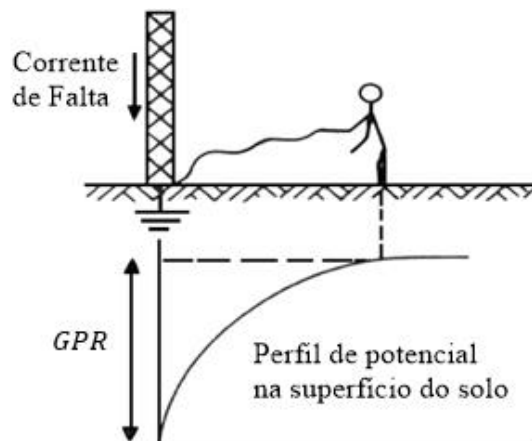


Figura 11 – Tensão transferida ou  $GPR$ . Elevação de potencial total da malha referida ao infinito [27].

O  $GPR$  é o potencial a que ficaria submetido um indivíduo posicionado no terra remoto (longe da rede de aterramento), que tivesse contato com alguma parte metálica eventualmente conectada com os condutores da rede durante seu fluxo de corrente [6].

$$GPR = R_g \cdot I_m \quad (43)$$

Se esse valor estiver abaixo do potencial de toque tolerável para não causar fibrilação, significa que a rede de aterramento satisfaz todos os requisitos de segurança, ou seja, ela está bem dimensionada e pronta para ser instalada. Porém, o fato dessa condição não ser atendida não implica que a rede não esteja adequada. Deve-se então fazer todos os cálculos necessários de verificação dos potenciais da rede em adequação com o limite de fibrilação [18]. Quanto menor for o *GPR*, melhor estará dimensionado o sistema de aterramento, portanto, é importante encontrar valores de resistência da rede baixos.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Será apresentada neste capítulo, a metodologia empregada na construção do algoritmo para o cálculo de rede de aterramento de subestações elétricas.

O aplicativo foi desenvolvido na plataforma *App Designer*, recurso de fácil entendimento e manuseio, disponível no programa *Matlab* para programação e construção de interface gráfica.

#### **3.1 Análise dos parâmetros de rede de aterramento**

Projectar um sistema de aterramento dentro dos limites de segurança pode ser desafiador devido à resistividade do solo e à corrente de curto-circuito dos equipamentos elétricos.

O sistema de aterramento pode ser composto apenas por condutores horizontais interligados formando uma malha, ou pode-se acrescentar elétrodos verticais conectados a essa mesma malha formando uma rede de aterramento. Recomenda-se utilizar elétrodos verticais conectados à malha para melhorar o desempenho do sistema de aterramento de subestações permitindo que a corrente de falta seja dissipada em outras camadas do solo.

A Figura 12 (a) apresenta um exemplo de malha de aterramento de uma subestação elétrica com 100 metros de comprimento, 50 metros de largura, 10 metros de espaçamento entre os condutores horizontais e 0,80 metros de profundidade. Já a Figura 12 (b) mostra uma rede de aterramento com elétrodos horizontais e verticais.

A norma IEEE Std. 80 [6] estabelece alguns métodos para os cálculos da resistência de aterramento e dos potenciais máximos de toque e passo da malha, como já apresentados no Capítulo 2. No entanto, tais métodos consideram apenas solos homogêneos simplificados a uma resistividade aparente.

Como o foco deste estudo é o aterramento de subestações que serão instaladas em solos estratificados até duas camadas, foi necessário implementar fatores de correção definidos em [9] e [10] para o cálculo da resistência e dos potenciais máximos de toque e passo da rede. As formulações apresentadas em [18] e [6] foram usadas para o cálculo da secção dos condutores da malha e de ligação, dos potenciais máximos de toque e passo admissíveis, do GPR, e do potencial máximo de toque da cerca.

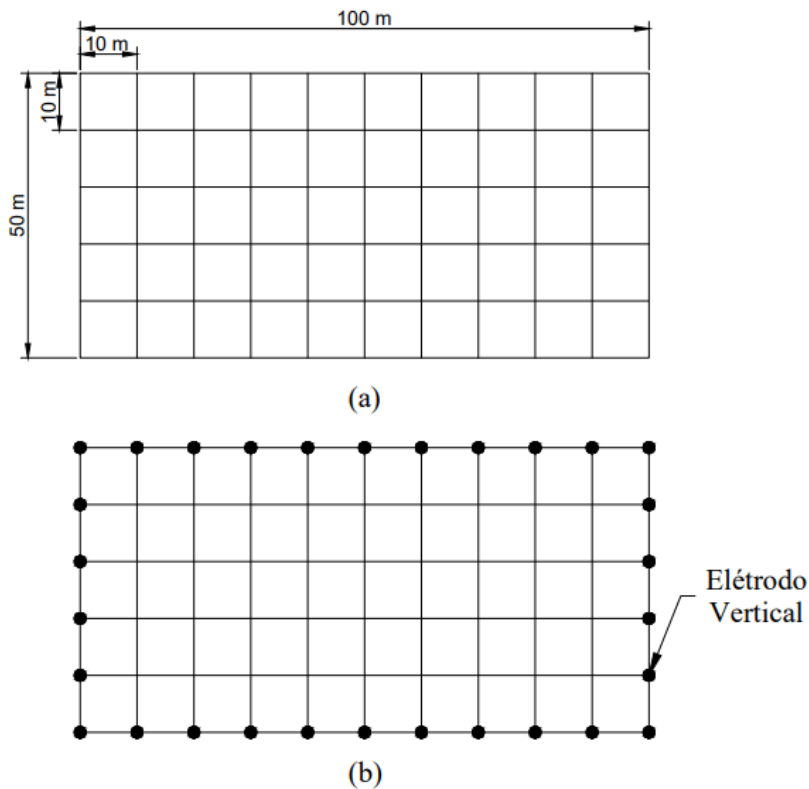


Figura 12 – Exemplo de sistema de aterramento de uma subestação com 0,80 m de profundidade. (a) Malha de aterramento. (b) Rede de aterramento com elétrodos verticais em sua periferia.

### 3.2 Desenvolvimento do aplicativo utilizando a plataforma *App Designer*

O cálculo do código computacional segue o algoritmo presente na Figura 13.

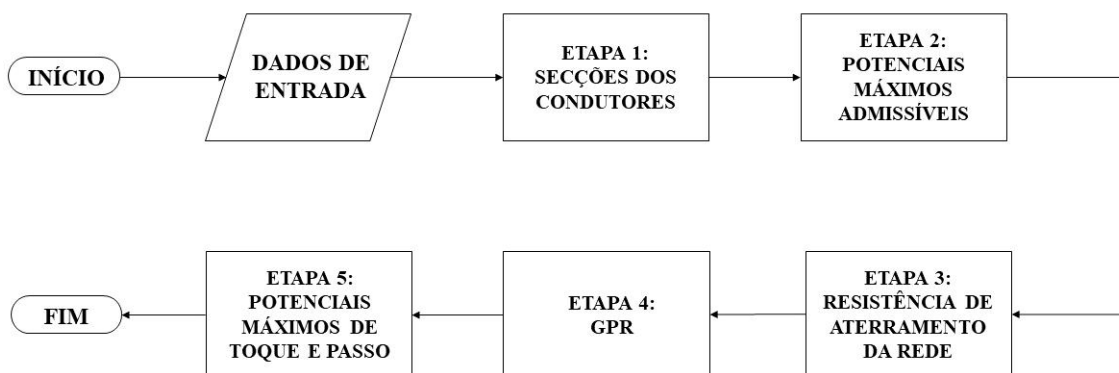


Figura 13 – Algoritmo de cálculo para o desenvolvimento do aplicativo.

Os cálculos de aterramento do programa foram divididos em 5 etapas principais:

- Etapa 1: Cálculo da secção dos condutores da malha e de ligação dos equipamentos;
- Etapa 2: Cálculo dos potenciais máximos de toque e passo admissíveis;
- Etapa 3: Cálculo da resistência de aterramento da rede;

- Etapa 4: Cálculo do GPR;
- Etapa 5: Cálculo dos potenciais máximos de toque e passo da rede, e toque da cerca metálica.

### **3.2.1 Etapa 1: Cálculo da secção dos condutores de aterramento**

O cobre possui propriedades térmicas e mecânicas excelentes e alta capacidade de condução de corrente para sistemas elétricos. Os Fios de cobre são capazes de conduzir grandes descargas elétricas de um ponto a outro dentro dos parâmetros de segurança. Os projectos elétricos que utilizam condutores de cobre geralmente resultam em soluções mais compactas comparadas às de outros materiais. Ele também possui uma alta resistência à corrosão e pode ser embutido no betão, além de ser capaz de entregar correntes elétricas de amplitudes maiores em um cabo de secção menor. Portanto, é conveniente que o programa seja capaz de utilizar condutores de cobre no projecto da malha de aterramento.

O aplicativo foi desenvolvido para permitir que o utilizador possa escolher as secções dos condutores de cobre da malha e de ligação dos equipamentos, se tais características já tenham sido consideradas em seu projecto.

A Etapa 1 relativa ao cálculo das secções dos condutores divide-se em 2 partes: a primeira referente ao cálculo dos condutores da malha de aterramento, Figura 14; a segunda referente ao cálculo da secção dos condutores de ligação dos equipamentos, Figura 15. O programa depende de informações básicas como a temperatura ambiente máxima, o tipo de conexão, a corrente e o tempo máximos de curto-circuito da subestação elétrica, caso seja necessário calcular as secções dos condutores.

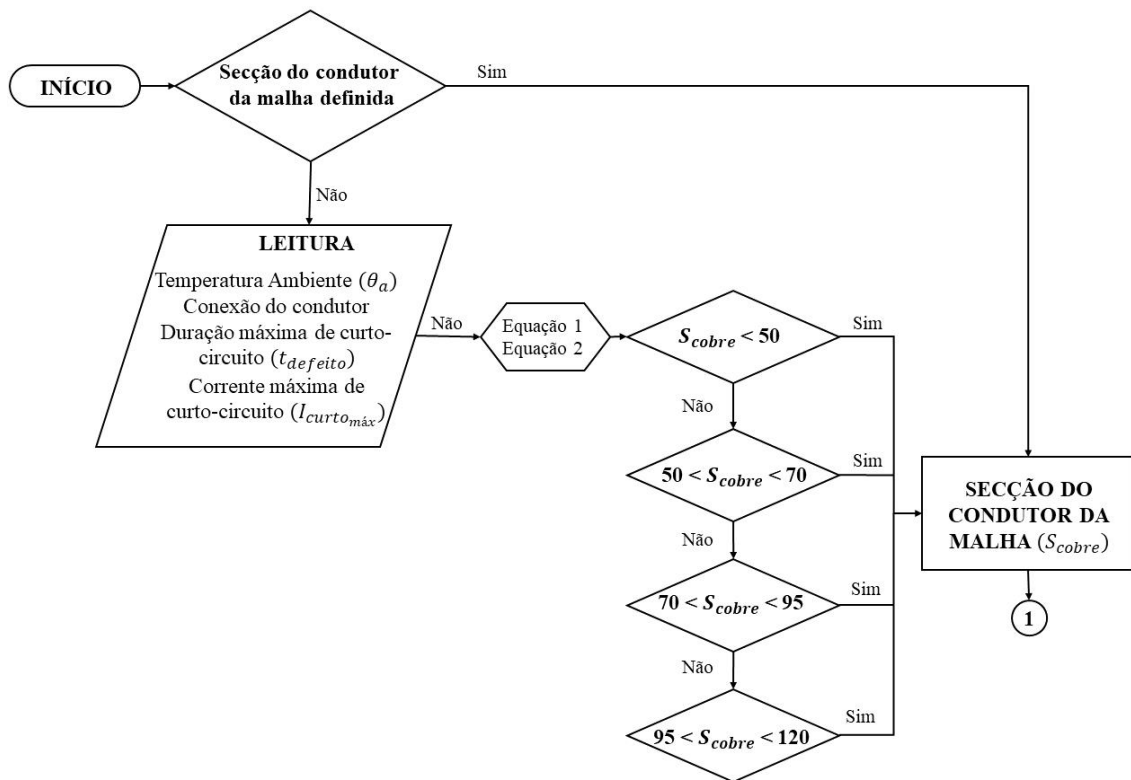


Figura 14 – Algoritmo para o cálculo da secção dos condutores da malha de aterramento.

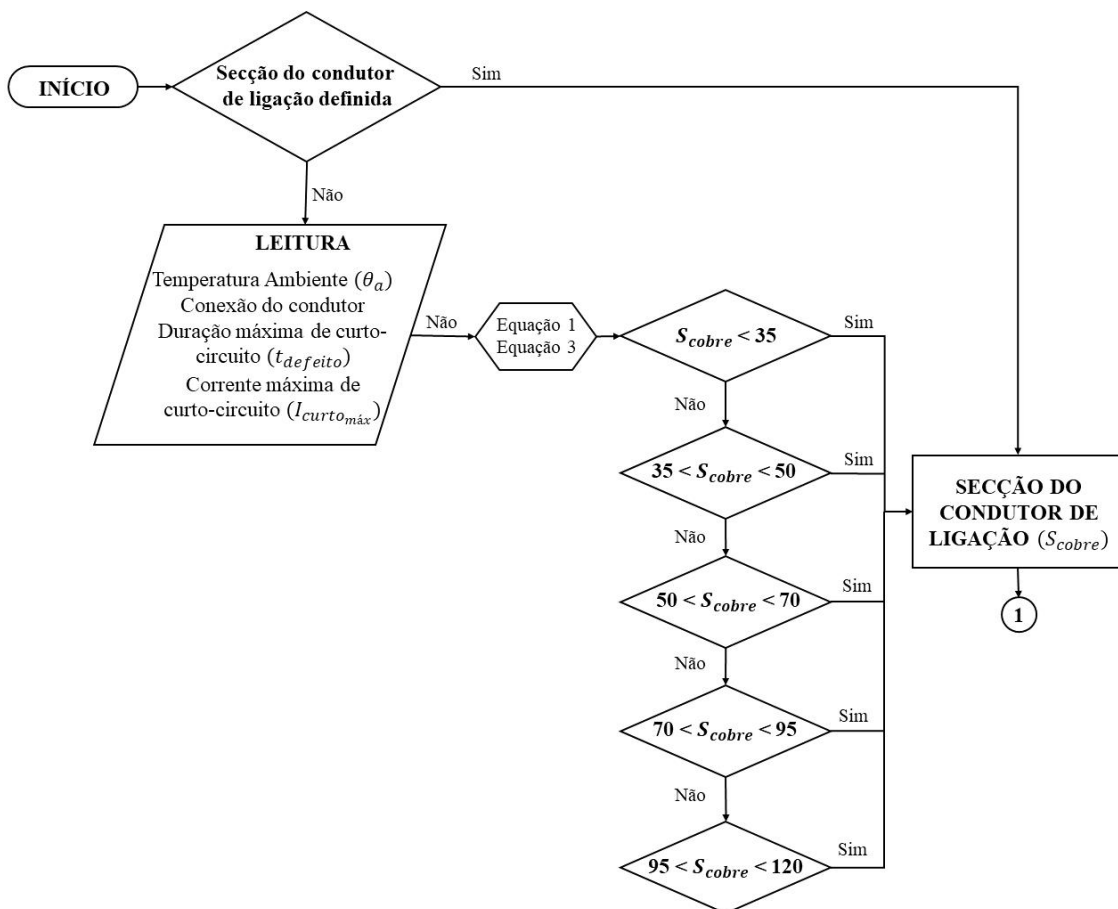


Figura 15 – Algoritmo para o cálculo da secção dos condutores dos equipamentos.

É recomendável utilizar secções de condutores de cobre para malha de aterramento de subestações maiores ou iguais a 50 mm<sup>2</sup> devido à necessidade de suportar esforços mecânicos e eletromagnéticos [26]. Portanto, o algoritmo assume uma secção mínima de 50 mm<sup>2</sup> para os condutores da malha, e de 35 mm<sup>2</sup> para os de ligação.

O processo para a obtenção das secções de ambos os condutores é efetuado analogamente da seguinte maneira:

- Primeiramente, o utilizador informa se seu projecto já possui secções definidas.
- Em seguida, havendo necessidade de cálculo, o programa faz a leitura dos dados inseridos pelo utilizador para calcular as secções:
  - O valor da secção dos condutores da malha de aterramento é calculado com as equações (1) e (2) presentes na Figura 14; o valor da secção dos condutores de ligação dos equipamentos é calculado com as equações (1) e (3) presentes na Figura 15.
- Neste momento, o valor da secção gerado é avaliado. Foram utilizadas secções finais com valores padrões definidos pelo mercado:
  - Para os condutores da malha e de ligação será escolhido o valor padrão imediatamente superior ao resultado do cálculo. Tais valores são 35, 50, 70, 95 e 120 mm<sup>2</sup>.
- Após todo processo, serão apresentados os resultados das secções finais no aplicativo.

### **3.2.2 Etapa 2: Cálculo dos potenciais máximos admissíveis**

Os potenciais máximos admissíveis dependem de quatro informações principais: se há camada protetora, o peso considerado do indivíduo, a duração máxima de curto-circuito e a resistividade da primeira camada do solo. A inserção de uma camada protetora é extremamente comum em aterramentos de subestações pela facilidade da inclusão de um material de resistividade muito alta (como por exemplo a gravilha) por todo terreno onde a malha será instalada.

De acordo com a norma IEEE Std. 80 [6], há duas formulações de corrente limite para a não ocorrência de fibrilação, equações (4) e (5), que dependem do peso do indivíduo propício a sofrer um choque elétrico no pátio da subestação no momento da falta.

A Figura 16 apresenta o algoritmo de cálculo dos potenciais admissíveis. A Etapa 2 é iniciada com um questionamento relativo à inserção de uma camada protetora no projecto. Outro parâmetro a ser considerado é o peso do indivíduo, que deverá ser definido pelo

utilizador. É evidente que, quanto maior for o peso do indivíduo, melhor será sua capacidade de suportar uma corrente de choque maior, portanto, a equação (4) é mais severa e recomendável do que a equação (5), uma vez que não se tem controle dos indivíduos que poderão transitar próximos à subestação elétrica.

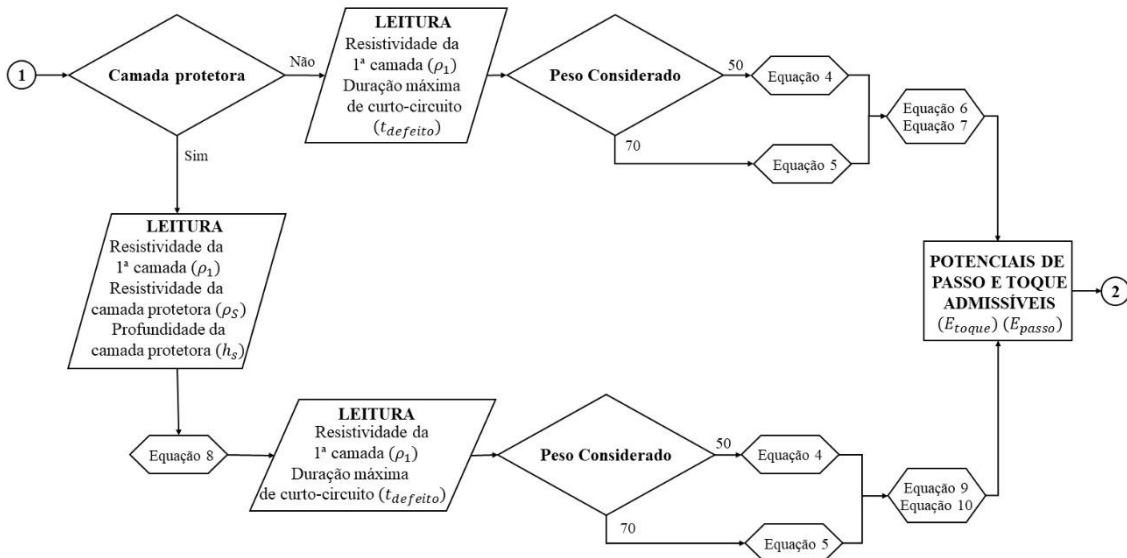


Figura 16 – Algoritmo para o cálculo dos potenciais admissíveis.

O fator “ $C_B$ ” deve ser acrescentado no cálculo se o projecto admitir camada protetora. Ele é calculado a partir da equação (8) e inserido nas equações (9) e (10). As equações (6) e (7) ou (9) e (10) geram os valores dos potenciais admissíveis finalizando o processo.

### 3.2.3 Etapa 3: Cálculo da resistência de aterramento da rede

Como apresentado no Capítulo 2, é necessária a inclusão de um fator de correção,  $C_r$ , de solos heterogêneos estratificados até duas camadas para o cálculo da resistência de aterramento da rede.

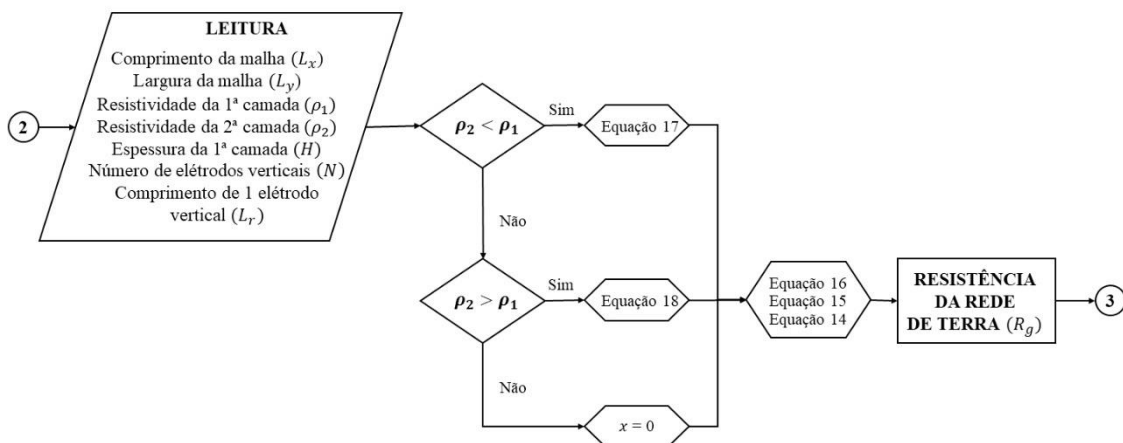


Figura 17 – Algoritmo para o cálculo da resistência da rede de aterramento.

Na Etapa 3 são apresentados dois questionamentos importantes, ilustrados na Figura 17, sobre as resistividades da primeira e da segunda camada. Se a resistividade da segunda camada for maior que a da primeira, significa que uma parcela de corrente de defeito maior escoará pela primeira camada. Isso não é adequado para um sistema de aterramento de subestação elétrica, porque uma maior parcela de corrente estará mais próxima da superfície do solo. Portanto, o fator de correção nessa situação deverá ter um valor maior para gerar corretamente a resistência de aterramento, desviando a corrente para camadas mais profundas do solo.

A constante “ $x$ ”, presente no fator de correção e calculada pelas equações (17) e (18), depende diretamente da relação entre a resistividade da primeira e a da segunda camadas. Se ambas resistividades forem iguais, implicando num solo homogêneo, a constante admite valor nulo e sua resistência independe de “ $C_r$ ”. Por fim, “ $C_r$ ” deve ser multiplicado pela resistência de terra vista pelo solo, obtida através da equação (15).

Para a maioria das subestações coletoras e de transmissão de energia elétrica, a resistência de aterramento é cerca de 1  $\Omega$ . Em subestações de distribuição menores, a faixa aceitável geralmente é de 1 a 5  $\Omega$  dependendo das condições locais [6].

### 3.2.4 Etapa 4: Cálculo do GPR

Outro parâmetro importante que precisa ser calculado é o GPR. Nota-se que o objetivo de um sistema de aterramento é fornecer uma resistência baixa ao terra remoto para minimizar o GPR, que por sua vez depende da corrente e da resistência da malha.

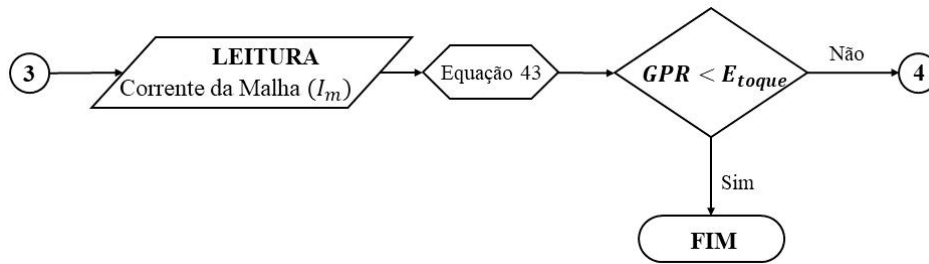


Figura 18 – Algoritmo para o cálculo do GPR.

O GPR é facilmente calculado através da equação (43), pois depende apenas de dois fatores já obtidos nas etapas anteriores, Figura 18. Na Etapa 4, o algoritmo faz a leitura da corrente da malha de aterramento inserida pelo utilizador. Essa corrente depende de alguns parâmetros como o fator de diminuição para a duração de falta,  $D_f$ , e o fator de divisão da corrente de falta,  $S_f$ . Alguns valores típicos de “ $D_f$ ” para a frequência de 60 Hz são apresentados na norma IEEE Std. 80 [6], Tabela 10. Esse fator está relacionado à razão no local da falta,  $X/R$ , em que “ $X$ ” é a reatância e “ $R$ ” é a resistência do sistema. Ela é obtida através do estudo de curto-circuito da subestação. A corrente também depende das linhas de transmissão e de distribuição conectadas à subestação. Por esses motivos, é compreensível que o próprio projectista forneça o valor da corrente da malha de aterramento para o aplicativo.

Após a leitura da corrente e do resultado da resistência de aterramento relativo à Etapa 3, o programa calcula o GPR. Se o valor obtido for inferior ao potencial de toque admissível, o sistema de aterramento foi dimensionado corretamente e os outros parâmetros não precisarão ser avaliados. Caso contrário, o processo continuará e todos os parâmetros deverão ser calculados.

### 3.2.5 Etapa 5: Cálculo dos potenciais máximos da rede e da cerca

Inicialmente, faz-se a leitura de todos os dados da configuração da rede de aterramento, como suas dimensões, quantidade de elétrodos verticais e profundidade de instalação da malha para calcular seus potenciais máximos.

A constante “ $y$ ” depende da resistividade das camadas do terreno, onde a subestação elétrica será instalada. Ela é obtida através das equações (30) e (31). O algoritmo calcula a constante “ $z$ ” através das equações (38) e (39). Ela depende dos mesmo fatores que “ $y$ ”, entretanto, é utilizada para o cálculo do fator de correção do potencial de passo da rede de terra.

O potencial de passo já pode ser calculado neste momento. É necessária a leitura de algumas informações sobre a configuração da rede de aterramento para o cálculo dos valores dos potenciais máximos de toque da rede e da cerca. A geometria da malha,  $L_y$ ,  $L_x$ , e a quantidade de elétrodos verticais em sua periferia irão definir alguns caminhos por onde o processo deverá continuar. Após alguns cálculos, serão apresentados os resultados dos potenciais máximos de toque da rede e da cerca.

O comprimento mínimo de condutores é determinado através do potencial máximo de toque da rede. Ele indica o mínimo de condutor que a rede de terra precisa ter para estar dentro dos limites de segurança da norma IEEE Std. 80 [6]. Esse parâmetro também considera o comprimento total de todos os elétrodos verticais presentes na rede de aterramento. Faz-se a leitura dos resultados dos potenciais máximos de toque admissível e da rede para obter o valor do comprimento mínimo de condutores por meio da equação (40). Esse parâmetro é extremamente útil para o ajuste do projecto, quando for necessário.

Por fim, os parâmetros da rede de aterramento calculados são comparados aos limites de segurança, Figura 19. O sistema de aterramento foi dimensionado corretamente e poderá ser construído se os potenciais máximos de toque da rede e da cerca estiverem abaixo do valor do potencial de toque admissível. O mesmo é válido para quando o potencial máximo de passo da rede for inferior ao de passo admissível. Se pelo menos uma dessas condições não estiver de acordo, a rede de terra deverá ser ajustada pelo projectista.

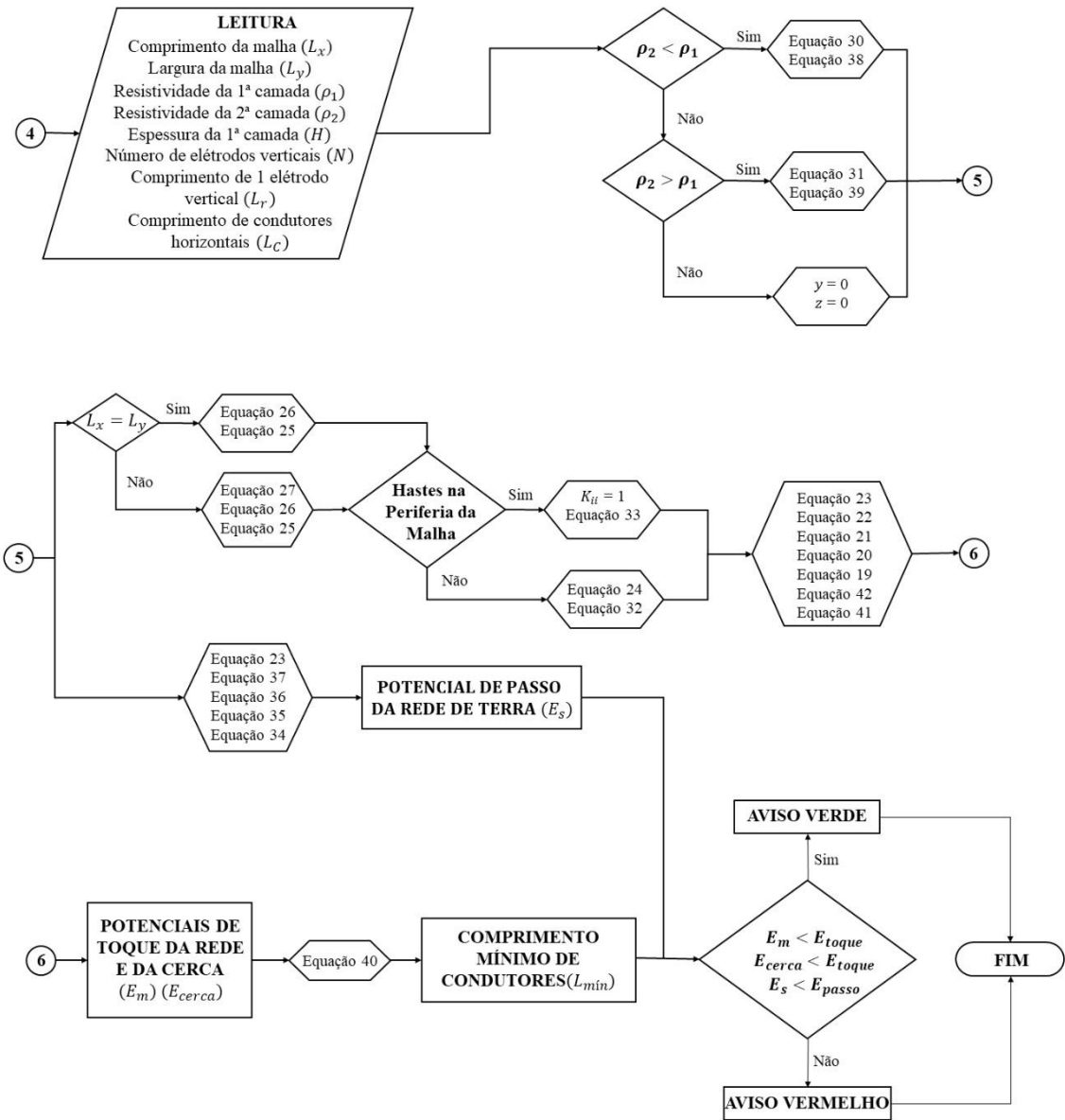


Figura 19 – Algoritmo para o cálculo dos potenciais máximos da rede e da cerca.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão apresentados neste capítulo o aplicativo desenvolvido, seus resultados e suas condições finais. Os passos de sua utilização serão demonstrados com o exemplo prático do sistema de aterramento de uma subestação elétrica.

### 4.1 Interface do aplicativo

A Figura 20 ilustra a interface do aplicativo. O utilizador deve fornecer os parâmetros de entrada, que são divididos em 4 partes:

- Características do solo onde a rede de aterramento será construída;
- Características dos condutores da malha e de ligação dos equipamentos elétricos;
- Dimensões da rede de aterramento projectada e quantidade de seus materiais;
- Informações do estudo de curto-circuito da subestação elétrica.



*Figura 20 – Interface do aplicativo SASEE: Sistema de Aterramento de Subestações Elétricas.*

#### 4.1.1 Parâmetros de entrada

Será apresentado o exemplo ilustrativo da utilização do aplicativo para melhor descrever seus menus de entrada. Foram simulados parâmetros genéricos de uma rede de aterramento de subestação elétrica dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada do exemplo ilustrativo.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Unidade
Resistividade da primeira camada	$\rho_1$	500	$\Omega.m$
Resistividade da segunda camada	$\rho_2$	250	$\Omega.m$
Espessura da primeira camada	$H$	10,000	m
Resistividade da camada protetora	$\rho_s$	3000	$\Omega.m$
Espessura da camada protetora	$h_s$	0,200	m
Secção do condutor da malha	$S_{cond}$	70	mm <sup>2</sup>
Secção do condutor de ligação	$S_{lig}$	70	mm <sup>2</sup>
Comprimento da malha	$L_x$	50,00	m
Largura da malha	$L_y$	50,00	m
Corrente da malha	$I_m$	1600	A
Espaçamento entre condutores	$D$	10,00	m
Hastes na periferia	-	SIM	-
Profundidade da malha	$h$	0,60	m
Quantidade de elétrodos verticais	$N$	20	und
Comprimento de um eléctrodo vertical	$L_r$	3,00	m
Comprimento total de condutores horizontais	$L_c$	600,00	m
Peso considerado	-	50	kg
Duração máxima de curto-circuito	$t_{defeito}$	0,50	s
Corrente máxima de curto-circuito	$I_{curto_{máx}}$	3000	A

A Figura 21 representa o ponto inicial para a simulação do exemplo. Ela ilustra a rede de terra, da qual foram retirados os dados para a inserção no aplicativo.

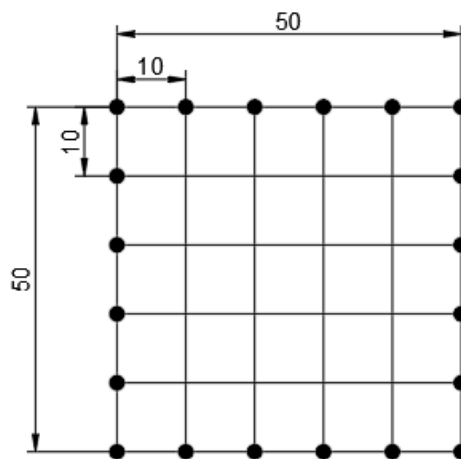


Figura 21 – Rede de aterramento com elétrodos verticais na periferia. Comprimentos em metros.

As resistividades da primeira e da segunda camadas já estratificadas e a espessura da primeira devem ser introduzidas pelo utilizador no menu das características do solo,

Figura 22. Quando for necessário acrescentar uma camada protetora na superfície do terreno, deve-se também inserir suas resistividade e espessura, Figura 23.

INÍCIO	SOLO	CONDUTOR	MALHA	CURTO CIRCUITO	RESULTADOS
Resistividade da 1ª camada [ohm.m] <input type="text" value="500"/> <input type="checkbox"/> Camada Protetora					
Resistividade da 2ª camada [ohm.m] <input type="text" value="250"/>					
Espessura da 1ª camada [m] <input type="text" value="10"/>					

Figura 22 – Menu características do solo.

INÍCIO	SOLO	CONDUTOR	MALHA	CURTO CIRCUITO	RESULTADOS
Resistividade da 1ª camada [ohm.m] <input type="text" value="500"/> <input checked="" type="checkbox"/> Camada Protetora					
Resistividade da 2ª camada [ohm.m] <input type="text" value="250"/> Resistividade da Camada Protetora [ohm.m] <input type="text" value="3000"/>					
Espessura da 1ª camada [m] <input type="text" value="10"/> Espessura da Camada Protetora [m] <input type="text" value="0.2"/>					

Figura 23 – Menu características do solo com camada protetora na superfície.

Após os dados de entrada do solo, o utilizador precisa indicar se há secções definidas para os condutores da malha de aterramento e para os de ligação dos equipamentos da subestação elétrica à malha, Figura 24. O tipo de conexão dos condutores e a temperatura ambiente na qual serão instalados deverão ser introduzidos, caso as secções não tenham sido definidas, Figura 25.

INÍCIO	SOLO	CONDUTOR	MALHA	CURTO CIRCUITO	RESULTADOS
<input checked="" type="checkbox"/> Secção do Conductor Definida <input checked="" type="checkbox"/> Secção do Conductor de Ligação Definida                Temperatura Máx Ambiente [°C]					
Secção [mm²] <input type="text" value="70"/> Secção [mm²] <input type="text" value="70"/> <input type="text" value="0"/>					

Figura 24 – Menu secções dos condutores de aterramento com secções definidas.

INICIO	SOLO	CONDUTOR	MALHA	CURTO CIRCUITO	RESULTADOS
<input type="checkbox"/> Secção do Condutor Definida		<input type="checkbox"/> Secção do Condutor de Ligação Definida		Temperatura Máx Ambiente [°C]	
Tipo de Conexão do Condutor:		Tipo de Conexão do Condutor de Ligação:		<input type="text" value="0"/>	
<input checked="" type="radio"/> Cavilhada com Juntas de Bronze <input type="radio"/> Foscooper <input type="radio"/> Solda Convencional <input type="radio"/> Solda Exotérmica		<input checked="" type="radio"/> Cavilhada com Juntas de Bronze <input type="radio"/> Foscooper <input type="radio"/> Solda Convencional <input type="radio"/> Solda Exotérmica			

Figura 25 – Menu secções dos condutores de aterramento sem secções definidas.

A Figura 26 ilustra o menu das características da rede de aterramento projectada. O utilizador deve indicar as dimensões, disposições dos elementos e se há eléctrodos verticais na periferia da rede de terra.

INICIO	SOLO	CONDUTOR	MALHA	CURTO CIRCUITO	RESULTADOS
Comprimento da Malha [m]		<input type="text" value="50"/>	Profundidade da Malha [m]		<input type="text" value="0.6"/>
Largura da Malha [m]		<input type="text" value="50"/>	Número de Hastes		<input type="text" value="20"/>
Corrente da Malha [A]		<input type="text" value="1600"/>	Comprimento de 1 Haste [m]		<input type="text" value="3"/>
Espaçamento entre os Condutores [m]		<input type="text" value="10"/>	Comp Total de Condutores Horizontais [m]		<input type="text" value="600"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Hastes na Periferia da Malha					

Figura 26 – Menu características da rede de aterramento.

O comprimento total de condutores horizontais refere-se ao condutor de cobre, sendo a soma de cada traçado que compõe a malha sem levar em consideração o condutor de ligação dos equipamentos eléctricos e os eléctrodos verticais.

Os últimos parâmetros a serem inseridos são os dados do estudo de curto-circuito da subestação eléctrica no menu características de curto-circuito, Figura 27. Tais parâmetros são de extrema importância num projecto de rede de aterramento. Todos os resultados gerados pelo aplicativo estão ligados diretamente ou indiretamente à corrente e ao tempo máximos de falta da subestação.

INÍCIO SOLO CONDUTOR MALHA CURTO CIRCUITO RESULTADOS

Peso Considerado:  
 50 kg  70 kg

Duração Máxima de Curto Circuito [s]

Corrente Máxima de Curto Circuito [A]

CALCULAR LIMPAR DADOS

Figura 27 – Menu características de curto-circuito.

Se a rede estiver dentro dos limites de segurança definidos em [6], a lâmpada ficará verde. Senão, permanecerá vermelha. A Figura 28 apresenta o conjunto de resultados gerados pelo aplicativo.

INÍCIO SOLO CONDUTOR MALHA CURTO CIRCUITO RESULTADOS

Secção do Condutor da Malha [mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="70"/>	Potencial Máximo de Toque Tolerável [V]	<input type="text" value="789.3"/>
Secção do Condutor de Ligação [mm <sup>2</sup> ]	<input type="text" value="70"/>	Potencial Máximo de Passo Tolerável [V]	<input type="text" value="2665"/>
Resistência da Rede de Terra [ohm]	<input type="text" value="3.71"/>	Potencial Máximo de Toque da Rede [V]	<input type="text" value="1060"/>
GPR [V]	<input type="text" value="5935"/>	Potencial Máximo de Passo da Rede [V]	<input type="text" value="502.9"/>
Comprimento Mínimo de Condutores [m]	<input type="text" value="934.9"/>	Potencial Máximo de Toque da Cerca [V]	<input type="text" value="320"/>

Situação da Rede de Terra ●

Figura 28 – Resultados dos cálculos da rede de aterramento projectada.

A rede de aterramento projectada não está dentro dos limites da norma de segurança IEEE Std. 80 [6], Figura 28, logo deve ser ajustada. Como apresentado no capítulo 3, a rede de aterramento da subestação deve apresentar valores de potenciais máximos de toque e passo menores do que os potenciais toleráveis com uma resistência de terra recomendável inferior a 5  $\Omega$ .

As soluções mais utilizadas para reduzir esses parâmetros são: aumento de condutores horizontais e eléctrodos verticais na rede de terra; arredondamento dos cantos da malha para diminuir o efeito das pontas; aumento da área do sistema de aterramento; e o reaterro do terreno da subestação para diminuir a resistividade do solo.

Tomando por exemplo as alternativas anteriores, uma solução para este caso é aumentar a quantidade de condutores horizontais e eléctrodos verticais da rede. O comprimento mínimo de condutores gerado pelo algoritmo é 934,90 m e a rede de terra projectada tem 660 m (600 m de condutores horizontais e 60 m de eléctrodos verticais). A Figura 29 ilustra a configuração atualizada da rede de aterramento.

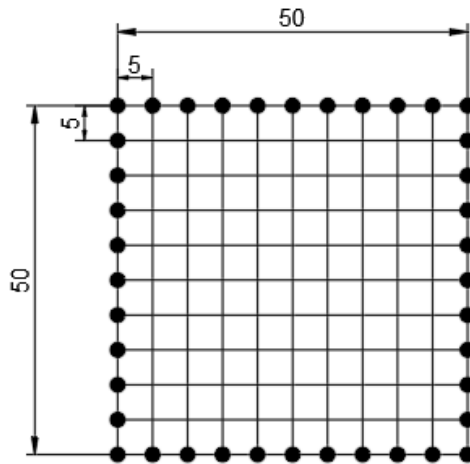


Figura 29 – Configuração atualizada da rede de aterramento com mais condutores horizontais e elétrodos verticais. Comprimentos em metros.

Essa configuração possui as mesmas características que a anterior, porém, com 1100 m de condutores horizontais e 40 elétrodos verticais. A Figura 30 mostra que a rede de aterramento passou a cumprir os requisitos da norma de segurança IEEE Std. 80 [6] após aumentar sua a quantidade total de condutores.

INÍCIO	SOLO	CONDUTOR	MALHA	CURTO CIRCUITO	RESULTADOS
Secção do Condutor da Malha [mm <sup>2</sup> ]		70		Potencial Máximo de Toque Tolerável [V]	789.3
Secção do Condutor de Ligação [mm <sup>2</sup> ]		70		Potencial Máximo de Passo Tolerável [V]	2665
Resistência da Rede de Terra [ohm]		3.299		Potencial Máximo de Toque da Rede [V]	598.3
GPR [V]		5279		Potencial Máximo de Passo da Rede [V]	455
Comprimento Mínimo de Condutores [m]		979.6		Potencial Máximo de Toque da Cerca [V]	350.8
Situação da Rede de Terra					<span style="color: green;">●</span>

Figura 30 – Resultados do ajuste da rede de aterramento.

#### 4.2 Validação do aplicativo

Os resultados das simulações feitas no aplicativo de cálculo de aterramento foram comparados aos de artigos, livros e da norma IEEE Std. 80 Anexo B presentes em [6], [9], [10] e [18].

Foram considerados 3 cenários distintos para validar o aplicativo desenvolvido, e seus dados encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de entrada dos 3 cenários.

Parâmetro	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Unidade
$\rho_1$	50	100	400	$\Omega.m$
$\rho_2$	50	20	400	$\Omega.m$
$H$	10,000	1,000	-	m
$\rho_S$	-	-	2500	$\Omega.m$
$h_s$	-	-	0,102	m
$S_{cond}$	-	67	67	$mm^2$
$S_{lig}$	-	67	67	$mm^2$
$L_x$	100,00	100,00	70,00	m
$L_y$	100,00	100,00	70,00	m
$I_m$	-	1000	1908	A
$D$	-	12,50	7,00	m
Haste na periferia	SIM	SIM	SIM	-
$h$	0,50	0,50	0,50	m
$N$	32	32	20	und
$L_r$	3,00	2,00	7,50	m
$L_c$	-	1800,00	1540,00	m
Peso considerado	-	-	70	kg
$t_{defeito}$	-	-	0,50	s
$I_{curto_{m\acute{a}x}}$	-	-	3180	A

O primeiro cenário, presente em [9], considera um solo homogêneo com um sistema de aterramento composto por malha quadrada e elétrodos verticais ao longo de sua periferia. Buscou-se avaliar apenas a resistência de aterramento num primeiro momento. Os dados para a simulação do cenário 1 são apresentados na coluna 2 da Tabela 2 e seu modelo inicial de rede de terra encontra-se na Figura 31.

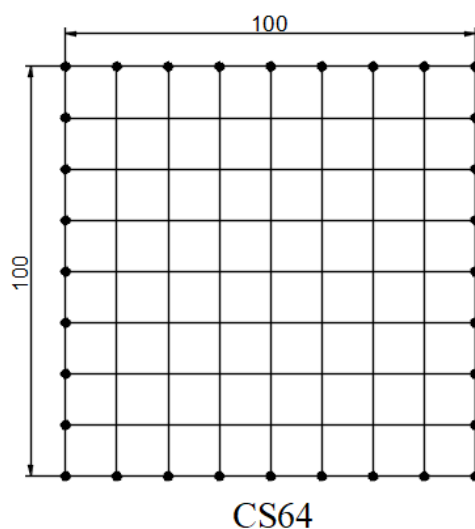


Figura 31 – Configuração da rede de terra do cenário 1. Comprimentos em metros [9 adaptada].

Tabela 3 – Cenário 1: Resultados de resistência da rede de aterramento para solo homogêneo.

	Resistência de Aterramento [ $\Omega$ ]	Desvio Relativo [%]
Fórmula [6] [18]	0,2475	0,2828
Artigo [9]	0,2468	0,0000
Aplicativo	0,2468	-

Os resultados de resistência da rede de aterramento, presentes na Tabela 3, convergiram para todos os casos, mesmo com [6] e [18] utilizando uma fórmula genérica que só admite solos homogêneos, e [9] e o aplicativo desenvolvido utilizando fórmulas para solos estratificados até duas camadas.

Ainda no cenário 1, porém, admitindo um solo heterogêneo com resistividade da primeira camada igual a 50  $\Omega$ .m e da segunda 250  $\Omega$ .m, obteve-se os resultados presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Cenário 1: Resultados de resistência da rede de aterramento para solo heterogêneo.

	Resistência de Aterramento [ $\Omega$ ]	Desvio Relativo [%]
Fórmula [6] [18]	0,6143	9,0590
Artigo [9]	0,6700	0,0000
Aplicativo	0,6700	-

Os valores utilizados na fórmula da resistência de [6] e [18] foram aproximados, uma vez que tais referências admitem apenas solos homogêneos com resistividade aparente. Já a fórmula utilizada em [9] e no aplicativo usa um fator de correção de solos heterogêneos, o que explica a diferença entre os resultados.

A configuração de rede de aterramento da Figura 31 também foi admitida para o cenário 2 presente em [10]. Neste momento é interessante analisar o potencial máximo de toque da rede considerando o fator de correção para solos heterogêneos. A coluna 3 da Tabela 2 apresenta os dados simulados no cenário 2.

O cenário 2 foi simulado 3 vezes considerando a relação da resistividade da segunda com a primeira camada: menor que 1; igual a 1; e maior que 1. Essa relação está ligada diretamente com o fator de correção para solos heterogêneos, por isso, é importante avaliar os 3 resultados.

Tanto o artigo [10] quanto o aplicativo resultaram em um potencial de toque máximo da rede de aterramento de 59,46 V com a relação das resistividades igual a 0,2; de 144,10 V com a relação igual a 5; e [10] de 101,13 V e o aplicativo de 101,10 V com a relação igual a 1.

A norma IEEE Std. 80 [6] apresenta uma série de exemplos de cálculo de sistemas de aterramento para solos homogêneos. O cenário 3 utiliza um exemplo presente no Anexo B.2 da norma [6] assumindo o modelo de rede de aterramento ilustrado na Figura 32. Os dados simulados para este cenário encontram-se na coluna 4 da Tabela 2.

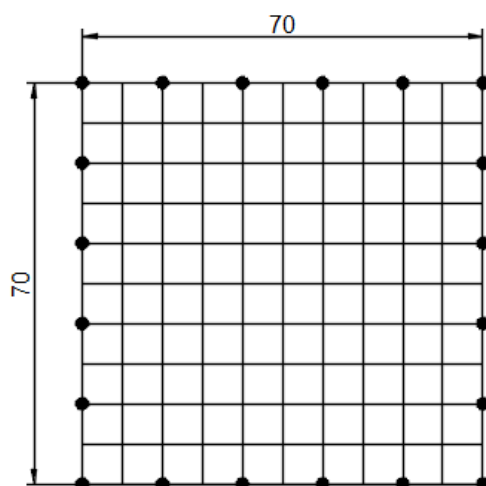


Figura 32 – Configuração da rede de terra do cenário 3. Comprimentos em metros [6 adaptada].

Tabela 5 – Cenário 3: Resultados gerais.

	IEEE Std. 80 [6]	Aplicativo	Desvio Relativo [%]
Potencial de toque máx admissível [V]	838,20	840,50	0,2744
Potencial de passo máx admissível [V]	2686,60	2696,00	0,3499
Potencial de toque máx da rede [V]	747,40	749,10	0,2275
Potencial de passo máx da rede [V]	548,90	549,10	0,0364
Potencial de toque máx da cerca [V]	-	377,20	-
Resistência da rede de terra [ $\Omega$ ]	2,750	2,707	1,5600
GPR [V]	5247,00	5165,00	1,5628
Comprimento mín do condutor [m]	-	1592,00	-
Secção dos condutores da malha [mm <sup>2</sup> ]	67	67	-

Os valores gerados na simulação ficaram próximos dos da norma, Tabela 5. Nenhum parâmetro calculado obteve desvio relativo superior a 2 %, provando que o aplicativo também é capaz de efetuar cálculos para solos homogêneos.

O cenário 1 mostrou que o aplicativo calcula corretamente a resistência de aterramento para solos homogêneos e heterogêneos estratificados até duas camadas. Já o cenário 2 provou que o programa é capaz de calcular com precisão o fator de correção de solos heterogêneos e, portanto, apresenta um potencial máximo de toque da rede de terra

coerente com [10]. Já o cenário 3 confirmou que, no ponto de vista da engenharia, o aplicativo desenvolvido é confiável e gera resultados compatíveis com os da literatura presente nesta dissertação.

### **4.3 Condições finais do aplicativo**

O aplicativo possui algumas condições referentes ao material dos condutores, à configuração da malha de aterramento e à estratificação do solo. O programa é capaz de efetuar cálculos para os sistemas com as seguintes características:

- Solos homogêneos e heterogêneos estratificados em duas camadas;
- Condutores horizontais de cobre;
- Malhas quadradas e retangulares;
- Corrente da malha de aterramento uniforme;
- Cerca metálica acompanhando o perímetro da malha e aterrada na mesma;
- Elétrodos verticais igualmente espaçados.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

O aplicativo desenvolvido através do programa *MatLab* é capaz de realizar cálculos de sistema de aterramento de subestações elétricas instaladas em solos homogêneos e heterogêneos de duas camadas. O sistema de aterramento é responsável por dissipar as correntes de descargas atmosféricas e de defeito das subestações, garantindo a segurança das pessoas que ali transitam e dos equipamentos elétricos.

A metodologia empregada foi baseada em [6], [9], [10] e [18], e possibilitou que o aplicativo apresentasse os principais parâmetros para a análise do sistema de aterramento: resistência de terra; GPR; comprimento mínimo de condutores; secções de condutores da malha e de ligação dos equipamentos elétricos; potenciais máximos de toque e passo toleráveis; e potenciais máximos de toque e passo da rede de aterramento e da cerca metálica que envolve a subestação.

Adicionou-se ao aplicativo um aviso em forma de lâmpada para facilitar o entendimento dos resultados gerados. O utilizador recebe informações importantes para a otimização do sistema, como por exemplo o comprimento mínimo de condutores. Desse modo, o projectista pode ajustar a rede de terra de acordo com os resultados do aplicativo considerando uma análise econômica do projecto.

A interface gráfica *App Designer* disponível no programa *MatLab* foi utilizada para a construção do aplicativo seguindo os passos do algoritmo. Tal interface permitiu que o aplicativo desenvolvido fosse salvo em um programa executável sem a necessidade de o utilizador ter o *MatLab* instalado em sua máquina.

O programa gerou resultados satisfatórios comparados aos exemplos escolhidos de cálculo de sistema de aterramento de subestação. O desvio relativo de cada parâmetro calculado foi inferior a 2 %, apenas a resistência de aterramento para solos heterogêneos apresentou desvio maior, devido às aproximações necessárias em [6] e [18] para a obtenção da resistividade aparente.

O aplicativo mostrou-se confiável e uma ótima ferramenta para a análise de sistema de aterramento de subestações elétricas. Ele efetua cálculos para solos estratificados até duas camadas; condutores de cobre; malhas de geometrias quadrada e retangular; corrente de malha uniforme; e hastes igualmente espaçadas ao redor da malha de aterramento. As subestações geralmente são instaladas em sistemas desse tipo, portanto, tais condições não apresentam prejuízo para o aplicativo.

## **5.2 Trabalhos futuros**

O programa calcula parâmetros para malhas quadradas e retangulares. Fórmulas capazes de calcular parâmetros de malhas com outras geometrias poderiam ser implementadas no algoritmo para aumentar sua versatilidade, uma vez que também existem subestações instaladas em “L”. A geração de eletricidade através de fontes renováveis tem crescido no mundo inteiro, portanto, seria importante realizar um estudo aprofundado sobre o aterramento de outros sistemas elétricos mais complexos, como turbinas eólicas, que possuem áreas inferiores que as de subestações e correntes de curto-circuito altas.

O aplicativo desenvolvido gera resultados de potenciais máximos de toque e passo da rede e da cerca. O programa também poderia apresentar tais resultados graficamente, mostrando as curvas dos potenciais ao longo de um determinado comprimento para indicar os pontos fora da área da subestação que estão expostos aos potenciais acima do permitido.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] AAMB Cotrim – “Proteção contra choques elétricos. Instalações elétricas” – Makron Books, 3ed, São Paulo, SP, pg 130, 1995.
- [2] N Mohamad, S Abdullah, R Rajab, Z Othman – “Comparison between utility sub-station and imitative earthing systems when subjected under lightning response” – International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 43, pg 156-161, Dez 2012.
- [3] SC Lim, C Gomes, MZAA Kadir – “Electrical earthing in troubled environment” – International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 47, pg 117-128, Maio 2013.
- [4] Y Khan, FR Pazheri, NH Malik, AA Al-Arainy, MI Qureshi – “Novel approach of estimating grounding pit optimum dimensions in high resistivity soils” – Electric Power Systems Research, vol. 92, pg 145-154, Nov 2012.
- [5] N Mohamad, R Rajab, Z Othman – “Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (GIS)” – International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 43, pg 190-294, Dez 2012.
- [6] ANSI/IEEE Std. 80-2013: “Guide for Safety in AC Substation Grounding”, pg 1-226, 15 Maio 2015.
- [7] R Batista, CEF Caetano, JOS Paulino, WC Boaventura, IJS Lopes, EN Cardoso – “A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models” – Electric Power Systems Research, vol. 180, pg 106-129, Mar 2020.
- [8] JM Beltani – “Medição de malha de terra em subestações energizadas” – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica, São Paulo, SP, Fev 2007.
- [9] JM Nahman e VB Djordjevic – “Resistance to Ground of Combined Grid-Multiple Rods Electrodes” – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 3, pg 1337-1342, Jul 1996.
- [10] JM Nahman e VB Djordjevic – “Nonuniformity Correction Factors for Maximum Mesh-and Step-Voltages of Ground Grids and Combined Ground Electrodes” – IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 3, pg 1263-1269, Jul 1995.

- [11] KA Vyas e JG Jamnani – “Development of IEEE Complaint Software ‘Economical Substation Grounding System Designer’ Using MATLAB GUI Development Environment” – *Internacional Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 4, no. 2, pag 335-346, Ago 2012.
- [12] Q. Zhang e X. Wu – “Software Development of Optimal Substation Ground Grid Design Based on Genetic Algorithm and Pattern Search” – 2014 North American Power Symposium (NAPS), pg 1-6, Nov 2014.
- [13] S. Kara, O. Kalenderli e O. Altay – “Optimum Grounding Grid Design by using Genetic Algorithms” – 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), pg 1117-1121, Fev 2016.
- [14] SSM Ghoneim e IBM Taha – “Control the Cost, Touch and Step Voltages of the Grounding Grids Design” – *IET Science, Measurement and Technology*, Jul 2016.
- [15] A Taher, A Said, T Hamama e AH Hamza – “Optimum Design of Substation Grounding Grid Based on Grid Balancing Parameters using Genetic Algorithm” – 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Dez 2018.
- [16] SSM Ghoneim, A Hoballah e NA Sabiha – “Framework for Optimal Grounding System Design concerning IEEE Standard” – *Springer Journal*, vol. 101, no. 4, pg 1261-1276, Dez 2019.
- [17] J Mamede Filho – “Instalações Elétricas Industriais”, 7ed.
- [18] G Kindermann e JM Campagnolo – “Aterramento Elétrico”, 3ed, Porto Alegre, RS, 1995.
- [19] ANSI/IEEE Std. 81-2012: “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”, pg 1-86, 28 Dez 2012.
- [20] PVS Borges, DG Ribeiro e VSB Muniz – “Estratificação do Solo para Projetos de Aterramento Elétrico Utilizando Evolução Diferencial” – *ERMAC, Semana da Matemática UFES, São Mateus, ES*, 2018.
- [21] WP Calixto, AP Coimbra, B Alvarenga, JP Molin, A Cardoso e LM Neto – “3-D Soil Stratification Methodology for Geoelectrical Prospection” – *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, no. 3, pg 1636–1643, Jul 2012.
- [22] DL Garrett, IEEE Power Engineering Society, Power Engineering Education Committee e Substation Committee – “Practical Applications of ANSI/IEEE Standard 80-1986, IEEE Guide for Safety” – *IEEE Tutorial Course*, 1986.
- [23] J Modena e H Sueta – “Projeto de Aterramento de Malhas de Subestações Elétricas: Cálculo da Corrente de Malha” – *Revista O Setor Elétrico*, 63ed, cap IV, pg 47, Mai 2011.

- [24] CF Dalziel – “Dangerous Electric Currents” – AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 65, pg 579–585, 1123–1124, 1946.
- [25] CF Dalziel – “Electric Shock Hazard” – IEEE Spectrum, pg 41–50, Fev 1972.
- [26] ABNT/NBR 15751:2009: “Sistemas de Aterramento de Subestações”, pg 14-21, Set 2009.
- [27] S Visacro – “Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramentos”, pg 122, São Paulo, SP, 2002.