

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**GEOMETRIA DE MALHA DE ATERRAMENTO
ELÉTRICO OTIMIZADA**

Carlos Leandro Borges da Silva

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
27 de dezembro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Carlos Leandro Borges da Silva

3. Título do trabalho

“Geometria de malha de aterramento elétrico otimizada”

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(a) autor(a) e ao(a) orientador(a);
 - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 26/12/2022, às 11:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Leandro Borges Da Silva, Discente**, em 26/12/2022, às 18:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3424158** e o código CRC **31BD6281**.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA,
MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO

**GEOMETRIA DE MALHA DE ATERRAMENTO
ELÉTRICO OTIMIZADA**

Carlos Leandro Borges da Silva

Tese apresentada à Banca Examinadora como exigência parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), sob a orientação do Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto e supervisão do Prof. PhD. Stephen Edward Sadow da *University South of Florida* (USF).

[UFG] & [EMC]
[Goiânia - Goiás - Brasil]
27 de dezembro de 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Silva, Carlos Leandro Borges da
Geometria de Malha de Aterramento Elétrico Otimizada
[manuscrito] / Carlos Leandro Borges da Silva. - 2022.
CXX, 120 f.

Orientador: Prof. Dr. Wesley Pacheco Calixto.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Goiânia, 2022.
Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Aterramento elétrico. 2. Processo de otimização. 3. Geometria de malha. 4. Algoritmo de Heppe. I. Calixto, Wesley Pacheco, orient. II. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 08 da sessão de Defesa de Tese de **Carlos Leandro Borges da Silva** que confere o título de Doutor em **Engenharia Elétrica e de Computação**, na área de concentração em **Engenharia Elétrica**.

Aos **trinta dias do mês de setembro de dois mil e vinte e dois**, a partir das 14h00min., realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada **“Geometria de malha de aterramento elétrico otimizada”**. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Wesley Pacheco Calixto** - Orientador (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. **Alana da Silva Magalhães** - Membro Externo (ELE/IFG), Prof. Dr. **Márcio Rodrigues da Cunha Reis** - Membro Externo (ENGPROD/IFG), Prof. Dr. **Rodrigo Pinto Lemos** - Membro Interno (EMC/UFG) e Prof. Dr. **José Wilson Lima Nerys** - Membro Externo (EMC/UFG), cujas participações ocorreram através de videoconferência: link: meet.google.com/irm-wvzd-ctf. Durante a argüição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Wesley Pacheco Calixto, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos trinta dias do mês de setembro de dois mil e vinte e dois.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **MÁRCIO RODRIGUES DA CUNHA REIS, Usuário Externo**, em 10/10/2022, às 15:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wesley Pacheco Calixto, Usuário Externo**, em 10/10/2022, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS LEANDRO BORGES DA SILVA, Discente**, em 10/10/2022, às 17:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ALANA DA SILVA MAGALHAES, Usuário Externo**, em 10/10/2022, às 19:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Pinto Lemos, Professor do Magistério Superior**, em 14/10/2022, às 19:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Wilson Lima Nerys, Professor do Magistério Superior**, em 26/10/2022, às 16:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3254162** e o código CRC **83C963C8**.

"Posso todas as coisas em Cristo que me fortalece."

FELIPENSES 4:13

*A minha esposa Alana, minhas filhas Maria Alice e
Cecilia e aos meus pais.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por, ter me dado força durante esta caminhada e por ter suprido todas as minhas necessidades. A minha amada esposa Alana Vanessa Sousa Santos Borges por ser minha adorada e companheira em todos os momentos. A minhas filhas queridas Maria Alice Sousa Borges e Cecilia Sousa Borges, por serem pacientes e em muitos momentos privadas da minha companhia e atenção. Agradeço aos meus pais José Carlos da Silva e Margareth Borges Sena Silva que me incentivaram a enfrentar esse novo desafio. Aos meus irmãos José Carlos Sena da Silva e Wanessa Sena da Silva, minhas sobrinhas Ana Beatriz Sena, Michelly Sena e meu sobrinho Davi Miguel Sena, que estiveram sempre ao meu lado. Ao orientador e Prof. Wesley Pacheco Calixto, pela dedicação durante a orientação, incentivo, paciência, atenção e preocupação permanente com a pesquisa. Aos meus tios, tias, primos e primas paternos e maternos, minha tia Evilênha Borges Sena (*in memorian*), minhas avós Maria do Socorro Borges Sena (*in memorian*) e Maria Rosa Silva (*in memorian*), meus avôs Evilásio Sena (*in memorian*) e José da Silva (*in memorian*) e minha sogra Maria do Rosário. Aos colegas e amigos do Doutorado, que também contribuíram de forma significativa para o trabalho. Aos amigos da Igreja Batista Renascer e amigos da Seinfra/UFG que contribuíram moralmente com a consecução deste trabalho em especial ao amigo Thyago Gumeratto pela ajuda durante as etapas do trabalho. Ao Prof. Stephen E. Sadow (*USF- University South of Florida*), pelo acolhimento nos Estados Unidos. A CAPES por ter auxiliado através de financiamento do intercâmbio na USF através do programa COFECUB/CAPES.

RESUMO

Este trabalho apresenta metodologia para o cálculo da resistência de terra, elevação do potencial da malha, potencial na superfície do solo, tensão de toque e da tensão de passo em malhas de aterramento com geometria otimizada em solos estratificados em duas camadas. Os valores do potencial e das tensões de toque e de passo são obtidos em qualquer ponto sobre a malha. O equacionamento proposto utiliza os métodos das imagens, do potencial médio e a principal característica desta modelagem em relação às demais é a possibilidade do cálculo de malhas contendo eletrodos horizontais e verticais posicionados a qualquer distância e em qualquer ângulo. Os resultados obtidos apresentam a redução de aproximadamente 60% no quantitativo de condutores e aproximadamente 30% no quantitativo de hastes verticais em malhas de aterramento elétrico. A otimização da geometria de malha apresentada neste trabalho possibilita a criação de malhas de aterramento elétrico que atendam os critérios de segurança com menor custo se comparada com métodos tradicionais, além de possibilitar redução de efeito indutivo em decorrência de menor quantidade de condutores na malha de aterramento.

OPTIMIZED ELECTRICAL GROUNDING GRIDS GEOMETRY

ABSTRACT

This work presents a methodology for calculating earth resistance, grid potential elevation, soil surface potential, touch voltage and step voltage in ground grids with optimized geometry in two-layer stratified soils. The values of the potential and touch and step voltages are obtained at any point on the grid. The proposed equation uses the methods of images and an average potential. The main characteristic of this model in relation to the others is the possibility of calculating grounding grids containing horizontal and vertical electrodes positioned at any distance and at any angle. The results obtained with the proposed methodology are presented and discussed. The results show a reduction of approximately 60% in the amount of horizontal conductors and approximately 30% in the amount of vertical rods in electrical grounding grids. The optimization of the grounding grids geometry presented in this work allows the creation of electrical grounding grids that meet the safety criteria with lower cost compared to traditional methods, in addition to allowing the reduction of the inductive effect due to a smaller amount of conductors in the grounding grids.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO 27

**CAPÍTULO 2 PROJETO DA MALHA DE ATERRAMENTO
ELÉTRICO 33**

2.1 Parâmetros de projeto da malha de aterramento 33

2.1.1 Caracterização do solo 33

2.1.2 Resistividade elétrica aparente do solo 34

2.1.3 Medição da resistividade elétrica do solo 35

2.2 Processo de estratificação do solo em camadas horizontais 36

2.2.1 Estratificação horizontal do solo em duas camadas 37

2.3 Corrente de falta 38

2.3.1 Componente zero da corrente de falta 39

2.3.2 Efeito da corrente de falta assimétrica 41

2.4 Corrente aplicada à malha de aterramento elétrico 41

2.5 Dimensionamento térmico e mecânico do condutor 43

2.6 Parâmetros da malha de aterramento 43

2.6.1 Elevação do potencial da malha de aterramento 44

2.6.2 Tensão de toque 45

2.6.3 Tensão de passo 45

2.6.4 Máxima permitida para tensão de passo e tensão de toque 45

2.6.5 Resistência da malha de aterramento elétrico 46

2.7 Considerações finais 47

CAPÍTULO 3 MODELAGEM DO POTENCIAL NA SUPERFÍCIE DO SOLO E RESISTÊNCIA MÚTUA 49

3.1 Potencial elétrico na superfície do solo homogêneo 49

3.1.1	Potencial elétrico na superfície do solo com estratificação em duas camadas horizontais	53
3.2	Resistência mútua em segmentos na camada superior do solo	55
3.3	Resistência mútua em segmentos na camada inferior do solo	56
3.4	Resistência mútua em solo homogêneo	59
3.4.1	Resistência própria	59
3.5	Determinação da função M	59
3.6	Potencial em hastes verticais	62
3.7	Considerações finais	63
CAPÍTULO 4 OTIMIZAÇÃO		65
4.1	Sistema, modelo e simulação	65
4.2	Processo de otimização	66
4.3	Métodos de otimização	66
4.3.1	Algoritmo genético	67
4.3.1.1	Características do algoritmo genético	67
4.3.2	Algoritmo por enxame de partículas	69
4.3.3	Análise de sensibilidade de sistemas	71
4.4	Considerações finais	72
CAPÍTULO 5 METODOLOGIA		75
5.1	Contextualização	75
5.2	Segmentação da malha de aterramento elétrico	76
5.2.1	Desenvolvimento do sistema matricial e cálculo das tensões	77
5.3	Simulador proposto para malha de aterramento elétrico	78
5.3.1	Mudança de coordenadas e posição relativa dos segmentos	79
5.3.2	Dados de entrada e saída do simulador	84
5.4	Processo de otimização aplicado à malha de aterramento elétrico	85
5.4.1	Algoritmo de otimização proposto	85
5.5	Considerações finais	90
CAPÍTULO 6 RESULTADOS		91
6.1	Teste e validação do simulador	91
6.2	Dados de entrada para o processo de otimização	95
6.3	Estudo de Caso 1	95
6.4	Estudo de Caso 2	97
6.5	Estudo de Caso 3	98
6.6	Estudo de Caso 4	99

6.7	Estudo de Caso 5	103
6.8	Discussão	106
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO		109
7.1	Contribuições do Trabalho	110
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		113

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Solo Estratificado: (a) sistema real e (b) modelo aproximado.	34
2.2 Caminho da corrente elétrica no solo.	35
2.3 Arranjo de Wenner.	36
2.4 Modelo de solo estratificado em duas camadas.	37
2.5 Curva de resistividade \times distâncias entre as hastes.	38
2.6 Corrente da malha em sistema com cabo guarda.	42
2.7 Representação das tensões de toque, passo e elevação do potencial da malha.	44
3.1 Potencial elétrico em meio homogêneo: (a) fonte de corrente pontual em sistema com dois meios e (b) ondas emitidas, refletidas e refratadas. . . .	50
3.2 Sistema para ponto no mesmo meio da fonte.	51
3.3 Imagens refletidas da fonte na camada superior do solo estratificado em duas camadas.	54
3.4 Segmentos em solo estratificado em duas camadas.	55
3.5 Imagens refletidas entre segmento fonte e segmento receptor na primeira camada do solo.	56
3.6 Imagens refletidas entre segmento fonte e segmento receptor na camada inferior do solo.	57
3.7 Imagens refletidas da fonte na camada inferior e segmento receptor na camada superior.	58
3.8 Diagrama correspondente: (a) posição relativa entre segmentos em ângulo e (b) bidimensional da posição relativa entre segmentos em ângulo. . . .	60
3.9 Diagrama correspondente: (a) posição relativa entre segmentos paralelos e (b) posição relativa entre segmentos perpendiculares.	60
3.10 Haste vertical em solo homogêneo.	63
4.1 Algoritmo genético clássico.	68
4.2 Matriz Populacional do Algoritmo Genético.	68
4.3 Algoritmo enxame de partículas clássico.	71
4.4 Áreas para análise de sensibilidade dos parâmetros.	72
5.1 Fluxograma da metodologia proposta.	76
5.2 Divisão do eletrodo de terra em segmentos.	77
5.3 Pontos de medição/cálculo da tensão de passo.	79
5.4 Fluxograma do simulador proposto.	80

5.5	Ilustração do sistema de coordenadas $x \times y$ e $x' \times y'$	80
5.6	Ilustração do sistema de coordenadas $x' \times y'$ e $u \times v$	81
5.7	Ilustração do sistema com segmentos paralelos colineares.	82
5.8	Ilustração do sistema com segmentos paralelos não colineares.	82
5.9	Ilustração do sistema com segmentos perpendiculares.	83
5.10	Ilustração do sistema com segmentos oblíquos.	84
5.11	Fluxograma do processo de otimização proposto.	86
5.12	Ilustração da matriz bidimensional com as coordenadas de formação de um indivíduo da população: a) segmentos horizontais e b) hastes verticais.	86
5.13	Ilustração da criação de novos indivíduos a partir da matriz inicial.	87
5.14	Ilustração da criação da nova população a partir do processo de cruzamento e mutação.	88
5.15	Ilustração da criação da matriz tridimensional que forma a população de determinada geração.	88
5.16	Ilustração da criação da malha: a) com segmento passando fora dos limites de área e b) com segmentos tratados.	89
6.1	Malhas convencionais utilizadas para validar cálculo de resistência do simulador.	91
6.2	Malhas de aterramento elétrico convencionais: a) quadrada, b) geometria em L e c) geometria em T.	93
6.3	Comprimento da malha \times resistividade do solo.	96
6.4	Comprimento da malha \times profundidade da malha no solo.	98
6.5	Malha de aterramento com geometria otimizada para o Estudo de Caso 3.	99
6.6	Identificação das tensões do Estudo de Caso 3: a) tensão de superfície, b) tensão de toque e c) tensão de passo.	100
6.7	Malha de aterramento com geometria otimizada para o Estudo de Caso 4.	101
6.8	Identificação das tensões do Estudo de Caso 4: a) tensão de superfície, b) tensão de toque e c) tensão de passo.	102
6.9	Área para malha de aterramento do Estudo de Caso 5.	103
6.10	Malha de aterramento com geometria otimizada para o Estudo de Caso 5.	104
6.11	Identificação das tensões do Estudo de Caso 5: a) tensão de superfície, b) tensão de toque e c) tensão de passo.	105

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
6.1 Resultado comparativo entre o método proposto e os demais métodos. . .	92
6.2 Tensão de passo em solo homogêneo.	93
6.3 Tensão de toque em solo homogêneo.	94
6.4 Tensão de passo em solo heterogêneo.	94
6.5 Tensão de toque em solo heterogêneo.	94
6.6 Comprimento da malha \times resistividade do solo para o Estudo de Caso 1.	96
6.7 Comprimento da malha \times profundidade da malha para o Estudo de Caso 2.	97
6.8 Valores dos parâmetros da malha de aterramento elétrico do Estudo de Caso 3.	98
6.9 Valores dos parâmetros da malha de aterramento elétrico do Estudo de Caso 4.	101
6.10 Valores dos parâmetros da malha de aterramento elétrico do Estudo de Caso 5.	103

LISTA DE SÍMBOLOS

α_0	–	Coefficiente de resistividade térmica a 0°
α_r	–	Coefficiente de resistividade térmica na temperatura de referência
β	–	Declividade do segmento em relação a abscissa
γ	–	Penalização usada na função de avaliação
θ	–	Ângulo relativo entre dois segmentos
λ	–	Multiplicador de Lagrange
φ	–	Parâmetro que define o percentual de progresso do OED
ρ	–	Resistividade elétrica do solo
$\rho_a(a)$	–	Resistividade elétrica aparente do solo
ρ_1	–	Resistividade elétrica da primeira camada do solo
ρ_2	–	Resistividade elétrica da segunda camada do solo
ρ_r	–	Resistividade elétrica do condutor na temperatura de referência
$\rho_{aE}(a)$	–	Curva de resistividade elétrica aparente experimental
$\rho_{aT}(a)$	–	Curva de resistividade elétrica aparente teórica
σ	–	Condutividade elétrica do solo
$\sigma_a(a)$	–	Condutividade elétrica aparente do solo
a	–	Raio do eletrodo
A_f	–	Área da superfície da esfera
b	–	Profundidade do eletrodo cravado verticalmente no solo
C_n	–	Cromossomos do algoritmo genético
d	–	Espaçamento entre eletrodos cravados verticalmente no solo
D	–	Profundidade da malha de aterramento elétrico
D_f	–	Fator de decaimento devido efeito da assimetria
E	–	Campo elétrico gerado por fonte pontual de corrente
f	–	Frequência do sistema
G_n	–	Genes do algoritmo genético
GPR	–	Elevação de potencial da malha de aterramento
h_1	–	Profundidade da primeira camada do solo
h_2	–	Profundidade da segunda camada do solo
i	–	Corrente de dispersão para o solo do segmento
I	–	Corrente aplicada no solo pelo terrômetro
I_0	–	Valor simétrico eficaz da componente de sequência zero da corrente de falta
I_F	–	Corrente eficaz de falta afetada pelo fator de decaimento
I_f	–	Corrente de falta
I_g	–	Corrente aplicada na malha de aterramento
J	–	Densidade de corrente
K	–	Coefficiente de reflexão
L	–	Comprimento do segmento
P_i	–	vetor de pesos da função de avaliação
r_0	–	Distância entre a fonte pontual de corrente e ponto no solo

r'_0	– Distância entre a imagem simétrica da fonte pontual e ponto no solo
$r_n r'_n$	– Distância entre as demais imagens da fonte pontual e ponto no solo
R_0	– Resistência elétrica equivalente de sequência zero do sistema
R_1	– Resistência elétrica equivalente de sequência positiva do sistema
R_2	– Resistência elétrica equivalente de sequência negativa do sistema
R_f	– Resistência elétrica estimada de falta
R_g	– Resistência elétrica da malha de aterramento
R_{jk}	– Resistência elétrica mútua entre os segmentos j e k
R_{jj}	– Resistência elétrica própria do segmento
R_m	– Resistência elétrica do solo dada pelo terrômetro
S_f	– Fator de divisão da corrente
t_c	– Tempo de duração da falta
T	– Valor encontrado para parâmetros avaliados
T_a	– Constante de tempo da componente contínua
T_{amb}	– Temperatura ambiente
$TCAP$	– Capacidade térmica por unidade de volume
T_i	– Valor dos parâmetros avaliados normalizados
T_m	– Temperatura máxima suportada pelo condutor
T_{max}	– Valor máximo admitido para parâmetro avaliado
V_i	– Taxa de velocidade para a i -ésima partícula do PSO
v_{fonte}	– Potencial induzido pela fonte pontual de corrente
v'_{fonte}	– Potencial induzido pela imagem simétrica da fonte pontual de corrente
v_k	– Potencial induzido no segmento pela corrente de dispersão de outro segmento
v_r	– Potencial resultante induzido no ponto pela fonte de corrente
V_{fase}	– Tensão de fase do sistema
V_m	– Potencial total induzido no sistema
V_{med}	– Tensão medida pelo terrômetro
$V_{médh}$	– Potencial médio na superfície de haste vertical
V_p	– Tensão de passo
V_s	– Potencial total em ponto na superfície do solo
V_t	– Tensão de toque
X_0	– Reatância de sequência zero do sistema
X_1	– Reatância de sequência positiva do sistema
X_2	– Reatância de sequência negativa do sistema
X_i	– Posição no espaço n -dimensional do algoritmo de nuvem de partículas
X_{mont}	– Reatância do sistema a montante da falta
W	– Fator de inércia do PSO

Z_{eq} – Impedância equivalente dos caminhos da corrente elétrica para a terra

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	–	Algoritmo Genético
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	–	American National Standards Institute
CA	–	Corrente Alternada
CC	–	Corrente Contínua
dxf	–	Drawing Exchange Format
GPR	–	Ground Potential Rise
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MEC	–	Método dos Elementos de Contorno
NBR	–	Norma Brasileira de Regulamentação
OCR	–	Taxa de compressão ideal do algoritmo de núvem de partículas
PSO	–	Algoritmo de núvem de partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>)

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Em 2006 entra em vigor no Brasil a Lei nº. 11.337 determinando que edificações com construção iniciadas à partir da referida data, devem obrigatoriamente possuir sistema de aterramento elétrico (BRASIL, 2006). Esta lei faz com que o aterramento elétrico passe a ser visto como mais uma das necessidades básicas das edificações. Para a elaboração do projeto de malhas de aterramento elétrico em frequência industrial ($50Hz/60Hz$), é necessário considerar aspectos de desempenho, que estão associados ao valor da resistência de aterramento e aspectos relacionados a segurança humana, associados à distribuição de potencial na superfície do solo (PEREIRA FILHO, 1999).

O método clássico utilizado para calcular/projetar malhas de aterramento elétrico não requer recursos computacionais (IEEE, 2015). No entanto, apresenta limitações quanto a heterogeneidade do solo, análise de potenciais de superfície e geometria da malha. O método contempla somente malhas com eletrodos equidistantes e com geometrias: i) quadradas, ii) retangulares, iii) em L e iv) em T. Contudo, a geometria da malha de aterramento depende do formato da área onde a malha é instalada (THAPAR et al., 1991). Além disto, estudos comprovam maior eficiência em malhas de aterramento elétrico com eletrodos espaçados não uniformemente (COVITTI et al., 2005).

Dwight (1936) apresenta metodologia para o cálculo de malhas em diversas configurações utilizando o método do potencial médio, desenvolvido inicialmente por Howe (1914) para determinar a capacitância em antenas. Este método é utilizado para obter a contribuição de potencial induzido pelo eletrodo e por sua imagem, gerada pela reflexão do campo elétrico na superfície do solo. No método do potencial médio, assume-se que o eletrodo é constituído por material condutor (hastes e cabos) conduzindo carga elétrica e que a densidade de carga é uniforme ao longo da superfície do eletrodo.

Sverak (1976) apresenta método com vantagens em relação ao método clássico descrito na norma IEEE (2015), pois exibe grau de precisão satisfatório na análise de perfis de potencial nas bordas das malhas de aterramento, região crítica em termos de tensão de passo e tensão de toque. Este método permite realizar estudos de comportamento da malha de aterramento com qualquer espaçamento entre os segmentos horizontais. No entanto, apresenta limitações, pois considera a densidade de corrente

e o solo uniformes em toda a malha de aterramento elétrico.

Heppe (1979) apresenta o método das imagens convencionais, sendo utilizado para o cálculo dos potenciais na superfície do solo. O autor propõe metodologia em que as expressões matemáticas permitem a introdução de eletrodos com qualquer orientação angular e espaçamentos entre si, além de poderem estar situados tanto na camada superior quanto na camada inferior do solo estratificado em até duas camadas. Neste método, a densidade de corrente de dispersão em cada segmento é calculada através de sistema matricial. Contudo, o trabalho de Heppe (1979) apresenta estudos de caso apenas para malhas quadradas contendo eletrodos paralelos e perpendiculares igualmente espaçados.

O método de segmentação dos eletrodos cilíndricos horizontais proposto por Kouteynikoff (1980), permite a representação mais precisa dos cabos horizontais na análise das malhas de aterramento elétrico. O autor apresenta modelo que possibilita a otimização dos eletrodos horizontais da malha, bem como o cálculo da tensão de passo e tensão de toque durante a falta para a terra. Porém sua aplicação é definida para análise de solos considerados uniformes.

Garrett e Pruitt (1985) apresentam análise da sensibilidade para identificar possíveis problemas ao utilizar o método do potencial médio para cálculo de malhas de aterramento elétrico. Os autores consideram a corrente constante ao longo dos segmentos e a corrente de fuga uniforme em torno do perímetro do condutor cilíndrico. Além disto, presumem que a tensão é igual em qualquer lugar do condutor, considerando a média das tensões calculadas em todos os pontos da superfície do condutor, exceto nas extremidades. Os resultados deste estudo apresentam que pode existir erros significativos caso seja considerado que o potencial de superfície é o mesmo ao longo de toda a malha de aterramento elétrico.

Takahashi e Kawase (1991) determinam a resistência de aterramento e o potencial gerado na superfície do solo em uma haste vertical que atravessa várias camadas do solo heterogêneo. As funções de potencial utilizadas possui abordagem semelhante à apresentada por Sunde (1968), porém, todos os potenciais são calculados somente na superfície do solo, utilizando a integral numérica na função de Kernel. A partir de análise teórica da resistência de haste vertical cravada em solo estratificado horizontalmente, os autores apresentam expressão geral para o potencial com uma haste vertical. A expressão permite a determinação de curvas de resistência \times comprimento de haste, auxiliando projetistas de aterramento elétrico que necessitam conhecer o comprimento da haste vertical a ser utilizada para obter determinada

resistência na malha de aterramento.

Dawalibi e Barbeito (1991) apresentam o cálculo da resistência e dos potenciais na superfície do solo para malhas de aterramento elétrico em solos heterogêneos sem restrição da localização dos eletrodos. É realizada a comparação entre métodos computacionais e medições práticas nas malhas de aterramento elétrico existentes em duas subestações com solos que possuem características distintas. Os métodos computacionais utilizados são: i) método das imagens, ii) método da convolução e teoria dos filtros lineares e iii) método de integração numérica direta. Os resultados obtidos da análise comparativa entre os métodos computacionais e os valores medidos, demonstram que para os métodos computacionais que consideram o solo estratificado em duas ou três camadas, os resultados são satisfatórios e quando comparados as simulações realizadas para solo homogêneos, os resultados são divergentes.

Chow e Salama (1994) utilizam o método das imagens complexas e método do momento numérico para determinarem a resistência do aterramento elétrico e distribuição de potencial na superfície do solo. É proposta expressão matemática com baixa complexidade computacional que é baseada na divisão da área da malha de aterramento elétrico em sub-malhas com áreas iguais. Os autores realizam a comparação dos resultados obtidos com outros métodos computacionais, como o método proposto por Dawalibi e Barbeito (1991) e obtêm resultados satisfatórios, porém o método limita-se a apresentar resultados para eletrodos na primeira camada do solo.

Elsherbiny et al. (1996) apresentam método de cálculo de aterramento elétrico formado apenas por hastes verticais em solos de duas camadas, onde cada haste é dividida em apenas dois segmentos. Esta segmentação reduz a dimensão do sistema linear matricial, porém pode ser empregado somente para o cálculo de resistências. Pires (2016) apresenta o cálculo dos parâmetros de malhas de aterramento elétrico composta por eletrodos enterrados horizontalmente a qualquer profundidade em solos heterogêneos com estratificação em até duas camadas e com qualquer geometria de malha. O autor utiliza os métodos das imagens complexas e do potencial médio proposto por Heppe (1979) para determinar os parâmetros da malha de aterramento elétrico, porém o trabalho limita-se a apresentar resultados para malhas de aterramento elétrico somente com eletrodos horizontais.

De posse das modelagens sobre sistemas de aterramentos elétricos, alguns autores utilizam métodos de otimização para obter melhor desempenho do sistema com relação a geometria dos eletrodos horizontais, uniformização de potenciais e posição das hastes verticais. Habjanic e Trlep (2007) apresentam método baseado em elementos

finitos para obter os espaçamentos dos eletrodos horizontais que torne o aterramento mais eficiente, minimizando os potenciais de passo e de toque. Os autores realizam o estudo em solos homogêneos e heterogêneos, procurando minimizar os potenciais sem alterar o comprimento dos condutores horizontais. Os resultados demonstram que a malha simulada com espaçamentos variados apresenta valores menores para os potenciais de toque e de passo, quando comparado aos valores apresentados pela norma [IEEE \(2015\)](#).

[Uma et al. \(2016\)](#) realizam otimização da geometria da malha de aterramento elétrico através do método de elementos finitos, tendo como objetivo chegar ao menor custo financeiro da malha, de forma a garantir que os potenciais de toque e de passo estejam dentro dos limites estabelecidos. A otimização é realizada para duas situações: i) somente o espaçamento dos condutores variam, mantendo a quantidade e localização das hastes verticais fixas e ii) varia tanto os condutores horizontais quanto a localização e quantidade de hastes verticais. Os estudos apresentam resultados satisfatórios com relação ao custo financeiro do projeto da malha na situação onde os condutores horizontais e hastes verticais são otimizados na localização e na quantidade. A situação com maior custo financeiro é a metodologia proposta pela norma [IEEE \(2015\)](#).

[Sherif e Ibrahim \(2016\)](#) apresentam metodologia baseada em programação evolutiva a fim de diminuir o custo financeiro do projeto da malha de aterramento, resistência e os valores de potenciais de toque e de passo. A estratégia evolutiva proposta, utiliza o método de carga extrema para determinar a resistência da malha de aterramento em solos homogêneos e de duas camadas. Os autores propõem realizar a otimização do espaçamento entre os condutores horizontais, bem como otimizar o tamanho da área a ser utilizada pela malha de aterramento elétrico. Os resultados obtidos pelos autores apresentam que é possível diminuir o custo financeiro do projeto da malha, assim como os potenciais de toque e de passo.

[Gouda et al. \(2018\)](#) apresentam técnica de otimização do espaçamento entre os condutores horizontais da malha de aterramento elétrico baseada na hibridização entre taxa de compressão ideal (OCR) e nuvem de partículas (PSO) a fim de diminuir o comprimento total dos condutores horizontais no solo. Os autores apresentam resultados de malhas com hastes verticais e sem hastes para solos homogêneos e heterogêneos (estratificado em duas camadas). Através da hibridização realizada os autores demonstram que é possível reduzir em até 20% do comprimento dos condutores horizontais se comparado com o uso isolado do método de otimização da

taxa de compressão ideal.

Vários são os trabalhos e normas que apresentam formulações e processos de otimização para malhas de aterramentos elétricos. No entanto, a maioria dos estudos contemplam apenas as malhas com eletrodos paralelos e perpendiculares em terrenos definidos de geometrias regulares. Partindo da metodologia apresentada por [Heppe \(1979\)](#), existe a possibilidade do cálculo de malhas de aterramento em qualquer geometria para o solo estratificado em até duas camadas. Está é a lacuna existente nesta área de estudo. Portanto, produzir projetos de aterramento elétrico que tenha como requisito a redução do custo de construção do sistema projetado, otimizando a malha para qualquer geometria, justifica este trabalho.

Há a importância de se modelar computacionalmente sistemas de aterramentos elétricos, para que as configurações dos eletrodos possam ser otimizadas e posteriormente implantadas na prática. Logo, faz-se necessário desenvolver ferramenta computacional que seja capaz de gerar projetos de aterramentos elétricos otimizados, levando em consideração os aspectos de eficiência, segurança e econômicos. Desta forma, cria-se a hipótese primária deste trabalho: **se** é possível realizar a otimização de geometria da malha de aterramentos elétrico para condutores horizontais com angulações relativas distintas, podendo estar espaçados desigualmente, e hastes verticais posicionada em qualquer local da malha de aterramento elétrico, **então** é possível determinar os parâmetros ótimos ou otimizados do projeto da malha de aterramento elétrico.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver metodologia que através de recursos computacionais realize a otimização da geometria qualquer dos condutores horizontais e hastes verticais em área definida para construção de malha de aterramento elétrico em frequência industrial ($50Hz/60Hz$), estando os condutores horizontais e hastes verticais a qualquer profundidade em solos heterogêneos estratificados em até duas camadas. Tem-se ainda como objetivo: i) realizar comparação de custo financeiro da malha com relação ao método proposto pela norma [IEEE \(2015\)](#), ii) analisar comportamento dos potenciais de toque e de passo para situação de condutores horizontais com angulações relativas distintas, iii) verificar o efeito do comprimento e quantidade de hastes verticais na malha otimizada e iv) estudar os efeitos indutivos ocasionados pela redução de condutores horizontais no solo.

Este trabalho está delineado da seguinte forma: no [Capítulo 2](#), os conceitos e os parâmetros de entrada e saída dos projetos da malha de aterramento elétrico. No [Capítulo 3](#) são apresentados os conceitos do método das imagens e é realizada a

modelagem para obter os potenciais na superfície do solo e das resistências elétricas mútuas e próprias. O Capítulo 4 descreve os conceitos básicos de otimização e o Capítulo 5 expõe a metodologia deste trabalho. O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia proposta e no Capítulo 7 são descritos a conclusão e as contribuições obtidas com a realização deste trabalho, bem como possíveis temas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

PROJETO DA MALHA DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

Neste capítulo são abordados os conceitos, informações e métodos de cálculo dos parâmetros da malha de aterramentos elétricos. São descritos os parâmetros de projeto, a metodologia para a estratificação do solo em camadas horizontais e os arranjos para as medições das resistividades do solo. Ainda é apresentado o cálculo da corrente aplicada à malha, o dimensionamento térmico e mecânico do condutor e os parâmetros necessários para calcular o potencial da malha, tensão de toque e tensão de passo e a resistência da malha de aterramento.

2.1 Parâmetros de projeto da malha de aterramento

Parâmetros de projeto da malha de aterramento elétrico são valores obtidos através de medições em campo e modelagem matemática. São variáveis necessárias para determinar a elevação de potencial, a tensão de toque, a tensão de passo e a resistência da malha de aterramento elétrico.

2.1.1 Caracterização do solo

Em frequência industrial os parâmetros elétricos do solo, tais como permeabilidade elétrica μ , condutividade elétrica σ e permissividade elétrica ε , podem ser considerados invariantes no tempo (TELLÓ et al., 2007). Sendo a corrente de deslocamento desprezível com relação à corrente de condução, admite-se em baixas frequências que $\varepsilon\mu \ll \sigma$, logo, utiliza-se como parâmetro característico do solo a condutividade elétrica ou a resistividade elétrica ρ , dado por:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.1)$$

O solo normalmente é composto por diversas camadas sobrepostas com formações geológicas distintas, na qual cada camada apresenta valor de resistividade elétrica aparente e espessura própria (ABNT, 2012). Os métodos de medição das resistividades e determinação da estratificação do solo são dados pelas normas IEEE (2012) e ABNT (2012). Na Figura 2.1, adaptada de Pires (2016), é ilustrado o sistema real do solo e o modelo aproximado, no qual as suas características variam de acordo com a distância. Em geral, adota-se que as alterações verticais na profundidade das malhas são graduais e insignificantes na vizinhança da zona em questão (ABNT, 2012). Assim, as camadas do solo podem ser consideradas horizontais e paralelas a

superfície, como ilustrado na Figura 2.1(b).

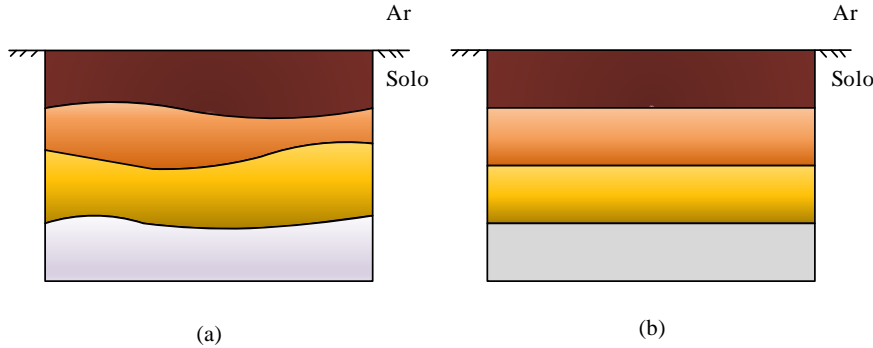


Figura 2.1 - Solo Estratificado: (a) sistema real e (b) modelo aproximado.

2.1.2 Resistividade elétrica aparente do solo

A resistividade elétrica do solo pode ser influenciada diretamente por diversos fatores, no qual os que se destacam são: teor de umidade, compactação, temperatura, porosidade, concentração de eletrólitos dissolvidos, textura, matéria orgânica e teor de argila (RHOADES; PRATHER, 1976). A literatura indica que os valores da resistividade para diferentes tipos de solos podem variar de menores que $1\Omega.m$ para solos embebidos na água do mar até $10^9 \Omega.m$ para o arenito (IEEE, 2012).

Diferente do que ocorre com o fio condutor de eletricidade, a corrente elétrica no solo pode percorrer diversos caminhos, como ilustrado na Figura 2.2, adaptada de Silva Filho (2015). Os terminais A_1 e A_2 indicam os pontos de entrada e retorno de corrente no solo. Em solos suficientemente úmidos, a condução de corrente se dá principalmente através do conteúdo de sal nos poros de água do solo. Entretanto, há contribuição da fase sólida para a condutividade elétrica em solos úmidos principalmente através de cátions trocáveis associados com minerais de argila. O terceiro caminho para a corrente elétrica no solo existe por meio de partículas em contato direto e contínuo uma com a outra, indicado através das linhas que divide as áreas de solo seco. Estes três caminhos do fluxo de corrente no solo (homogêneo ou heterogêneo), contribuem para a condutividade elétrica global do solo, conhecida como condutividade elétrica aparente do solo σ_a que é inversamente proporcional a resistividade aparente do solo ρ_a (CORWIN; LESCH, 2003).

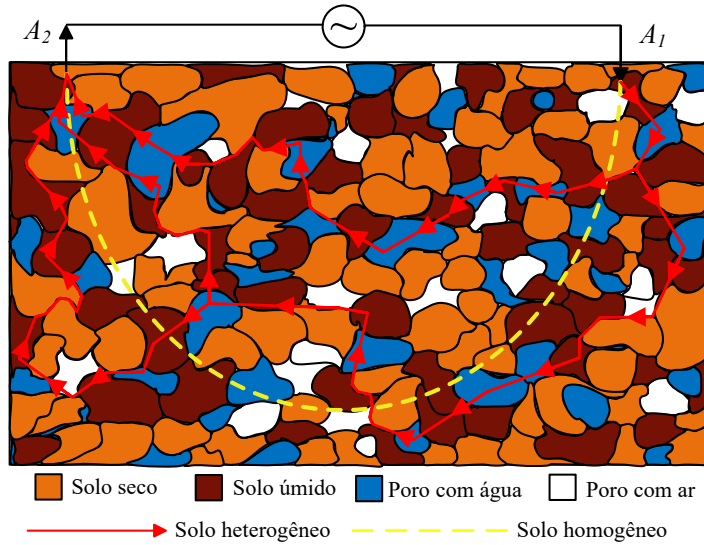


Figura 2.2 - Caminho da corrente elétrica no solo.

2.1.3 Medição da resistividade elétrica do solo

A medição da resistividade elétrica do solo é realizada diretamente no local em que a malha de aterramento será construída. Para isto, podem ser empregados diversos métodos, tais como: arranjo de Wenner, arranjo de Lee, arranjo de Schlumberger, eletrodo central entre outros. Devido ao fato do solo possuir característica anisotrópica, as medidas devem ser realizadas em diversas direções, atribuindo à resistividade elétrica aparente ρ_a o valor médio dos valores obtidos (VISACRO Filho, 2002).

Dos diversos métodos existentes para determinação da resistividade elétrica do solo, o mais utilizado para fins de aterramento elétrico é o proposto por Wenner (1916). No arranjo proposto por Wenner (1916) os eletrodos são espaçados igualmente a distância r e cravados a profundidade b , como ilustrado na Figura 2.3, adaptada de Pires (2016), nos quais os terminais C_1 e C_2 são responsáveis por injetar e capturar, respectivamente, a corrente elétrica I no solo e V é o potencial medido entre os terminais P_1 e P_2 em decorrência da injeção da corrente no solo. A resistividade elétrica aparente em função do espaçamento e da profundidade dos eletrodos é dada por:

$$\rho_a(r) = \frac{4\pi r R_m}{1 + \frac{2r}{\sqrt{r^2 + 4b^2}} - \frac{2r}{\sqrt{4r^2 + 4b^2}}} \quad (2.2)$$

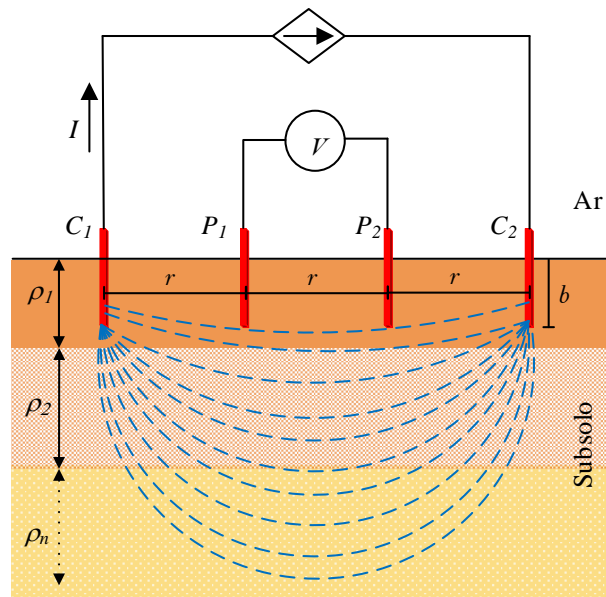


Figura 2.3 - Arranjo de Wenner.

no qual R_m é a resistência elétrica medida pelo aparelho (Terrômetro). De posse do valor da resistência elétrica medida é possível encontrar a curva de resistividade aparente para diferentes espaçamentos r . A partir da curva de resistividade aparente do solo é possível realizar o processo de estratificação do solo (CALIXTO, 2012). A maior desvantagem do arranjo de Wenner é o rápido decréscimo na magnitude do potencial entre os eletrodos de tensão com o aumento do espaçamento. Assim, para valores de espaçamentos relativamente altos, os valores baixos dos potenciais podem ser inadequados para os equipamentos. Outra desvantagem é a necessidade de relocação de todos os eletrodos a cada medição (IEEE, 2012).

2.2 Processo de estratificação do solo em camadas horizontais

Solos heterogêneos podem apresentar variações significativas da resistividade elétrica em relação à profundidade. As aproximações para representar o solo contendo somente uma camada, pode resultar em projeto da malha de aterramento elétrico fora dos padrões de segurança (TELLÓ et al., 2007). O solo possui elevada variação na resistividade elétrica devido a sua heterogeneidade, tornando necessário estabelecer modelos equivalentes mais simples para a sua composição. Os modelos equivalentes dependem dos fatores: i) complexidade matemática envolvida, ii) precisão, alcance e método utilizado para medições e iii) finalidade dos cálculos (ABNT, 2012).

Para obter a estratificação do solo considerando-o com até duas camadas, pode-

se utilizar: i) método gráfico, ii) método simplificado e iii) método de otimização. Para obtenção da estratificação do solo, considerando-o com mais de duas camadas, pode-se utilizar: i) método de Pirson, ii) método gráfico de Yokogawa, iii) método de otimização e iv) método de estratificação 3D proposto por Calixto (2012). Para aplicações na área de engenharia de potência na qual não há diferenças elevadas entre os valores máximos e mínimos das resistividades aparente do solo, o modelo equivalente de duas camadas possui precisão satisfatória sem ser demasiadamente complexo (ABNT, 2012).

2.2.1 Estratificação horizontal do solo em duas camadas

O modelo de solo estratificado em até duas camadas é ilustrado na Figura 2.4, adaptada de Calixto (2012), na qual a camada superior do solo possui resistividade ρ_1 e profundidade h_1 e a camada inferior possui resistividade ρ_2 e profundidade considerada ∞ . A resistividade aparente do solo estratificado em até duas camadas é dada por (WENNER, 1916):

$$\rho_a(r) = \rho_1 \left[1 + 4 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \cdot \frac{h_1}{r}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \cdot \frac{h_1}{r}\right)^2}} \right] \quad (2.3)$$

na qual n é a variável da somatória e K é dado por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (2.4)$$

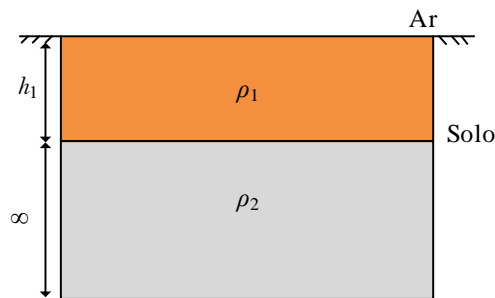


Figura 2.4 - Modelo de solo estratificado em duas camadas.

Analisando (2.3) e as curvas de solo considerado estratificado em duas camadas, observa-se que $\rho_a(r)$ somente pode ser crescente ou decrescente. Se $\rho_a(r)$ for obtida

de forma saturada, o valor equivalente de ρ_2 é a plena saturação e o valor equivalente a ρ_1 é $\rho_1 = \rho_a(0)$ em $a = 0$. Obtendo-se ρ_1 e ρ_2 , determina-se K utilizando (2.4). Com o valor de K , faz-se $r = h_1$, determinando h_1 em função de $\rho_a(r)$ (CALIXTO, 2012).

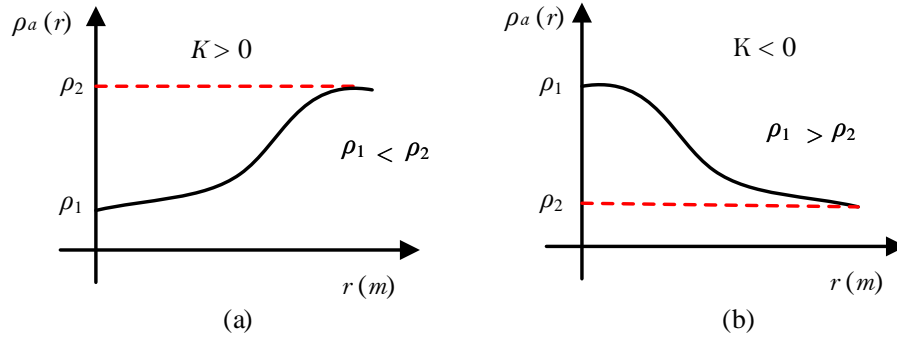


Figura 2.5 - Curva de resistividade \times distâncias entre as hastes.

Outra forma de estratificar o solo em duas camadas é a partir do conceito matemático de otimização, onde têm-se duas curvas, uma curva de resistividade aparente experimental $\rho_{aE}(r)$ obtido através de medições em campo e outra curva de resistividade aparente teórica $\rho_{aT}(r)$ que pode ser obtida a partir do algoritmo proposto por Sunde (1968). Através do processo de otimização, busca-se minimizar a função de avaliação $f(x)$, de forma a obter os valores de ρ_1 , K e h_1 .

$$f(x) = \sum \rho(r_i) - \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \cdot \frac{h_1}{r_i}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \cdot \frac{h_1}{r_i}\right)^2}} \right] \quad (2.5)$$

2.3 Corrente de falta

A corrente de falta caracteriza-se pelo contato ou arco entre partes sob potenciais diferentes ou para a terra, no sistema ou equipamento elétrico energizado, ocasionando corrente que flui de um condutor para outro ou para a terra, dividindo-se pelo sistema interligado (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2002). As faltas normalmente são ocasionadas por curtos-circuitos, ocorridos acidentalmente em redes ou propositalmente pela atuação de equipamentos de proteção. Os curtos-circuitos são divididos em: i) assimétrico e ii) simétrico. Roeper (1975) descreve que o curto-

circuito assimétrico pode ser dividido em: i) monofásico (fase-terra), quando ocorre contato entre uma das fases e o terra, ii) bifásico (fase-fase), quando ocorre o contato entre duas fases e iii) bifásico com contato para terra (fase-fase-terra), quando ocorre o contato entre duas fases e o terra simultaneamente.

O curto-circuito simétrico ocorre em sistema trifásico quando os três condutores carregados entram em contato. Devido a defasagem em 120° existente entre as tensões das fases no sistema trifásico, a resultante das correntes no curto-circuito simétrico é nula. Assim, este tipo de curto-circuito não tem qualquer influência na corrente aplicada à malha. No caso do curto-circuito bifásico não há correntes de sequência zero, o que também torna irrelevante para o cálculo da corrente aplicada à malha. Sendo assim, dos tipos de curto-circuitos, somente os monofásicos e bifásicos com contato para a terra que influenciam na corrente que flui para a malha de aterramento elétrico (TELLÓ et al., 2007).

As correntes de falta podem ocorrer em diversos locais do sistema elétrico, o que torna difícil determinar o tipo e o local com maior fluxo de corrente entre a malha e o solo circundante. Para determinar os tipos de falhas aplicáveis, deve-se considerar a probabilidade de ocorrência de cada falta. Incluindo a ocorrência de faltas simultâneas quando a probabilidade de ocorrência for significativa (PIRES, 2016).

2.3.1 Componente zero da corrente de falta

A malha de aterramento elétrico deve ser dimensionada para o pior caso, o qual ocasiona a maior corrente aplicada na malha e, conseqüentemente, os maiores potenciais na superfície do solo. No sistema trifásico, o aparecimento da componente de sequência zero estabelece a condição de que, ao lado dos três condutores, ainda existe o quarto caminho de circulação de corrente, o retorno pelo terra ou condutor neutro (ROEPER, 1975).

De acordo com o IEEE (2015) a corrente de falta é diretamente proporcional a componente de sequência zero, portanto, o pior caso de falta é o que resulta na maior componente de sequência zero para as correntes de curto-circuito, definida por: $3I_0$, no qual I_0 é o valor simétrico eficaz da componente de sequência zero da corrente de falta. No caso da corrente de falta ser ocasionada por curto-circuito bifásico com contato para a terra, a corrente de sequência zero é dada por:

$$I_0 = \frac{V_{fase}(R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1)(A) + B} \quad (2.6)$$

na qual A é dado por:

$$A = R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2) \quad (2.7)$$

e B é dado por:

$$B = (R_2 + jX_2)(R_0 + 3R_f + jX_0) \quad (2.8)$$

Para o caso da falta ser ocasionada por curto-circuito monofásico, a corrente de sequência zero é dada por:

$$I_0 = \frac{V_{fase}}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (2.9)$$

na qual V_{fase} é a tensão de fase do sistema em $[V]$, R_f é a resistência estimada da falta em $[\Omega]$, R_1 é a resistência equivalente de sequência positiva do sistema em $[\Omega]$, R_2 é a resistência equivalente de sequência negativa do sistema em $[\Omega]$, R_0 é a resistência equivalente de sequência zero do sistema em $[\Omega]$, X_1 é a reatância de sequência positiva do sistema em $[\Omega]$, X_2 é a reatância de sequência negativa do sistema em $[\Omega]$ e X_0 é a reatância de sequência zero do sistema em $[\Omega]$.

Os valores das resistências (R_1, R_2, R_0) e das reatâncias (X_1, X_2, X_0) são calculados através do sistema equivalente observado a partir do ponto em que ocorre a falta. Em vários casos o efeito da resistência equivalente do sistema pode ser desprezada (IEEE, 2015). Assim, as expressões (2.6) e (2.9) podem ser simplificadas mantendo a precisão satisfatória. Desta forma, o curto-circuito bifásico com contato para a terra tornar-se:

$$I_0 = \frac{X_2 V_{fase}}{X_1(X_0 + X_2) + (X_2 X_0)} \quad (2.10)$$

Para o caso da corrente de falta ser ocasionada por curto-circuito monofásico e desconsiderando o efeito da resistência equivalente do sistema, (2.9) pode ser reescrita como:

$$I_0 = \frac{V_{fase}}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (2.11)$$

2.3.2 Efeito da corrente de falta assimétrica

Na obtenção do valor da corrente de falta é necessário considerar o efeito da corrente assimétrica, que inclui os períodos subtransitório, transitório e permanente, além da componente contínua da corrente. Os períodos subtransitório e transitório e a componente contínua decaem exponencialmente com diferentes taxas de atenuação. Contudo, para fins de aplicação, considera-se que a componente contínua não decai com o tempo, permanecendo em seu valor inicial (IEEE, 2015). Assim, o valor eficaz da corrente assimétrica I_E é obtido pelo fator de decaimento D_f e pelo valor da corrente de falta I_f , dado por:

$$I_E = D_f I_f \quad (2.12)$$

na qual D_f é dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left[1 - e^{\left(\frac{-2t_f}{T_a} \right)} \right]} \quad (2.13)$$

e t_f é o tempo de duração da falta em [s] e T_a é a constante de tempo da componente contínua, dada por:

$$T_a = \frac{X_{mont}}{2\pi f R_{mont}} \quad (2.14)$$

na qual X_{mont} e R_{mont} são a reatância e a resistência do sistema a montante da corrente de falta em [Ω], respectivamente, e f é a frequência do sistema em [Hz].

2.4 Corrente aplicada à malha de aterramento elétrico

A corrente da malha I_m é a que trafega pela terra e produz as tensões de passo e toque, sendo considerada no cálculo do dimensionamento da malha de aterramento elétrico. Segundo Kindermann e Campagnolo (2002) a corrente da malha é dada por:

$$I_m = I_{curto-1\phi-terra} - \sum I_{cLT's} \quad (2.15)$$

na qual $I_{cLT's}$ é a corrente de cobertura das linhas de transmissão que compõem a subestação de energia elétrica e $I_{curto-1\phi-terra}$ é a corrente de curto circuito ou

de falta. A Figura 2.6, adaptada de NBR 15751 (2013), ilustra o comportamento da corrente de malha em rede multi-aterrada com cabo guarda ou neutro. Observa-se que parte da corrente de falta I_f retorna diretamente a malha de aterramento em I_1 , retornando ao sistema elétrico pelo terra do transformador, sendo assim, I_1 não contribui na geração de tensão de passo e toque na malha. Casos em que o sistema não possui cabo guarda, toda a corrente flui para o solo através da malha de aterramento, ocasionando que a corrente aplicada na malha I_m seja igual a corrente de falta.

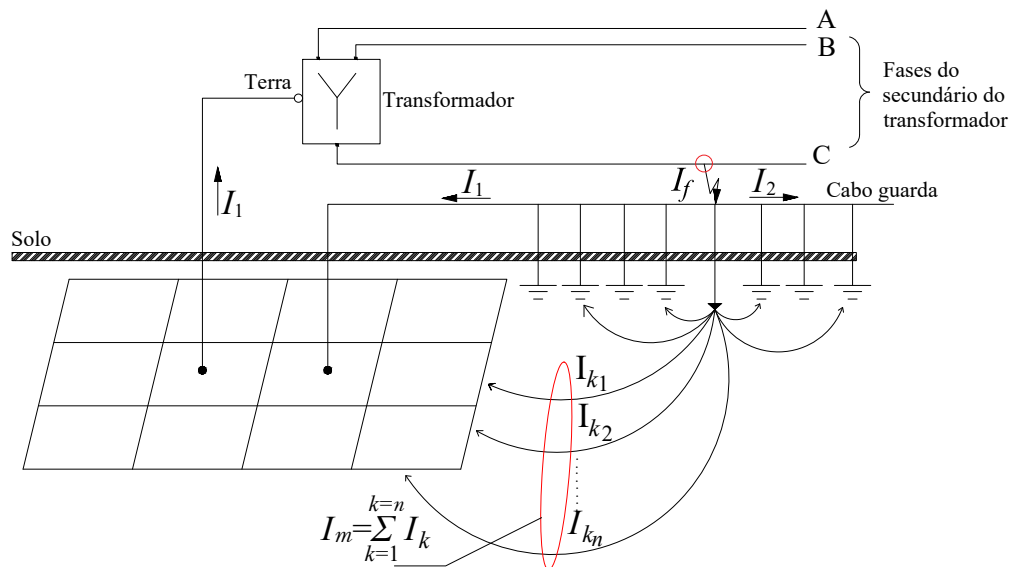


Figura 2.6 - Corrente da malha em sistema com cabo guarda.

Segundo Kindermann e Campagnolo (2002) a corrente da malha I_m é menor que a corrente de curto-circuito devido ao fator de divisão de corrente de falta, no qual seu valor depende da: i) resistividade do solo, ii) diâmetro dos condutores de fase e cabo de guarda, iii) resistividade dos condutores, iv) geometria espacial dos condutores e distância a terra e v) configuração das linhas de transmissão conectadas à subestação. Desta forma, a corrente da malha de aterramento elétrico pode ser considerada a fração da corrente de falta ou curto-circuito, podendo variar de 10% a 64% do valor da corrente de curto-circuito.

2.5 Dimensionamento térmico e mecânico do condutor

O tipo de material e o dimensionamento do condutor que compõe o eletrodo da malha de aterramento deve ser escolhido de forma a manter a durabilidade do sistema de aterramento durante a vida útil das instalações protegidas. Assim, de acordo com [IEEE \(2015\)](#), o condutor deve ser concebido de forma a atender as considerações: i) possuir alta condutividade de modo a não contribuir de forma substancial para a resistência do aterramento e para as tensões locais, ii) ser capaz de suportar o aquecimento provocado pela corrente máxima aplicada a malha durante o tempo da falta e iii) possuir resistência suficiente para suportar aos esforços mecânicos e a corrosão.

Para o dimensionamento mecânico é necessário que o cabo de aterramento suporte os esforços devido, principalmente, aos efeitos eletromagnéticos, a movimentação de veículos acima da malha e ao peso da terra e das estruturas. Para o dimensionamento térmico é necessário que o cabo de aterramento suporte a elevação da temperatura em função da corrente. Para o cálculo do dimensionamento térmico é utilizada a expressão de Onderdonk ([IEEE, 2014](#)), dada por:

$$S_{mm^2} = \frac{I_g}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_f \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_{amb}}\right)}} \quad (2.16)$$

na qual α_r é o coeficiente da resistividade térmica na temperatura de referência em [$^{\circ}C^{-1}$], ρ_r é a resistividade do condutor na temperatura de referência em [$\mu\Omega.cm$], $TCAP$ é a capacidade térmica por unidade de volume em [$J \cdot (cm^3 \cdot ^{\circ}C^{-1})$], K_0 é o inverso do coeficiente de resistividade térmica do condutor a $0^{\circ}C$ em [$^{\circ}C^{-1}$], T_m é a temperatura máxima suportada pelo condutor em [$J(cm^3 \cdot ^{\circ}C)^{-1}$] e T_{amb} temperatura ambiente em [$^{\circ}C$]. A expressão de Onderdonk considera que toda a energia térmica permanece retida no condutor devido a curta duração da corrente de falta e pode ser usada para qualquer tipo de condutor em que suas constantes sejam conhecidas/calculadas.

2.6 Parâmetros da malha de aterramento

Os parâmetros da malha de aterramento são valores intrínsecos de cada malha que definem os seus critérios de funcionalidade e segurança. A Figura 2.7, adaptada de [Telló et al. \(2007\)](#), ilustra os importantes parâmetros quando da ocorrência de

defeitos à terra: i) elevação do potencial da malha (*ground potential rise* – GPR), ii) tensão de toque V_t , iii) tensão de passo V_p , iv) potencial na superfície do solo em que a pessoa se encontra V_s e v) tensão da malha V_m , que é o máximo valor de tensão de toque dentro da malha de aterramento elétrico.

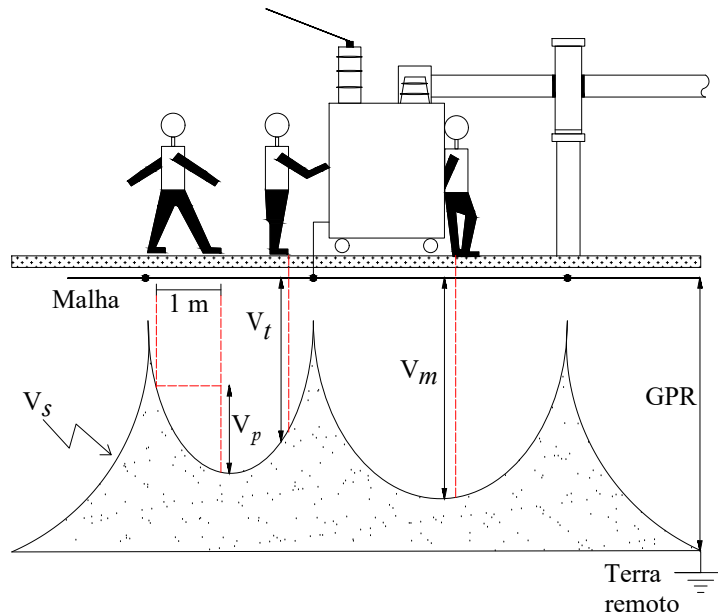


Figura 2.7 - Representação das tensões de toque, passo e elevação do potencial da malha.

2.6.1 Elevação do potencial da malha de aterramento

Em condições normais o aterramento elétrico opera com tensões próximas de zero. Assim, o potencial do eletrodo do aterramento é praticamente idêntico ao potencial do terra remoto localizado a distância infinita o qual apresenta potencial zero (Figura 2.7). Na ocorrência de corrente de falta, a corrente é conduzida pela malha de aterramento da subestação para a terra, ocasionando a elevação do potencial elétrico da malha em relação ao terra remoto. A elevação do potencial da malha de aterramento elétrico é o potencial elétrico máximo que o eletrodo da malha pode atingir em relação ao terra remoto durante a falta. Este potencial é igual a corrente máxima injetada na malha multiplicada pela resistência do aterramento (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2002).

2.6.2 Tensão de toque

Durante a corrente de falta, considera-se que todas as estruturas aterradas fiquem com potencial igual ao GPR. A tensão de toque em que a pessoa pode estar submetida é a diferença entre o potencial na superfície do solo no local em que a pessoa se encontra e o potencial da estrutura metálica aterrada que se encontre ao alcance das mãos, como ilustrado na Figura 2.7. O valor da tensão de toque é dado por:

$$V_t = GPR - V_s \quad (2.17)$$

2.6.3 Tensão de passo

A tensão de passo é a diferença de potencial na superfície do solo em contato com os dois pés da pessoa distanciados em um metro, durante a ocorrência da falha, desde que a pessoa não esteja tocando nenhuma estrutura metálica aterrada, como ilustrado na Figura 2.7. O valor da tensão de passo é dada por:

$$V_p = V_{s1} - V_{s2} \quad (2.18)$$

na qual, V_{s1} é o potencial na superfície do solo em contato com um dos pés em $[V]$ e V_{s2} é o potencial na superfície do solo em contato com o outro pé em $[V]$.

2.6.4 Máxima permitida para tensão de passo e tensão de toque

De acordo com IEEE (2015) o potencial máximo gerado pelo aterramento durante o período de defeito não deve produzir corrente de choque superior a limitada por Dalziel (1941). Sendo assim, a tensão de toque máximo e tensão de passo máxima permitidas são dadas por:

$$V_{tmáx} = \frac{116 + 0,174 \cdot \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.19)$$

$$V_{pmáx} = \frac{116 + 0,696 \cdot \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (2.20)$$

na qual, t é o tempo de duração do defeito em segundos $[s]$ e ρ_s é a resistividade do material da superfície em $[\Omega m]$.

Normalmente o solo da subestação é revestido por camada de brita, a fim de aumentar a resistência de contato entre o solo e os pés das pessoas que estiverem na subestação. A brita no solo representa camada resistiva adicional com a camada superficial do solo. Logo, é necessário que seja realizada correção no parâmetro ρ_s das expressões (2.19) e (2.20), na qual a correção devido a camada de brita produz as expressões dadas por:

$$C_s(h_s, K_c) = \frac{1}{0,96} \cdot \left[1 + 2 \cdot \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_c^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h_s}{0,08}\right)^2}} \right) \right] \quad (2.21)$$

na qual, h_s é a espessura em metros da camada de brita e K_c é dado por:

$$K_c = \frac{\rho_a - \rho_s}{\rho_a + \rho_s} \quad (2.22)$$

e, ρ_a é a resistividade aparente do solo e ρ_s é a resistividade da brita. Assim, de (2.19) e (2.20) têm-se:

$$V_{tm\acute{a}x} = [1000 + 1,5C_s(h_s, K) \cdot \rho_s] \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.23)$$

$$V_{pm\acute{a}x} = [1000 + 6C_s(h_s, K) \cdot \rho_s] \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (2.24)$$

2.6.5 Resistência da malha de aterramento elétrico

As malhas de aterramento elétrico possuem impedâncias complexas que incluem componentes resistivos, capacitivos e indutivos. Em sistemas de potência, que operam a baixa frequência (50Hz/60Hz), a impedância é afetada pela resistividade elétrica do solo ocasionando com que a resistência domine na impedância total (IEEE, 2012).

Segundo Visacro Filho (2002) a resistência da malha de aterramento total é composta por três resistências em série: i) resistência do eletrodo e das conexões, ii) resistência da interface de contato entre o eletrodo e o solo e iii) resistência da terra circunvizinha do eletrodo. Normalmente são desconsideradas as duas primeiras resistências devido aos seus baixos valores em relação a resistência da terra. A resistência da malha de aterramento é diretamente proporcional a resistividade do solo e inversamente

ao comprimento do eletrodo, sendo obtida pela divisão do GPR pela corrente total injetada na malha.

2.7 Considerações finais

Este capítulo apresentou a teoria básica sobre os parâmetros necessários para elaboração do projeto de malha de aterramento elétrico, foi descrito a modelagem matemática para obtenção dos dados referentes as características do solo, corrente de falta, tensão de toque, tensão de passo e dimensionamento do condutor de terra. Estes parâmetros são utilizados como dados de entrada para projetos de malha de aterramento elétrico. O próximo capítulo descreve a modelagem do potencial na superfície do solo.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM DO POTENCIAL NA SUPERFÍCIE DO SOLO E RESISTÊNCIA MÚTUA

Este capítulo apresenta as deduções para o cálculo do potencial induzido na superfície do solo por fonte linear de corrente e da resistência mútua entre dois segmentos, em solo homogêneo e estratificado em duas camadas. Para o equacionamento é utilizado o método das imagens juntamente com o método do potencial médio, iniciando a partir das relações entre o campo elétrico e a densidade de corrente que se originam da fonte.

3.1 Potencial elétrico na superfície do solo homogêneo

Para o cálculo do potencial elétrico induzido por fonte de corrente em um ponto é aplicado o método do potencial médio para cada trecho de eletrodo e suas imagens. Portanto, seja o sistema composto por dois meios (Meio 1 e Meio 2) homogêneos que se estendem, possuindo resistividades ρ_1 e ρ_2 , respectivamente, divididos pelo plano Q na fronteira e contendo uma fonte pontual de corrente F inserida no Meio 1, como ilustrado na Figura 3.1(a). Sendo E o campo elétrico gerado pela fonte pontual de corrente em $[NC^{-1}]$, σ a condutividade da região em $[(\Omega m)^{-1}]$ e ρ é a resistividade do meio em $[\Omega m]$, têm-se as relações, exceto na fonte F , dadas por:

$$J = \sigma \cdot E \quad (3.1)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.2)$$

A direção e o sentido da densidade de corrente J são idênticos aos do campo elétrico E e são emitidos da fonte F , simetricamente, de forma a refletirem no plano Q . As componentes de J e E que fluem em direção a um ponto qualquer são representadas como ilustrado na Figura 3.1(b). Os parâmetros E_e e J_e são os módulos das ondas emitidas pela fonte que incidem diretamente sobre o plano ou ponto na mesma camada da fonte, E_r e J_r são os módulos das ondas refletidas no plano Q e E_f e J_f são os módulos das ondas refratadas para o Meio 2. Assim, as ondas de densidade de corrente e as ondas de campo elétrico se relacionam como:

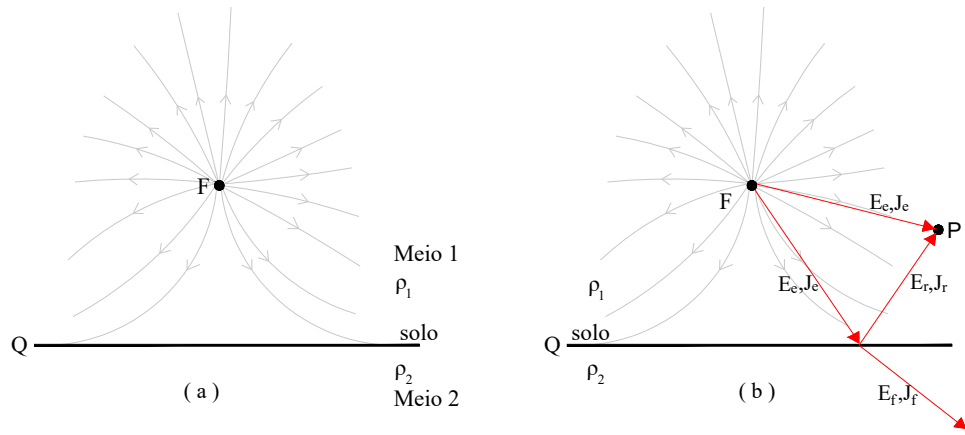


Figura 3.1 - Potencial elétrico em meio homogêneo: (a) fonte de corrente pontual em sistema com dois meios e (b) ondas emitidas, refletidas e refratadas.

$$J_e = J_f + J_r \quad (3.3)$$

$$E_e = E_f - E_r \quad (3.4)$$

Desta forma, têm-se:

$$\begin{aligned} J_e &= \sigma_1 E_e \\ J_f &= \sigma_2 E_f \\ J_r &= \sigma_1 E_r \end{aligned} \quad (3.5)$$

Sendo as relações:

$$\begin{aligned} E_e &= E_f - E_r \\ \sigma_1 &= \frac{1}{\rho_1} \\ \sigma_2 &= \frac{1}{\rho_2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Da manipulação algébrica de (3.3) até (3.1), obtém-se:

$$E_e = (1 + K)E_e - E_r \Rightarrow E_r = KE_e \quad (3.7)$$

na qual K é o fator de reflexão entre o Meio 1 e Meio 2 com as ondas partindo do Meio 1, dado por (3.8). O termo $(1 + K)$ em (3.7) é o fator de refração do Meio 1 para o Meio 2. Estes termos são constantes e relacionam as ondas refletidas ou refratadas com as ondas emitidas da fonte e que incidem sobre o plano Q .

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3.8)$$

Para calcular o potencial elétrico induzido pela fonte de corrente em um ponto P localizado no mesmo meio em que se encontra a fonte, considera-se o sistema apenas com as ondas emitidas e refletidas que incidem sobre o ponto. Desta forma, as ondas refletidas criam o mesmo efeito da imagem da fonte de corrente equidistante em relação ao plano Q , como ilustrado na Figura 3.2, no qual F' é a imagem da fonte de corrente.

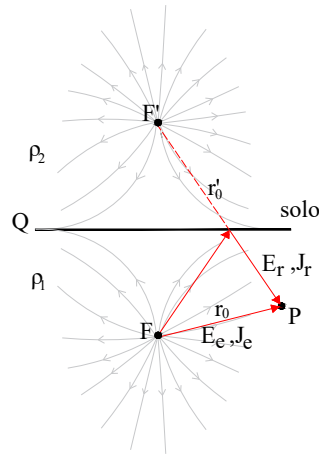


Figura 3.2 - Sistema para ponto no mesmo meio da fonte.

A densidade de corrente no meio se relaciona com a corrente de dispersão i dada por (3.9) (HALLIDAY et al., 1996), no qual A_f é a área da superfície da esfera com centro na fonte e raio igual a distância da fonte ao ponto.

$$J_e = \frac{i}{A_f} = \frac{i}{4\pi r_0^2} \quad (3.9)$$

Portanto, o campo elétrico emitido na direção de P a partir de F é dado por:

$$E_e = \rho_1 J_e = \frac{i\rho_1}{4\pi r_0^2} \quad (3.10)$$

Os potenciais induzidos pela fonte pontual de corrente e por sua imagem em relação ao terra remoto, são dados por:

$$v_{fonte} = E_{rr} \cdot r_0 = \frac{\rho_1 i K}{4\pi r_0} \quad (3.11)$$

$$v_{fonte'} = E_{rr} \cdot r'_0 = \frac{\rho_1 i K}{4\pi r'_0} \quad (3.12)$$

na qual v_{fonte} é o potencial induzido pela fonte pontual de corrente e $v_{fonte'}$ é o potencial induzido pela imagem da fonte pontual de corrente, como ilustrado na Figura 3.2, r_0 é a distância entre P e a fonte de corrente e r'_0 é a distância entre P e a imagem da fonte de corrente. Assim, o potencial resultante v_r em P é dado por:

$$v_r = v_{fonte} + v_{fonte'} = \frac{\rho_1 i}{4\pi} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{K}{r'_0} \right) \quad (3.13)$$

Considerando o sistema de coordenadas x e y e ambos estão na superfície do solo com origem sobre a fonte de corrente e o eixo z com origem perpendicular ao plano da superfície, estando o Meio 2 composto pelo ar e $\rho_2 = \infty$, considerando-se reflexão perfeita e Meio 1 composto por solo homogêneo de resistividade elétrica aparente ρ_a , o potencial induzido em P é dado por:

$$v_r = \frac{\rho_i}{4\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (D + z_p)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (D - z_p)^2}} \right) \quad (3.14)$$

na qual x_p , y_p e z_p são as coordenadas do ponto P e D é o módulo da profundidade da fonte de corrente no solo. Estando P na superfície do solo, $z_p = 0$, obtém-se:

$$v_r = \frac{\rho_i}{2\pi} \left(\frac{1}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + D^2}} \right) \quad (3.15)$$

Da mesma forma, o potencial resultante induzido no ponto P pela fonte composta por um segmento linear de comprimento L , com a densidade da corrente de dispersão constante em todo o seu comprimento e enterrado horizontalmente no solo, é dado pelo potencial médio de infinitas fontes pontuais ao longo do comprimento dx da fonte, dado por:

$$v_r = \frac{\rho i}{4\pi L} \left(\int \frac{1}{r_0} dx + \int \frac{1}{r'_0} dx \right) \quad (3.16)$$

Assim, estando P na superfície do solo, a expressão do potencial resultante induzido em qualquer ponto da superfície pela fonte linear no solo homogêneo é dado por:

$$v_r = \frac{\rho \cdot i}{2\pi L} \ln \left(\frac{\sqrt{(x_p - L)^2 + y_p^2 + D^2} + L - x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + D^2} - x_p} \right) \quad (3.17)$$

3.1.1 Potencial elétrico na superfície do solo com estratificação em duas camadas horizontais

Considerando o sistema ar/solo em que o solo seja composto por duas camadas horizontais, a camada superior possuindo resistividade ρ_1 e profundidade h_1 [m], e a camada inferior com resistividade ρ_2 e se estendendo até a rocha primária. E considerando a resistividade do ar como sendo infinita, ocasionando reflexão perfeita no plano da superfície. E, por fim, considerando as sucessivas reflexões dos campos, tanto no plano da superfície do solo quanto no plano da interface entre as duas camadas do solo, há, além da imagem simétrica a fonte, a série infinita de imagens distanciadas simetricamente em relação ao plano e distanciadas na razão de $2nh_1$ da superfície do solo e que se atenuam através da relação K^n . Neste caso, n é um número inteiro que varia de $[1 \infty]$, referente a distância vertical da imagem em relação a superfície do solo. A Figura 3.3, adaptada de Pires (2016), ilustra a fonte linear de corrente e o ponto P na camada superior do solo.

A expressão do potencial induzido no ponto P é dada por:

$$v_r = \frac{\rho_1 i}{4\pi L} \left[\int \frac{1}{r_0} dx + \int \frac{1}{r'_0} dx + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left(\int \frac{1}{r_{n-}} dx + \int \frac{1}{r'_{n-}} dx + \int \frac{1}{r_{n+}} dx + \int \frac{1}{r'_{n+}} dx \right) \right] \quad (3.18)$$

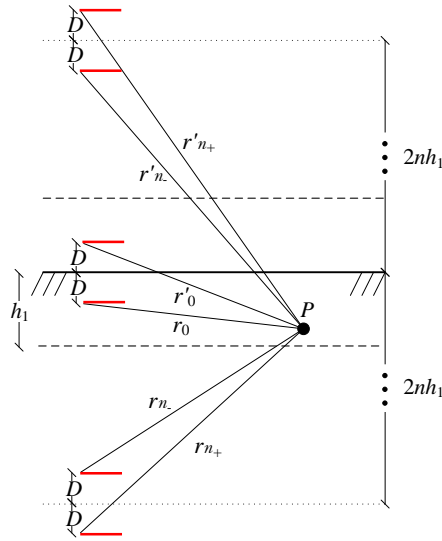


Figura 3.3 - Imagens refletidas da fonte na camada superior do solo estratificado em duas camadas.

na qual n é a variável da somatória. Considerando o segmento enterrado a profundidade D e convencionando o sistema de coordenadas no qual os eixos x e y estão na superfície do solo com x paralelo ao segmento, o eixo z perpendicular ao plano do solo e as origens na superfície do solo acima da extremidade esquerda do segmento, os termos de r e r' são dados por:

$$\begin{aligned}
 r_0 &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (z_p + D)^2} \\
 r'_0 &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + z_p + (z_p - D)^2} \\
 r_{n-} &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + [2nh_1 - (D - z_p)]^2} \\
 r'_{n-} &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + [2nh_1 - (D + z_p)]^2} \\
 r_{n+} &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + [2nh_1 + (D + z_p)]^2} \\
 r'_{n+} &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + [2nh_1 + (D - z_p)]^2}
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

Assim, colocando P na superfície do solo, $z_p = 0$, tem-se que o potencial induzido por único segmento situado na camada superior do solo em qualquer ponto da superfície é dado por:

$$v_r = \frac{\rho_1 i}{2\pi L} \left\{ \ln \left(\frac{\sqrt{(x_p - L)^2 + y_p^2 + D^2} + L - x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + D^2} - x_p} \right) + \right.$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\ln \left(\frac{\sqrt{(x_p - L)^2 + y_p^2 + (2nh_1 + D)^2} + L - x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (2nh_1 + D)^2} - x_p} \right) + \right. \quad (3.20)$$

$$\left. \ln \left(\frac{\sqrt{(x_p - L)^2 + y_p^2 + (2nh_1 - D)^2} + L - x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (2nh_1 - D)^2} - x_p} \right) \right]$$

Estando a fonte linear de corrente na camada inferior do solo e o ponto P na camada superior, tem-se que o potencial induzido em P pela fonte linear de corrente é dado por:

$$v_r = \frac{\rho_1 i (1 + K)}{2\pi L} \left\{ \ln \left(\frac{\sqrt{(x_p - L)^2 + y_p^2 + D^2} + L - x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + D^2} - x_p} \right) + \right. \quad (3.21)$$

$$\left. \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\ln \left(\frac{\sqrt{(x_p - L)^2 + y_p^2 + (2nh_1 + D)^2} + L - x_p}{\sqrt{x_p^2 + y_p^2 + (2nh_1 + D)^2} - x_p} \right) \right] \right\}$$

As expressões (3.20) e (3.21) fornecem o potencial induzido na superfície do solo pela corrente de dispersão de segmento posicionado na camada superior e na camada inferior do solo, respectivamente. Observa-se que as expressões para solo heterogêneo servem para o solo homogêneo, quando K é igual a zero.

3.2 Resistência mútua em segmentos na camada superior do solo

Sejam dois segmentos: j de comprimento L_j e k de comprimento L_k , enterrados horizontalmente na profundidade de módulo z_j e z_k , respectivamente, na camada superior do solo heterogêneo de duas camadas, como ilustrado na Figura 3.4, adaptada de Pires (2016). Considera-se que o segmento j dispersa corrente de valor i para o solo com densidade constante em todo o seu comprimento. Desta forma, substitui-se P da Figura 3.3 pelo segmento k , como ilustra a Figura 3.5.

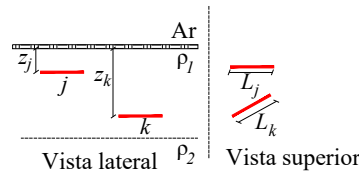


Figura 3.4 - Segmentos em solo estratificado em duas camadas.

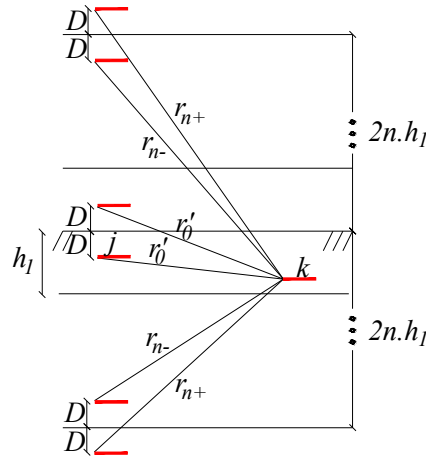


Figura 3.5 - Imagens refletidas entre segmento fonte e segmento receptor na primeira camada do solo.

O potencial induzido pela corrente de dispersão da fonte j no segmento k é calculado como o potencial médio de infinitas fontes pontuais ao longo do comprimento dL_j da fonte e de suas imagens em infinitos pontos ao longo do comprimento dL_k . Estando ambos os segmentos enterrados com mesma profundidade D no solo, a resistência mútua é dada por:

$$R_{jk} = \frac{v_k}{i_j} = \frac{\rho_1}{4\pi L_k L_j} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} K^n [M(2nh_1) + M(2nh_1 + 2D)] + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [M(2nh_1) + M(2nh_1 - 2D)] \right\} \quad (3.22)$$

na qual, M é a solução da integral dupla ao longo dos comprimentos L_j e L_k . Observa-se que a resistência mútua do segmento j vista pelo segmento k é a mesma do segmento k vista por j , logo $R_{jk} = R_{kj}$.

3.3 Resistência mútua em segmentos na camada inferior do solo

Considerando a mesma posição relativa entre a fonte linear e o segmento receptor da seção, exceto pelo fato de ambos estarem na camada inferior do solo, tem-se os conjuntos de imagens ilustrados na Figura 3.6.

A imagem j' é gerada devido a reflexão de j por baixo do plano da interface entre as duas camadas do solo. A constante de reflexão das ondas do campo elétrico que

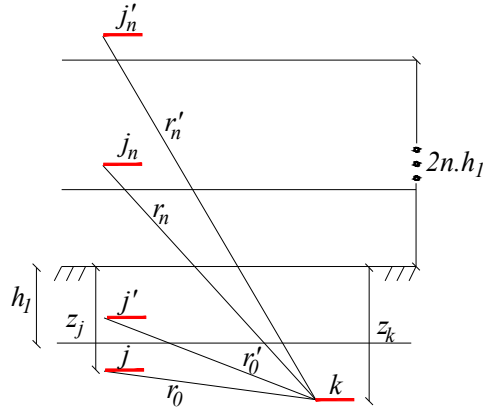


Figura 3.6 - Imagens refletidas entre segmento fonte e segmento receptor na camada inferior do solo.

refletem por baixo do plano da interface das camadas K' , é dado por:

$$K' = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = K \quad (3.23)$$

A fonte j também reflete no plano da superfície do solo, ocasionando a imagem j_n . Esta imagem está situada verticalmente a distância de $z_j + z_k$ do segmento k . Nesta imagem as ondas que partem de j refratam da camada inferior para a camada superior e vice-versa, desta maneira a constante de refração é dada por:

$$(1 + K')(1 + K) = (1 - K)(1 + K) = 1 - K^2 \quad (3.24)$$

A imagem j'_n é a representação de infinitas imagens geradas devido as reflexões da imagem j_n no plano da interface entre as camadas do solo e a superfície do solo. As imagens j'_n se distanciam verticalmente do segmento k na relação $2nh_1 + z_j + z_k$. Para este caso o fator de reflexão juntamente com o de refração nas duas interfaces é dado por $1 - K^2$. Observa-se que não há imagens abaixo do segmento j por não existir planos refletoras inferiores à sua profundidade. Assim, a resistência mútua vista pelo segmento j devido o potencial elétrico induzido no segmento k pela corrente de dispersão do segmento j e suas imagens é dada por:

$$R_{jk} = R_{kj} = \left(\frac{\rho_2}{4\pi L_j L_k} \right) [M(z_j - z_k) - K \cdot M(2h_1 - z_j - z_k) +$$

$$(1 - K^2) \sum_{n=1}^{\infty} K^n M(2nh_1 + z_j + z_k) \quad (3.25)$$

Estando os segmentos enterrados na mesma profundidade, $z_j = z_k = D$, na camada inferior do solo, a resist\encia m\utua \e dada por:

$$R_{jk} = R_{kj} = \frac{\rho_2}{4\pi L_j L_k} [M(0) - KM(2h_1 - 2D) + (1 - K^2) \sum_{n=1}^{\infty} K^n M(2nh_1 + 2D)] \quad (3.26)$$

Estando a fonte na camada inferior do solo e o segmento receptor na camada superior, como ilustrado na Figura 3.7, a resist\encia m\utua entre os segmentos \e dada por:

$$R_{jk} = R_{kj} = \frac{\rho_2(1 - K)}{4\pi L_j L_k} \sum_{n=1}^{\infty} K^n [M(2nh_1 + z_j + z_k) + M(2nh_1 + z_j - z_k)] \quad (3.27)$$

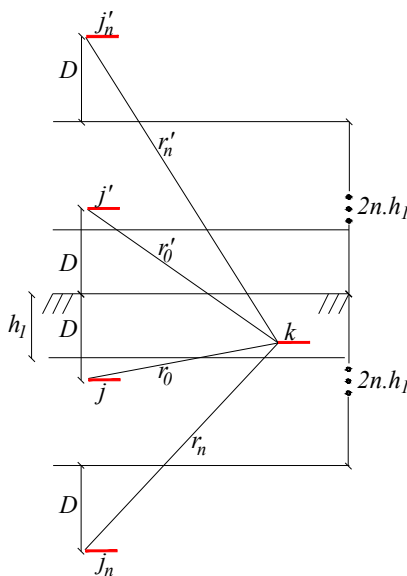


Figura 3.7 - Imagens refletidas da fonte na camada inferior e segmento receptor na camada superior.

3.4 Resistência mútua em solo homogêneo

Em solo homogêneo não há planos de reflexão, portanto, o fator de reflexão entre as camadas do solo é zero. Desta forma, todos os termos dos somatórios em (3.22) serão zerados, com exceção quando $n = 0$, no qual adota-se que $K^0 = 0^0 = 1$. Assim, a expressão para resistência mútua entre segmentos enterrados a mesma profundidade em solo homogêneo, considerando a imagem, é dada por:

$$R_{jk} = R_{kj} = \frac{\rho_1}{4\pi L} [M(0) + M(2D)] \quad (3.28)$$

3.4.1 Resistência própria

A resistência própria do segmento j em R_{jj} é a relação entre o potencial induzido no segmento pela sua própria corrente de dispersão. Para se realizar o cálculo é adotado segundo segmento idêntico ao segmento original, paralelo e a distância igual ao raio do eletrodo que compõe o segmento. Assim, utiliza-se (3.22) com $L_j = L_k$.

3.5 Determinação da função M

A variável M que aparece nas expressões (3.22), (3.25) até (3.28) é a solução da integral dupla ao longo dos comprimentos L_j e L_k . Ela não só depende da distância vertical entre os segmentos, mas também da posição relativa entre os segmentos em todas as direções. A determinação da função M tem base nos estudos apresentados por Campbell (1915) e Heppe (1979).

$$M = \int \int \frac{1}{r} dL_k dL_j \quad (3.29)$$

Considerando os segmentos oblíquos e limitados pelos pontos AB e EF na Figura 3.8, adaptada de Heppe (1979) e contidos em diferentes planos paralelos ao plano da superfície do solo, M pode ser calculada para $0 \leq \theta \leq \pi$, dada por:

$$\begin{aligned} M(CG) = & \underline{CB} \cdot \ln \left(\frac{BF + bF}{BE + bE} \right) - \underline{CA} \cdot \ln \left(\frac{AF + aF}{AE + aE} \right) + \\ & \underline{GF} \cdot \ln \left(\frac{BF + fB}{AF + fA} \right) - \underline{GE} \cdot \ln \left(\frac{BE + eB}{AE + eA} \right) - \frac{CG|\delta|}{\text{sen}(\theta)} \end{aligned} \quad (3.30)$$

na qual:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{CG}{BF \cdot \tan(\theta)} + \frac{CB \cdot GF \text{sen}(\theta)}{CG \cdot BF} \right) -$$

$$\begin{aligned}
& \tan^{-1} \left(\frac{CG}{BE \cdot \tan(\theta)} + \frac{CB \cdot GE \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot BE} \right) - \\
& \tan^{-1} \left(\frac{CG}{AF \cdot \tan(\theta)} + \frac{CA \cdot GF \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot BE} \right) + \\
& \tan^{-1} \left(\frac{CG}{AE \cdot \tan(\theta)} + \frac{CA \cdot GE \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot AE} \right)
\end{aligned} \tag{3.31}$$

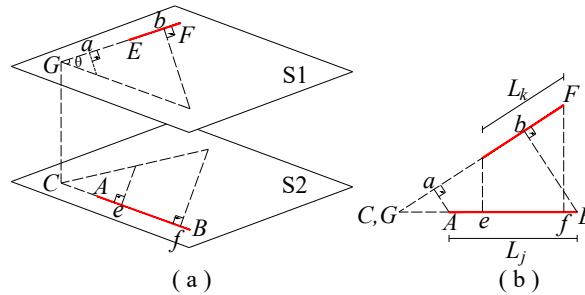


Figura 3.8 - Diagrama correspondente: (a) posição relativa entre segmentos em ângulo e (b) bidimensional da posição relativa entre segmentos em ângulo.

A Figura 3.8 ilustra o diagrama que corresponde aos termos em (3.30) e (3.31). Sendo o Plano S_1 paralelo ao plano da superfície do solo em que está contido o segmento EF e o Plano S_2 paralelo ao Plano S_1 em que está contido o segmento AB . Os termos da função M e da variável δ referente as distâncias entre os pontos podem ser calculados por (3.32). Os termos sublinhados são adotados como positivo no sentido de C para B e de G para F , e negativo no sentido contrário. Os demais termos não sublinhados são adotados sempre como positivos. No caso dos segmentos serem paralelos, têm-se o diagrama ilustrado na Figura 3.9 (a).

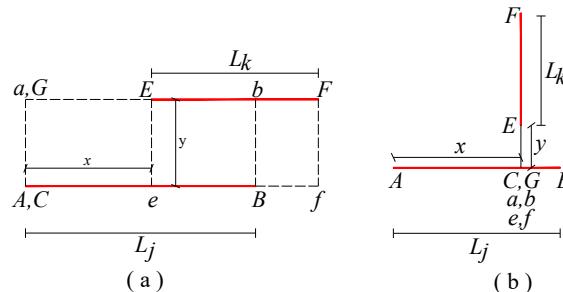


Figura 3.9 - Diagrama correspondente: (a) posição relativa entre segmentos paralelos e (b) posição relativa entre segmentos perpendiculares.

$$\begin{aligned}
z &= CG & BF &= \sqrt{(X_F - L_j)^2 + Y_F^2 + z^2} \\
X_F &= x + L_k \cos(\theta) & \underline{bE} &= \underline{GE} - Gb \\
Y_F &= y + L_k \text{sen}(\theta) & \underline{bF} &= \underline{GF} - Gb \\
\underline{GE} &= y / \text{sen}(\theta) & AE &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\
\underline{GF} &= Y_F / \text{sen}(\theta) & AF &= \sqrt{X_F^2 + Y_F^2 + z^2} \\
Ce &= y / \tan(\theta) & \underline{aE} &= \underline{GE} - Ga \\
\underline{CA} &= Ce - X_F & \underline{aF} &= \underline{GF} - Ga \\
Cf &= Y_F / \tan(\theta) & \underline{eA} &= \underline{CA} - \underline{CE} \\
\underline{CB} &= \underline{CA} + L_j & \underline{fA} &= \underline{CA} - \underline{Cf} \\
\underline{Ga} &= \underline{CA} \cos(\theta) & \underline{eB} &= \underline{CB} - Ce \\
\underline{Gb} &= \underline{CB} \cos(\theta) & \underline{fB} &= \underline{CB} - Cf \\
BE &= \sqrt{(x - L_j)^2 + y^2 + z^2} & &
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Com $\theta = 0$ tem-se $\text{sen}(\theta) = 0$, isto acarreta que o último termo de (3.30) resulte em ∞ . Contudo, analisando (3.31) observa-se que a medida em que $\theta \rightarrow 0$, a variável $\delta \rightarrow$ para:

$$\delta = \frac{(BE + AF - BF - AE)\text{sen}(\theta)}{CG} \tag{3.33}$$

Assim, tem-se que:

$$\frac{CG \cdot \delta}{\text{sen}(\theta)} \approx BE + AF - BF - AE \tag{3.34}$$

Desta forma, a função M para segmentos paralelos é dada por:

$$\begin{aligned}
M(z) &= \underline{CB} \ln \left(\frac{BF + \underline{bF}}{BE + \underline{bE}} \right) + \underline{GF} \ln \left(\frac{BF + \underline{fB}}{AF + \underline{fA}} \right) \\
&\quad \underline{GE} \ln \left(\frac{BE + \underline{eB}}{AE + \underline{eA}} \right) - |BE + AF - BF - AE|
\end{aligned} \tag{3.35}$$

na qual:

$$\begin{aligned}
\underline{CB} &= L_j & \underline{fB} &= -B'F \\
\underline{bF} &= x + L_j + L_k & \underline{fA} &= -x - L_k \\
BF &= \sqrt{\underline{bF}^2 + y^2 + z^2} & AF &= \sqrt{(x - L_k)^2 + y^2 + z^2} \\
\underline{bE} &= x - L_j & \underline{GE} &= x \\
BE &= \sqrt{\underline{bE}^2 + y^2 + z^2} & \underline{eB} &= -\underline{bE} \\
CA &= 0 & AE &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\
\underline{GF} &= x + L_k & \underline{eA} &= -x
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Sendo os segmentos paralelos e colineares, $y = 0$ e $z = 0$, adota-se o valor de y igual ao raio do eletrodo. Desta forma, evita-se que $BE + \underline{eB}$ e $AE + \underline{eA}$ se tornem

iguais a zero resultando em 0/0 e alterando infinitamente no resultado final. Estando os segmentos posicionados perpendicularmente entre si, obtém-se o diagrama da Figura 3.9 (b), na qual, a variável δ é dada por:

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{CB \cdot GF \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot BF} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{CB \cdot GE \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot BE} \right) - \quad (3.37)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{CA \cdot GF \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot AF} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{CA \cdot GE \cdot \text{sen}(\theta)}{CG \cdot AE} \right)$$

Em (3.37) as distâncias podem ser calculadas como em (3.32), considerando Ce e Cf iguais a zero.

3.6 Potencial em hastes verticais

Aplicando o conceito de potencial elétrico na superfície do solo com estratificação em duas camadas horizontais, na qual a expressão que define o potencial resultante em um ponto P é dado por (3.14), é possível determinar o valor de potencial em haste vertical posicionada ao longo do eixo z e com comprimento D . Neste modelo, a corrente que deixa o eletrodo e se dissipa no solo é a mesma em qualquer posição. Desta forma, para determinar o potencial no ponto P qualquer em relação ao terra remoto, cada um dos segmentos de comprimento δz do eletrodo, corresponde a uma fonte de corrente e tem influência neste ponto. Considerando a superfície do solo na posição $z = 0$ e o eletrodo de aterramento no sentido positivo do eixo z , sua imagem está no sentido negativo de z , como ilustrado na Figura 3.10. A corrente que deixa o eletrodo é a mesma em qualquer ponto ao longo da sua extensão, desta forma, o potencial no ponto P é dado por:

$$v_h = \int_0^D \frac{\rho I}{4\pi D} \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r'_0} \right) dz \quad (3.38)$$

na qual, $r_0 = (0 - x_0)^2 + (0 - y_0)^2 + (z - z_0)^2$ e $r'_0 = (0 - x_0)^2 + (0 - y_0)^2 + (z + z_0)^2$, fazendo $x_0^2 + y_0^2 = b^2$ e considerando que a distância entre a superfície do eletrodo e seu eixo central corresponde ao seu raio, faz-se $b = r$, de forma a obter o valor do potencial médio na superfície do eletrodo e, desta forma, tem-se o potencial médio na superfície da haste vertical, dado por:

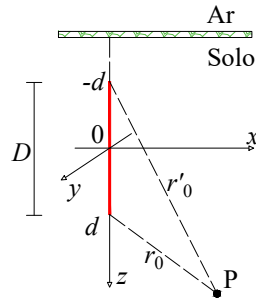


Figura 3.10 - Haste vertical em solo homogêneo.

$$V_{médh} = \frac{\rho I}{2\pi D} \left\{ \ln \left[\frac{2D}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{r^2}{2D}} \right) \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{r^2}{2D} \right)} + \frac{r}{2D} \right\} \quad (3.39)$$

3.7 Considerações finais

Este capítulo apresentou a modelagem matemática do potencial induzido na superfície do solo, resistência mútua para segmentos individuais e haste verticais. As expressões obtidas são utilizadas no simulador do otimizador que será apresentado no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

OTIMIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados conceitos sobre o processo de otimização. O intuito é estabelecer a base para a compreensão da metodologia deste trabalho. São abordados os problemas de otimização, os métodos de otimização heurísticos com ênfase no algoritmo genético, enxame de partículas e análise de sensibilidade dos parâmetros do sistema.

4.1 Sistema, modelo e simulação

Segundo Churchman (1971) sistema é o conjunto de partes coordenadas que realizam juntas o conjunto de finalidades. Para Maier e Reichtin (2009) sistema é o conjunto de elementos que produzem resultados impossíveis de serem obtidos pelos elementos de forma individual. Assim, sistema pode ser dado como o conjunto de elementos que interagem entre si, contribuindo para o comportamento comum, no qual tal comportamento determina os resultados produzidos pelo sistema.

De acordo com Chwif e Medina (2015) modelo é a representação de todos os componentes internos do sistema, produzido no intuito de estudar o real comportamento do sistema, tomando por base os aspectos que realmente interferem no estudo realizado. Modelo pode ser descrito como a simplificação do sistema real, porém o modelo deve ser o mais representativo possível do sistema, para que se tenha resultados válidos permitindo a validação do modelo. Existem basicamente dois tipos de modelos, os modelos físicos, que são construídos através de protótipos e/ou plantas e os modelos matemáticos, que são notações simbólicas representadas por expressões matemáticas que descrevem o sistema (REIS, 2014).

Para Pritsker (1986) simulação pode ser considerado como o processo de construção do modelo matemático do sistema em estudo e a realização de experimentos, na maioria, ocorrendo nos ambientes virtuais. Assim, é garantido que não há interferência e/ou perturbação no sistema real, além de viabilizar as análises em projetos sem ter que construí-los fisicamente. Shannon (1975) apresenta a simulação como metodologia voltada à resolução de problemas e estruturada em processo de modelagem do sistema e análise de sistemas físicos ou virtuais, propostos em computador.

Ao ambiente na qual é realizada a simulação, dá-se o nome de simulador. O simulador reproduz o comportamento de determinados sistemas sob determinadas condições, imitando as circunstâncias reais do sistema. A aplicação do simulador no processo

de otimização permite responder questões antes não observadas, levando em consideração a complexidade dos sistemas, tais como a variabilidade da ocorrência de eventos, complexidades associadas a decisões e restrições próprias da dinâmica dos sistemas (SOUZA, 2019).

4.2 Processo de otimização

Fletcher (2000) classifica processo de otimização como sendo, a ciência que objetiva determinar as melhores soluções para algum problema definido matematicamente, podendo ser geralmente, a representação do modelo real. Para Calixto et al. (2015) processo de otimização é o estudo de problemas nas mais variadas áreas, em que se busca minimizar ou maximizar a função de avaliação por meio de escolha sistemática das variáveis dentro de determinado domínio, obedecendo aos conjuntos de restrições. Logo, para realizar otimização faz-se necessário conhecimento do processo e das variáveis que são otimizadas (CALIXTO et al., 2010).

O processo de otimização busca encontrar a melhor solução dentre várias soluções possíveis, que são aquelas que satisfazem as restrições do problema de otimização. Desta forma, a partir do uso de métodos de otimização, busca-se empregar pesquisa pela solução ótima e/ou otimizada do sistema, utilizando critérios e parâmetros determinísticos e/ou heurísticos para direcionar a busca (CALIXTO et al., 2015).

4.3 Métodos de otimização

Os métodos de otimização podem ser classificados como determinísticos, inferenciais, heurísticos e estocásticos. Segundo Calixto (2012) os métodos de otimização baseados nos algoritmos determinísticos produzem sequência determinística de possíveis soluções e a resposta final sempre é a mesma, a partir dos mesmos pontos iniciais. Estes métodos requerem, na maioria das vezes, a utilização de pelo menos a primeira derivada da função objetivo, a qual deve ser contínua e diferenciável, dentro do espaço de busca. Os métodos inferenciais são métodos que testam possíveis soluções escolhidas aleatoriamente, podendo guardar as melhores soluções ou não.

Os métodos heurísticos de otimização consistem em conjuntos de regras com objetivo de encontrar soluções de problemas que utilizam parâmetros estocásticos. Dentre os métodos heurísticos de otimização, destaca-se o Algoritmo Genético (LEE K.; EL-SHARKAWI, 2008). Estes algoritmos são flexíveis e largamente utilizados para tratar problemas de otimização multiobjetivo, pois, trabalham com várias soluções simultaneamente, permitindo a manutenção da diversidade da população e não ne-

cessitam de parâmetros adicionais na formulação do problema (PINHEIRO NETO, 2017). Os métodos estocásticos utilizam funções de probabilidades estatísticas para produção de diversos cenários.

4.3.1 Algoritmo genético

O algoritmo genético é uma das técnicas de otimização heurística, podendo ser usada em problemas na qual técnicas com base em algoritmos determinísticos são incapazes de obter soluções satisfatórias (CALIXTO et al., 2010). Nos algoritmos genéticos, populações de indivíduos são criadas e submetidas aos operadores genéticos. Os operadores utilizam características mensuradas na qualidade de cada indivíduo em relação ao meio em que ele está inserido, sendo cada indivíduo possível solução para o problema proposto. A medida da qualidade de cada indivíduo é chamada de avaliação, e gera processo de evolução natural destes indivíduos que eventualmente gerará outro indivíduo melhor adaptado ao meio no qual ele está inserido, combinando a sobrevivência entre os melhores com forma estruturada de troca de informações genéticas entre os indivíduos da população, formando a heurística de busca.

4.3.1.1 Características do algoritmo genético

A estrutura genérica do algoritmo genético clássico pode ser sintetizada como ilustrado na Figura 4.1, adaptada de Calixto (2012). Ao iniciar o algoritmo genético a população de indivíduos que representa o conjunto de possíveis soluções do problema, é submetida a transformações. A geração é constituída por cada ciclo de avaliação, espera-se que o algoritmo genético, ao fim de número razoável de gerações, apresente o candidato ótimo ou que o melhor indivíduo seja uma solução otimizada. Os algoritmos genéticos requerem que as variáveis dos problemas a serem otimizados sejam codificadas em cromossomo de comprimento finito, sendo a população inicial formada pelo conjunto de cromossomos, como ilustrado na Figura 4.2, adaptada de Calixto (2012), na qual $G_1, G_2, G_3, \dots, G_n$ são os genes e $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ são os cromossomos.

A função de avaliação é a estrutura responsável por determinar a aptidão de cada indivíduo da população, sendo específica para cada aplicação, avaliando o comportamento dos indivíduos no ambiente ao qual está inserido (REZENDE, 2005). Nesta função deve estar embutido todo o conhecimento que se possui sobre o problema a ser resolvido (CALIXTO et al., 2010). O critério de parada do algoritmo genético estabelece o limite de execução. Linden (2006) determina como possíveis critérios de paradas: i) o número de gerações, ii) estagnação da função de avaliação, iii) valor

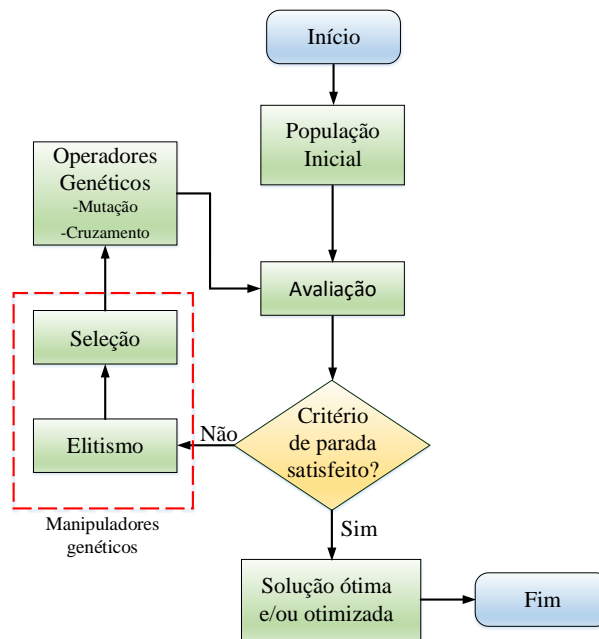


Figura 4.1 - Algoritmo genético clássico.

	G_1	G_2	G_3	...	G_n
C_1	C_1G_1	C_1G_2	C_1G_3	...	C_1G_n
C_2	C_2G_1	C_2G_2	C_2G_3	...	C_2G_n
C_3	C_3G_1	C_3G_2	C_3G_3	...	C_3G_n
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
C_n	C_nG_1	C_nG_2	C_nG_3	...	C_nG_n

Figura 4.2 - Matriz Populacional do Algoritmo Genético.

limite da função de avaliação e iv) tempo limite de execução.

O manipulador genético elitismo garante que o melhor indivíduo de cada geração não se perca durante as manipulações do algoritmo. O melhor indivíduo de cada geração não deve ser substituído junto à sua geração, mas sim passar para a próxima geração garantindo que seus genes sejam preservados. O manipulador de seleção consiste em permitir que indivíduos mais adaptados da população sejam preservados, enquanto os menos aptos sejam substituídos por indivíduos mais aptos, com o objetivo de que características passem a predominar nas novas gerações (HOLLAND, 1992).

O operador de recombinação é responsável pelas trocas genéticas entre os indivíduos durante a reprodução, permitindo que as próximas gerações herdem as caracterís-

ticas dos indivíduos atuais. A quantidade de cromossomos que são submetidos no processo é determinado por taxa de probabilidade de cruzamento. Este operador realiza a busca global, visitando locais não antes visitados do espaço de busca Ω (CALIXTO et al., 2010). Dentre os tipos de cruzamentos descritos na literatura, o cruzamento heurístico apresentado por Gomes et al. (2016) consiste em gerar múltiplos descendentes a partir de dois progenitores, sendo os novos indivíduos formados da análise gene a gene dos progenitores.

O operador de mutação insere variabilidade dentro da população. Ele consiste basicamente em alterar os valores dos genéticos de forma aleatória em cada indivíduo, criando diversidade extra na população sem destruir o progresso já obtido com a busca. O operador de mutação garante que novas características genéticas sejam introduzidas na população, características que ainda não haviam aparecido em nenhum outro indivíduo de gerações anteriores (LINDEN, 2006). Dentre os operadores de mutação descritos na literatura, existe o operador de mutação adaptativo que aumenta ou diminui os valores das perturbações nos genes alterando a taxa de mutação de acordo com a evolução do valor da função de avaliação. Este operador incrementa a perturbação quando a população estagna no ótimo local e reduz a perturbação quando a população evolui rapidamente (SUMATHI et al., 2008).

4.3.2 Algoritmo por enxame de partículas

Kennedy e Eberhart (2001) propõem algoritmo baseado em método estocástico fundamentado nas técnicas de computação evolucionária, o algoritmo é inspirado na simulação do comportamento social de bando de pássaros em revoada com movimento localmente aleatório, mas globalmente determinado, o algoritmo enxame de partículas (*particle swarm optimization - PSO*). O algoritmo enxame de partículas é formado por população de indivíduos, chamados de partículas, que evoluem através da cooperação e competição entre si, as partículas se beneficiam de sua própria experiência e da experiência de outros membros do enxame durante a busca por melhor solução, da mesma forma que o ser humano se espelha em sua própria experiência e dos indivíduos melhores sucedidos.

O algoritmo é composto por conjunto de partículas movendo-se em espaço de busca n -dimensional, sendo cada partícula uma solução potencial para o problema. Por estar movendo-se no espaço, cada partícula i que compõe a nuvem é representada por uma posição no espaço n -dimensional, dada por:

$$X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}) \quad (4.1)$$

Para que as partículas se movam no espaço, é utilizada taxa da mudança de posição, que é chamada de velocidade, que para a i -ésima partícula, é representada por:

$$V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{in}) \quad (4.2)$$

As partículas possuem memória individual e social, a memória individual é a melhor posição alcançada por cada partícula e a memória social é a melhor posição alcançada pelo enxame até determinada iteração. Então a velocidade da partícula i na dimensão n é dada por:

$$V_{in+1} = W \cdot V_{in} + C_1 \cdot R_1 \cdot (P_{in} - X_{in}) + C_2 \cdot R_2 \cdot (P_{gn} - X_{in}) \quad (4.3)$$

$$X_{in+1} = X_{in} + V_{in} \quad (4.4)$$

na qual, W é o fator de inércia, variável responsável por determinar a diversificação das partículas, é o passo de busca das partículas, alto valor de W direciona as partículas para ampla exploração (LEE K.; EL-SHARKAWI, 2008), C_1 e C_2 são constantes positivas que correspondem às componentes cognitivas individuais e sociais, R_1 e R_2 são funções aleatórias no intervalo entre $[0, 1]$, P_{in} é a melhor posição encontrada pela partícula, P_{gn} é a melhor posição global encontrada por todas as partículas e X_{in} é a posição atual da partícula.

A Figura 4.3, adaptada de Cordeiro Junior (2011), ilustra o fluxo de execução do algoritmo enxame de partículas. Inicialmente as partículas são geradas aleatoriamente (posições e velocidade). O desempenho de cada partícula é medido de acordo com a função de avaliação $f(x)$. Os valores otimizados são os que fazem com que $f(x) \approx 0$. Se o critério de parada não for atendido a velocidade e posição da partícula são atualizadas. O processo de atualização a cada iteração depende da definição de vizinhança.

A vizinhança da partícula é encontrada de duas formas: i) permite que a vizinhança seja definida com base na qualidade da solução apresentada por cada partícula observando o valor da função de avaliação e ii) permite que os vizinhos da partícula sejam encontrados com base nos valores de suas posições no espaço de busca, utilizando as informações geográficas. A primeira forma de encontrar a vizinhança é dita social, pois não importa a disposição das partículas no espaço, mas sim a qualidade

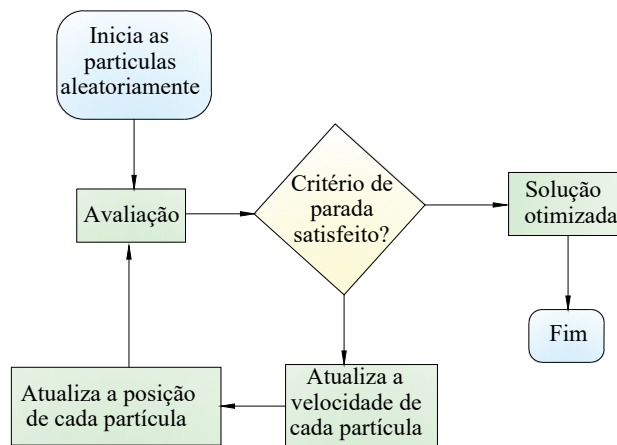


Figura 4.3 - Algoritmo enxame de partículas clássico.

de sua solução para o problema. Uma partícula na nuvem é considerada sua própria vizinha (CORDEIRO Junior, 2011).

4.3.3 Análise de sensibilidade de sistemas

Em sistemas, os diferentes cenários e circunstâncias trazem a necessidade de simplificar os modelos, identificar erros e, principalmente, estabelecer a relação entre as variáveis de entrada e de saída do sistema. Além das técnicas de identificação de sistemas, que permitem a obtenção de expressões que representam o comportamento dinâmico de determinado sistema, é necessário conhecer quantitativamente qual a influência das variáveis de entrada sobre as variáveis de saída do sistema. Desta forma, a análise de sensibilidade pode ser empregada, sob diferentes técnicas, para se obter os valores desta influência (GOMES et al., 2017).

Segundo Hamby (1994) a análise de sensibilidade consiste em estudar o efeito que a variação de dada entrada pode ocasionar nos resultados. Quando pequena variação de dado parâmetro altera drasticamente a rentabilidade do projeto, diz-se que o projeto é sensível a este parâmetro. As técnicas de análise de sensibilidade podem ser divididas em dois grupos: i) aquelas que manipulam apenas uma variável por vez e ii) as que dependem da geração da matriz de entrada associada ao vetor de saída (WANG et al., 2013).

O método que consiste em variar apenas uma variável por vez, conhecido como *one-at-a-time*, para o sistema de k variáveis de entrada, promove a variação em uma das variáveis de entrada enquanto $k - 1$ variáveis permanecem constantes em seus

valores chamados de valores base. Para o sistema com k variáveis de entrada existe o valor de saída $y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ e $\beta = y$, no qual y é a solução base. O cruzamento do eixo das ordenadas com o eixo base β na Figura 4.4, adaptada de Gomes (2020), ilustra a solução base como $\beta(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Desta forma, o índice de sensibilidade é dado por:

$$S_{x_i}^a = \frac{A_{x_i}}{\sum_{i=1}^k A_{x_i}} \quad (4.5)$$

na qual, $S_{x_i}^a$ é o índice de sensibilidade do parâmetro x_i dado pelo método da área, A_{x_i} é a área formada pela curva do parâmetro x_i e o eixo-base em β e n é o número de parâmetros de entrada (GOMES, 2020). O índice de sensibilidade é a contribuição da área A_{x_i} em relação a área total. As áreas A_{x_1} e A_{x_2} são determinadas com base no intervalo de interesse para análise.

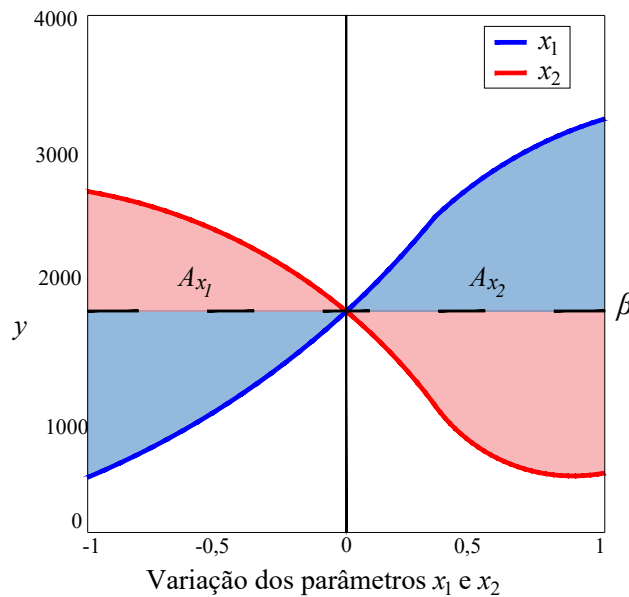


Figura 4.4 - Áreas para análise de sensibilidade dos parâmetros.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo foram discutidos os conceitos de otimização e abordados os métodos heurísticos algoritmo genético e enxame de partículas como ferramentas de otimização. Foi apresentado ainda o conceito básico sobre análise de sensibilidade de sistemas. Estes conceitos em conjunto com os conceitos anteriores serão utilizados

na construção da metodologia, apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para reunir os métodos dispostos nos capítulos anteriores com o intuito de, inicialmente, dividir conceitualmente a malha de aterramento em segmentos retilíneos e distintos, de forma a discretizar o sistema e permitir o cálculo da corrente de dispersão em cada segmento da malha de aterramento elétrico. De posse das correntes de dispersão, determinar a tensão em qualquer ponto da superfície do solo e por fim, apresentar a metodologia para obtenção de geometria otimizada da malha de aterramento elétrico a partir do uso do processo de otimização.

5.1 Contextualização

O dimensionamento da malha de aterramento elétrico, normalmente, é obtido a partir de processo iterativo. Parte-se da malha inicial e verifica-se os valores de potenciais na superfície do solo quando da ocorrência de defeito à terra, de forma a serem inferiores aos valores máximos do potencial de passo e do potencial de toque, levando em consideração o valor de corrente que o indivíduo possa suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular. Caso a condição de potencial de passo e potencial de toque não sejam atendidas, modifica-se o projeto inicial da malha até que sejam estabelecidas as condições exigidas por normas (IEEE, 2015). Com relação ao valor da resistência de malha, este deve ser compatível com a impedância total do sistema, de tal forma a sensibilizar o relé de neutro.

Assim, este trabalho propõe metodologia que através de recursos computacionais realize a otimização da malha de aterramento elétrico para qualquer geometria dos condutores horizontais e hastes verticais em área definida para construção do aterramento elétrico em frequência industrial de $50Hz/60Hz$. Busca-se minimizar a quantidade de condutores e hastes verticais utilizadas, de forma a atender os aspectos relacionados a segurança e redução da impedância, assim como analisar comportamento dos potenciais de toque e de passo para situação de condutores horizontais com angulações relativas distintas, efeitos do comprimento e quantidade de hastes verticais na malha otimizada. A Figura 5.1 ilustra o fluxo da metodologia proposta.

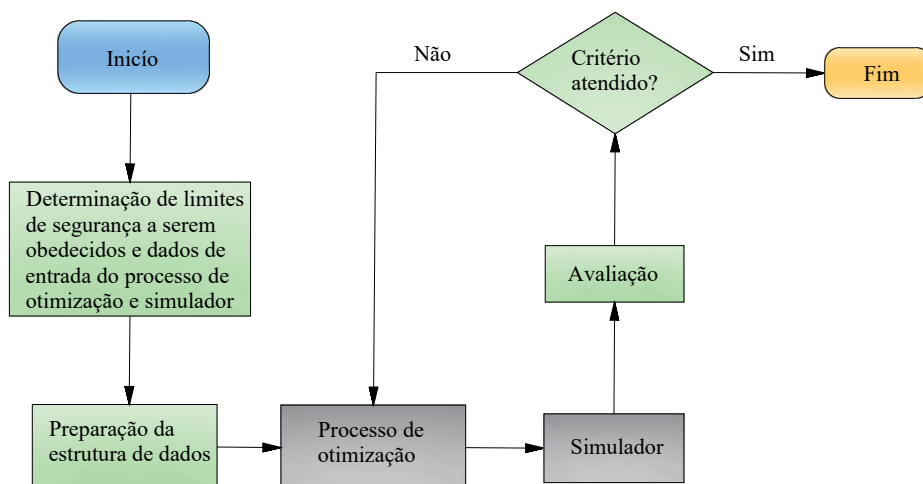


Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia proposta.

5.2 Segmentação da malha de aterramento elétrico

A malha de aterramento inicialmente é dividida em segmentos, sobre os quais são adotadas as considerações: i) a densidade de corrente em cada segmento é constante ao longo de todo o seu comprimento, ii) cada segmento possui corrente de dispersão própria, iii) a soma das correntes de dispersão para o solo de todos os segmentos é igual à corrente aplicada à malha e iv) o potencial na superfície do eletrodo que compõe os segmentos é constante e igual a elevação do potencial da malha (*ground potential rise* - GPR).

A forma apropriada de dividir a malha em segmentos discretos são nos pontos em que ocorrem as intersecções e nos pontos em que o eletrodo altera o ângulo da sua direção. Por exemplo, seja a malha de aterramento composta por eletrodo que possua a geometria ilustrada na Figura 5.2, a divisão do eletrodo ocorre nas intersecções *b*, *d*, *h*, *j* e *k*, assim como nas mudanças de ângulo *a*, *c*, *e*, *f*, *g* e *i*, ocasionando em quatorze segmentos distintos.

Os segmentos são divididos em segmentos menores, sendo que a segmentação produz efeito sobre os resultados e que valores mais precisos são previstos quando os eletrodos são divididos em segmentos cada vez menores. Desta forma, a exatidão da modelagem está associada ao número de segmentos utilizados, estando o modelo ideal com número infinito de segmentos. A característica típica da segmentação inadequada é a existência de potenciais na superfície maiores que o potencial médio sobre os eletrodos.

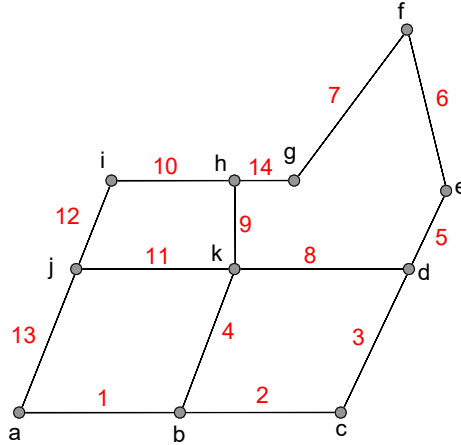


Figura 5.2 - Divisão do eletrodo de terra em segmentos.

5.2.1 Desenvolvimento do sistema matricial e cálculo das tensões

De acordo com (3.22), o potencial induzido no segmento k , Figura 3.5, pela corrente de fuga do segmento j , é o produto da resistência elétrica mútua entre os segmentos com a corrente de dispersão do segmento j . Assim, pelo teorema da superposição, o potencial total induzido no segmento k é o somatório da contribuição do potencial de cada um dos demais segmentos, além do potencial induzido pela própria corrente de dispersão do segmento em questão, dado por:

$$\sum_{n=1}^m R_{kn} \cdot i_n = V_k \quad (5.1)$$

na qual, m é o número de segmentos em que o eletrodo está dividido e V_k é o potencial total no segmento. Desta forma, tem-se:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \dots & R_{2m} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \dots & R_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & R_{m3} & \dots & R_{mm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Assim, para que o sistema apresentado por (5.2) tenha solução, adota-se que as tensões em todos os segmentos são iguais ao potencial médio no eletrodo, que é definido como a elevação de potencial da malha GPR. A corrente total injetada na malha I_g é igual ao somatório das correntes de dispersão de todos os segmentos,

dado por:

$$I_g = \sum_{n=1}^m i_k \quad (5.3)$$

Dessa forma, o GPR pode ser dado por:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \dots & R_{1m} & -1 \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \dots & R_{2m} & -1 \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \dots & R_{3m} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & -1 \\ R_{m1} & R_{m2} & R_{m3} & \dots & R_{mm} & -1 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \vdots \\ i_m \\ GPR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_g \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

na qual, o GPR torna-se variável do sistema, pois a corrente total injetada na malha I_g , que se caracteriza pela corrente de curto-circuito, geralmente, é dado conhecido de projeto e não o potencial no eletrodo. Sendo as expressões da resistência mútua simétricas, isto é, $R_{jk} = R_{kj}$, faz-se necessário calcular apenas metade das resistências elétricas mútuas. Sendo assim, conhecendo o valor da corrente de curto-circuito, o sistema retorna os valores da corrente de dispersão em cada segmento e o GPR, possibilitando assim, determinar a resistência da malha do aterramento elétrico.

O potencial na superfície do solo V_s é calculado somando a contribuição de potencial de cada segmento em cada ponto da superfície do solo, considerando o tipo do solo, a profundidade da malha e espessura da primeira camada do solo. Uma vez obtido o potencial na superfície do solo, a tensão de toque pode ser determinada. A tensão de passo é dada pela diferença de potencial entre cada ponto no qual é calculado o potencial de superfície e ao redor dos mesmos distanciados em um metro, como ilustrado na Figura 5.3. Neste sistema, as coordenadas no ponto P_n são dadas por:

$$\begin{aligned} x_{P_n} &= x_P + \cos(n \cdot \beta) \\ y_{P_n} &= y_P + \sen(n \cdot \beta) \end{aligned} \quad (5.5)$$

5.3 Simulador proposto para malha de aterramento elétrico

A proposta da construção do processo computacional é ilustrada na Figura 5.4, apresentando as etapas de construção do simulador, com: i) mudança de coordenadas

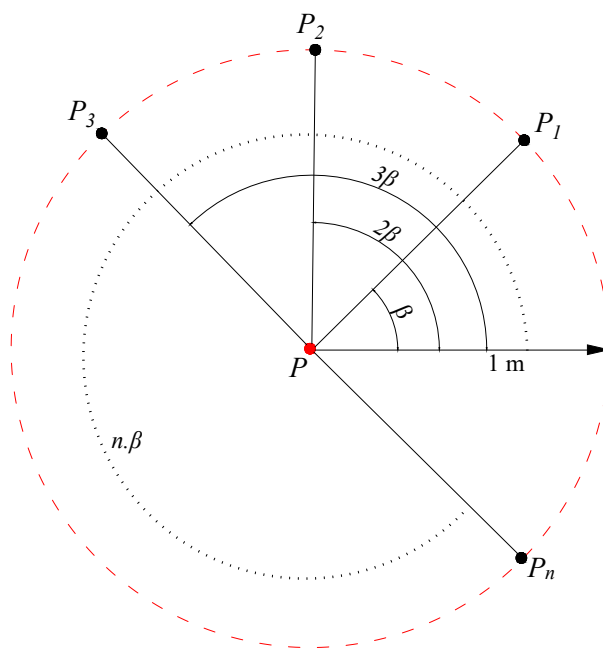


Figura 5.3 - Pontos de medição/cálculo da tensão de passo.

e posição relativa dos segmentos, ii) cálculo e montagem da matriz de resistência própria e mútua, iii) cálculo da corrente de dispersão em cada segmento, iv) cálculo da tensão de superfície do solo e o GPR e v) cálculo da tensão de toque, tensão de passo e resistência da malha.

5.3.1 Mudança de coordenadas e posição relativa dos segmentos

Para calcular as resistências elétricas mútuas e próprias entre os segmentos faz-se necessário conhecer a posição relativa entre os mesmos e as distâncias entre seus pontos. A alteração nas coordenadas dos segmentos mantém inalterada as posições relativas entre os mesmos, sendo utilizada a fim de reduzir o número de expressões e casos de sobreposição entre os segmentos, de forma a não alterar os resultados com a mudança de coordenadas.

Sendo dois segmentos inseridos horizontalmente no solo, utilizando o sistema de coordenadas x e y ilustrado na Figura 5.5, o sistema de coordenadas é alterado para o sistema x' e y' de forma a colocar a extremidade de um dos segmentos na origem. Os valores das coordenadas das extremidades dos segmentos no sistema de

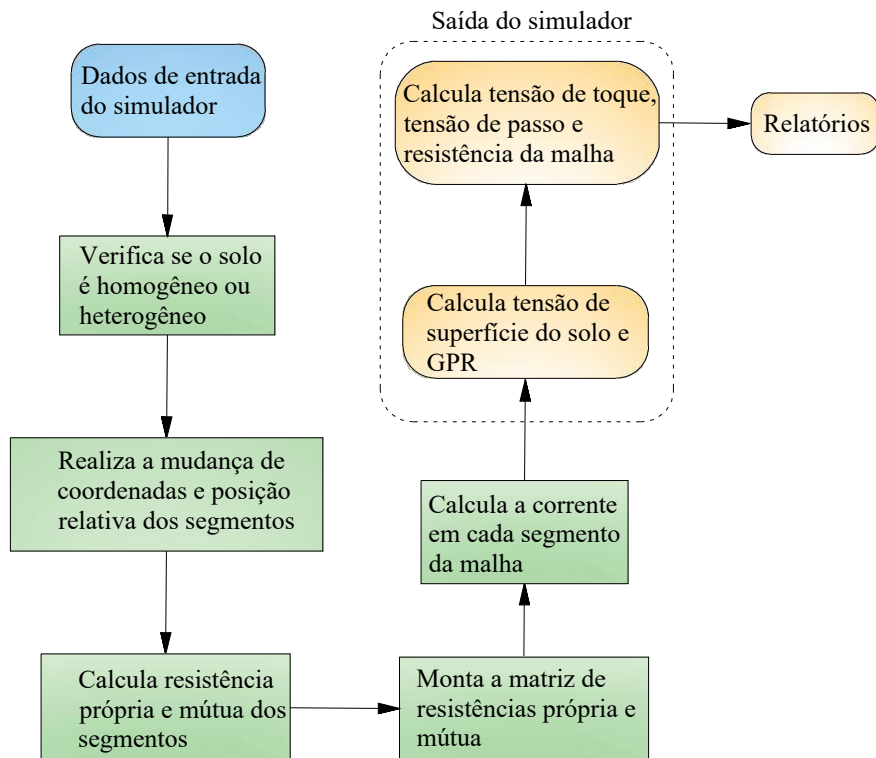


Figura 5.4 - Fluxograma do simulador proposto.

coordenadas x' e y' são dados por:

$$\begin{aligned}
 x'_A &= 0 & y'_A &= 0 \\
 x'_B &= x_B - x_A & y'_B &= y_B - y_A \\
 x'_E &= x_E - x_A & y'_E &= y_E - y_A \\
 x'_F &= x_F - x_A & y'_F &= y_F - y_A
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

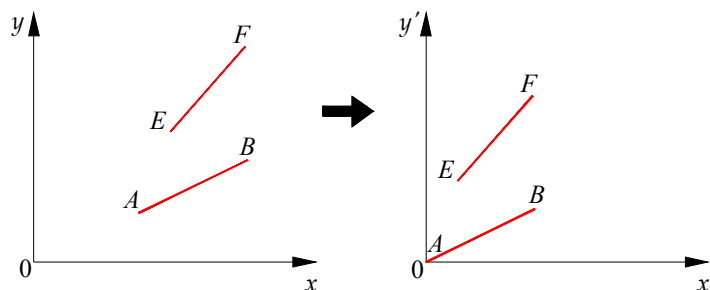


Figura 5.5 - Ilustração do sistema de coordenadas $x \times y$ e $x' \times y'$.

Em seguida, ao mover a extremidade do segmento AB para a origem, realiza-se a

alteração para o sistema u e v colocando o segmento AB sobre o eixo das abscissas, como ilustra a Figura 5.6. As coordenadas dos pontos iniciais e finais dos segmentos no sistema u e v são determinadas pela mudança de coordenadas em duas dimensões, dado por:

$$\begin{aligned}
 u_A &= 0 & v_A &= 0 \\
 u_B &= x'_B \cos(\theta) + y'_B \sin(\theta) & v_B &= -x'_B \sin(\theta) + y'_B \cos(\theta) \\
 u_E &= x'_E \cos(\theta) + y'_E \sin(\theta) & v_E &= -x'_E \sin(\theta) + y'_E \cos(\theta) \\
 u_F &= x'_F \cos(\theta) + y'_F \sin(\theta) & v_F &= -x'_F \sin(\theta) + y'_F \cos(\theta)
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

na qual θ é a declividade do segmento definido pelos pontos A e B em relação ao eixo x' , dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y'_B - y'_A}{x'_B - x'_A} \tag{5.8}$$

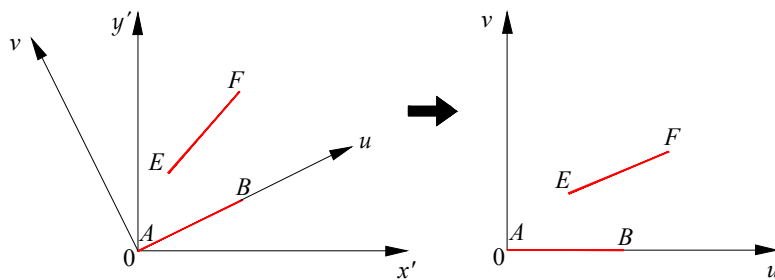


Figura 5.6 - Ilustração do sistema de coordenadas $x' \times y'$ e $u \times v$.

Após realizar a alteração para o plano (u, v) , estando ainda os segmentos em posição diferente da ilustrada na Figura 3.8, realiza-se a mudança nas coordenadas para os casos: i) segmentos paralelos colineares, ii) segmentos paralelos não colineares, iii) segmentos perpendiculares e iv) segmentos oblíquos. Sendo o segmento AB paralelo e colinear ao segmento EF que possui coordenadas representadas no plano (u, v) por u_E e $u_F < 0$, como ilustrado na Figura 5.7, ao realizar a mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') , tem-se que:

$$\begin{aligned}
 u'_E &= u_B - u_F & v'_E &= 0 \\
 u'_F &= u_B - u_E & v'_F &= 0
 \end{aligned} \tag{5.9}$$

Logo, caso os segmentos AB e EF sejam paralelos e não colineares, como ilustrado

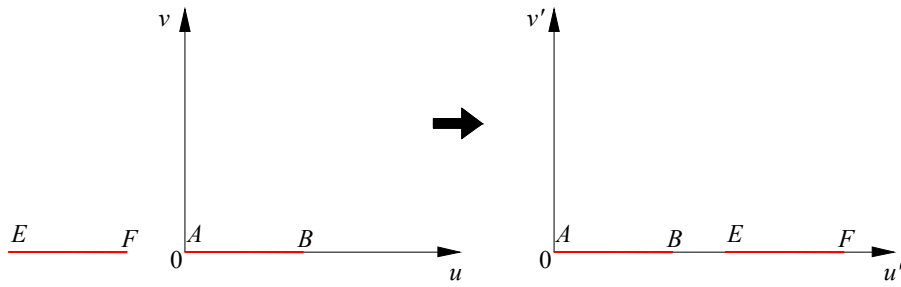


Figura 5.7 - Ilustração do sistema com segmentos paralelos colineares.

na Figura 5.8, espera-se por duas situações: i) $u_E < 0$ e ii) v_E e $v_F < 0$, sendo $u_E < 0$, realiza-se a mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') , tendo suas coordenadas dadas por:

$$\begin{aligned} u'_E &= u_B - u_F & v'_E &= v_E \\ u'_F &= u_B - u_E & v'_F &= v_F \end{aligned} \quad (5.10)$$

E, para v_E e $v_F < 0$, ao realizar a mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') tem-se que as coordenadas do segmento são dadas por:

$$\begin{aligned} u'_E &= u_B - u_F & v'_E &= v_E \\ u'_F &= u_B - u_E & v'_F &= v_F \end{aligned} \quad (5.11)$$

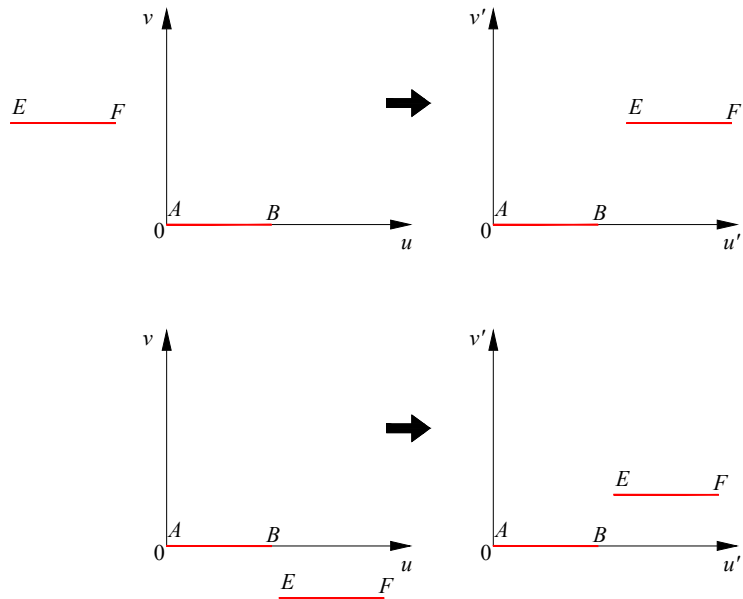


Figura 5.8 - Ilustração do sistema com segmentos paralelos não colineares.

Estando os segmentos AB e EF perpendiculares como ilustra a Figura 5.9, têm-se duas situações possíveis: i) u_E e $u_F < u_A$ e ii) v_E e $v_F < 0$. Assim, para a situação na qual u_E e $u_F < u_A$, as coordenadas do segmento EF , ao realizar a mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') são dadas por:

$$\begin{aligned} u'_E &= u_B - u_E & v'_E &= v_E \\ u'_F &= u_B - u_F & v'_F &= v_F \end{aligned} \quad (5.12)$$

E, para v_E e $v_F < 0$, realizando a mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') , obtém-se as coordenadas do segmento EF dada por:

$$\begin{aligned} u'_E &= u_E & v'_E &= |v_E| \\ u'_F &= u_F & v'_F &= |v_F| \end{aligned} \quad (5.13)$$

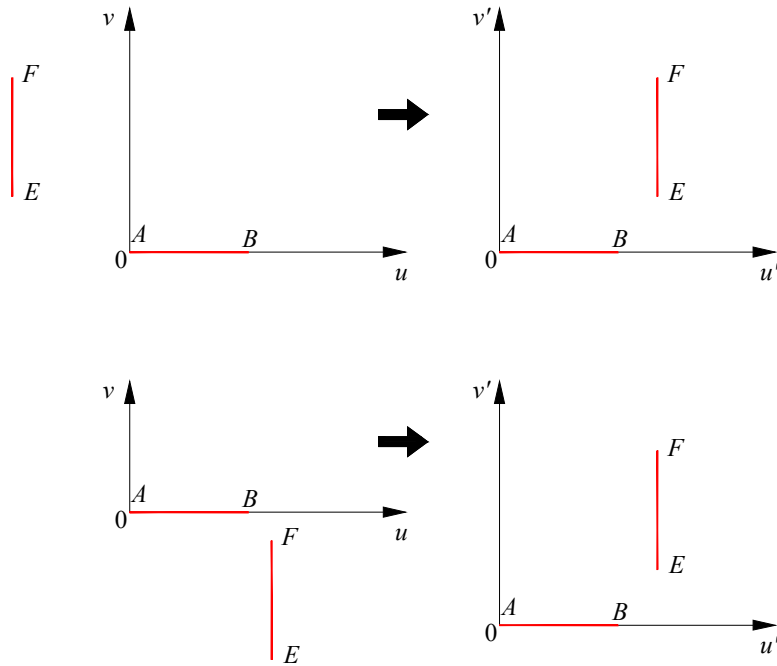


Figura 5.9 - Ilustração do sistema com segmentos perpendiculares.

Estando os segmentos AB e EF oblíquos como ilustrado na Figura 5.10, têm-se duas situações: i) v_E e $v_F < 0$ e ii) $u_F < u_E$. Na condição na qual v_E e $v_F < 0$, as coordenadas do segmento EF após realizar mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') são dadas por:

$$\begin{aligned} u'_E &= u_E & v'_E &= |v_E| \\ u'_F &= u_F & v'_F &= |v_F| \end{aligned} \quad (5.14)$$

Assim, para $u_F < u_E$, têm-se que as coordenadas do segmento EF ao realizar a mudança do plano (u, v) para o plano (u', v') são dadas por:

$$\begin{aligned} u'_E &= u_B - u_F & v'_E &= |v_F| \\ u'_F &= u_B - u_E & v'_F &= |v_E| \end{aligned} \quad (5.15)$$

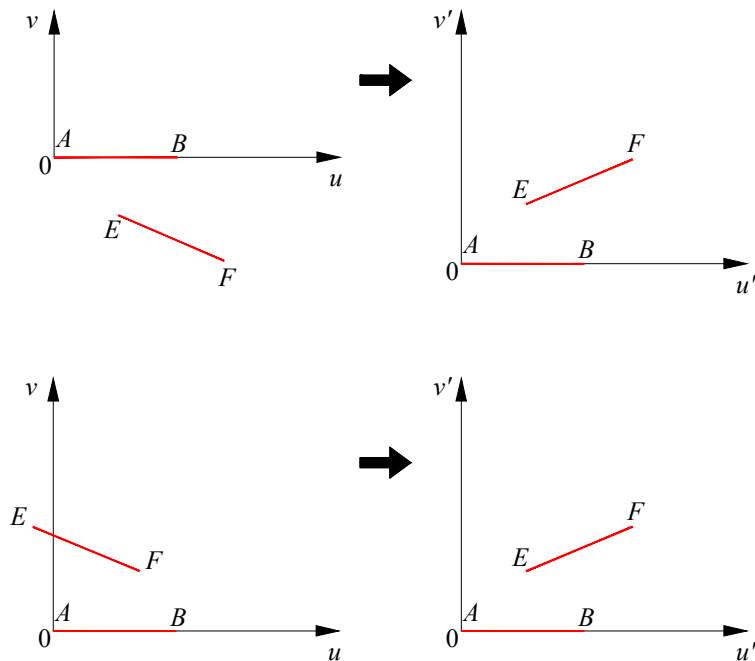


Figura 5.10 - Ilustração do sistema com segmentos oblíquos.

Após as mudanças das coordenadas, é realizada a verificação da posição relativa entre os segmentos, de modo a adequá-los para calcular as distâncias entre os segmentos, para posteriormente montar a matriz com as coordenadas em x e y da posição inicial e final de cada segmento e dos vértices do perímetro da área na qual a malha de aterramento esta contida.

5.3.2 Dados de entrada e saída do simulador

Para a execução das rotinas de cálculos no simulador utiliza-se os dados de entrada: i) resistividade da primeira camada do solo $[\Omega m]$, ii) resistividade da segunda camada do solo $[\Omega m]$, iii) espessura da primeira camada do solo $[m]$, iv) corrente aplicada na

malha $[A]$, v) raio do condutor a ser utilizado na malha $[m]$, vi) estrutura contendo matrizes com as coordenadas dos segmentos, vii) profundidade da malha de aterramento $[m]$, viii) diâmetro de haste vertical em polegadas, ix) comprimento da haste vertical $[m]$, x) ângulo para cálculo da tensão de passo em graus, xi) comprimento máximo dos segmentos $[m]$ e xii) passo para o cálculo do potencial e das tensões $[m]$.

O simulador fornece como saída de dados os valores de tensão de superfície, GPR, tensão de toque, tensão de passo e resistência da malha de aterramento, posteriormente estes valores são utilizados no processo de otimização.

5.4 Processo de otimização aplicado à malha de aterramento elétrico

O processo de otimização da malha de aterramento elétrico busca obter melhor desempenho do sistema com relação a geometria dos eletrodos horizontais, uniformização dos potenciais, posição das hastes verticais e redução de custo de construção. Alguns trabalhos utilizam métodos numéricos baseado em elementos finitos e heurísticos baseados em algoritmo genético e PSO, obtendo os espaçamentos dos eletrodos horizontais que torne o aterramento mais eficiente, minimizando a resistência de aterramento elétrico, as tensões de passo e tensão de toque.

5.4.1 Algoritmo de otimização proposto

O algoritmo de otimização proposto neste trabalho baseia-se em algoritmo evolutivo adaptativo no nível de população e na diversidade populacional, o fluxograma do algoritmo de otimização é ilustrado na Figura 5.11. Os dados de entrada do algoritmo de otimização proposto são: i) desenho da malha inicial no formato *Drawing Exchange Format* (**dxg**), ii) resistividade da brita em $[\Omega m]$, iii) espessura da camada de brita $[m]$, iv) número de possíveis soluções por geração, v) tamanho da população, vi) se utiliza haste vertical no processo de otimização, vii) número de gerações, viii) tempo de atuação da proteção em segundos e ix) pesos da função de avaliação.

O cálculo da tensão de passo e tensão de toque máxima admissíveis, são determinadas a partir de (2.23), (2.24) e a população inicial é formada a partir das matrizes de coordenadas dos segmentos horizontais e hastes verticais caso existam na malha inicial. A Figura 5.12 ilustra a matriz com a malha inicial que é inserida no simulado no formato **dxg**, no qual são gerados os primeiros indivíduos da população.

Os indivíduos da população inicial são formados a partir da retirada e/ou inserção

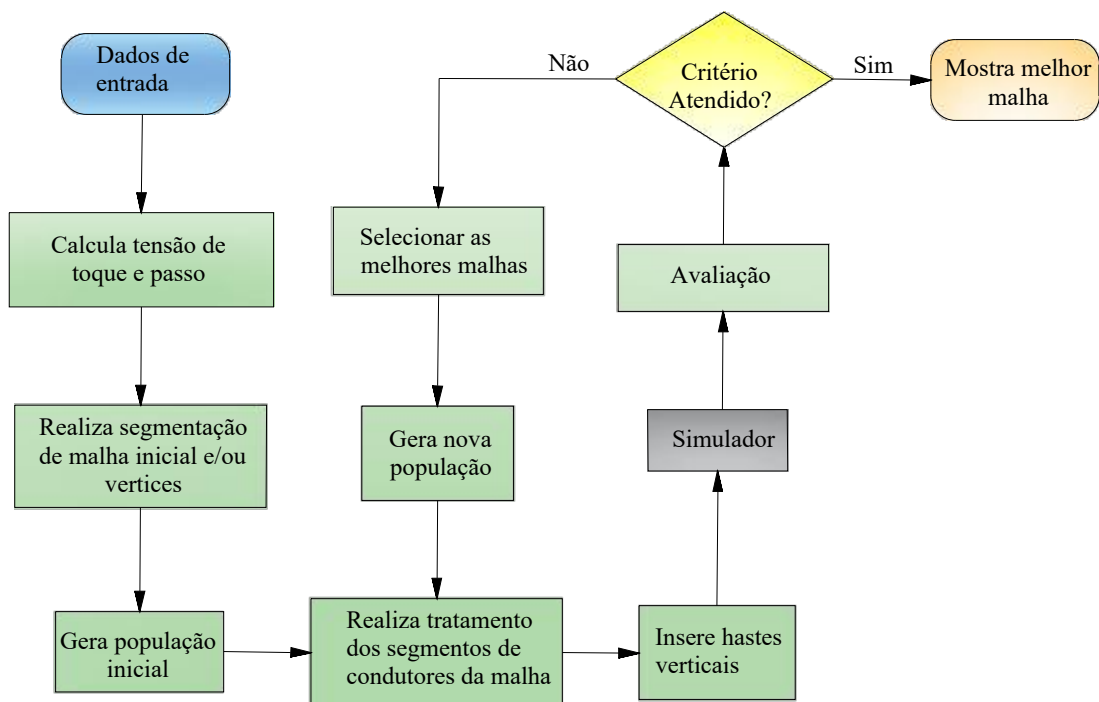


Figura 5.11 - Fluxograma do processo de otimização proposto.

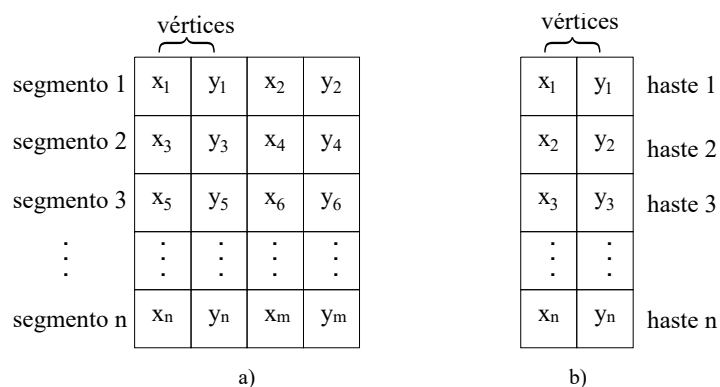


Figura 5.12 - Ilustração da matriz bidimensional com as coordenadas de formação de um indivíduo da população: a) segmentos horizontais e b) hastes verticais.

de novos segmentos, que utilizam como referências as coordenadas já existentes na matriz de coordenadas iniciais. A Figura 5.13 ilustra a formação de dois indivíduos a partir da malha inicial. Observa-se que a formação do **Indivíduo 1** se dá através da retirada de segmentos $(h_1, n_1, e_1, j_1, f_1, i_1)$ da malha inicial. A formação do **Indivíduo 2** ocorre através da inserção dos segmentos (a_2, b_2, c_2, d_2) na malha inicial. No algoritmo proposto considera-se que os cinco primeiros indivíduos formados tornam-se genitores juntamente com a malha inicial, a fim de criar novos indivíduos

diversificados para a população.

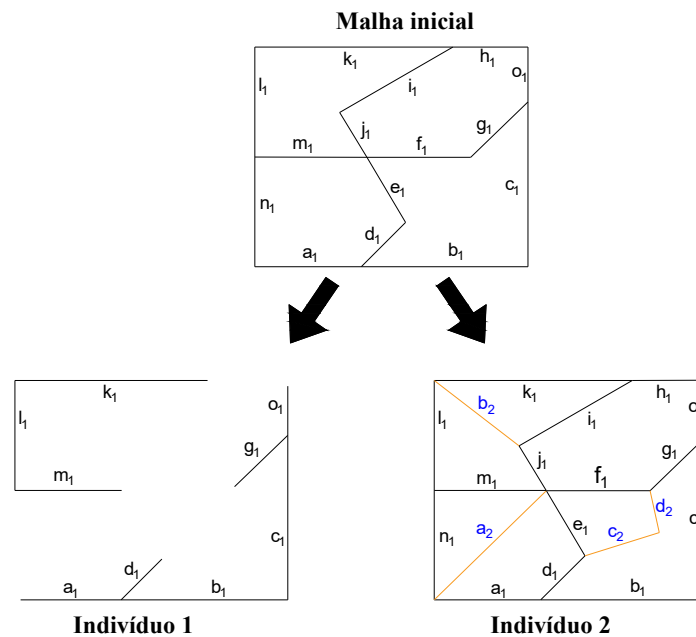


Figura 5.13 - Ilustração da criação de novos indivíduos a partir da matriz inicial.

A criação de cada novo indivíduo na população é realizada a partir de dois genitores, que são escolhidos de forma aleatória entre os cinco primeiros indivíduos e a matriz inicial. O novo indivíduo é formado por segmentos de seus dois genitores, podendo ocasionar a criação de novos segmentos a partir da intersecção de dois ou mais segmentos herdados. A Figura 5.14 ilustra o processo de cruzamento e mutação entre os dois genitores, na qual observa-se que o **Indivíduo A** herda os segmentos a_1, b_1, c_1, h_1 e i_1 do **Genitor 1** e os segmentos, c_2, e_2 e f_2 são herdados do **Genitor 2**, porém a intersecção entre os segmentos i_1 e f_2 ocasiona a criação de quatro novos segmentos: a_3, b_3, c_3 e d_3 . Além disto, os indivíduos criados podem ter segmentos acrescidos sem que haja intersecção entre os segmentos herdados, como ilustrado no **Indivíduo B** da Figura 5.14, que recebe os segmentos: a_4, b_4, c_4, d_4, e_4 e f_4 como forma de mutação.

A Figura 5.15 ilustra a formação da população em determinada geração g_i , sendo a população formada pelo conjunto de matrizes com tamanhos diferentes, pois, o número de linhas para cada matriz depende da quantidade de segmentos que cada indivíduo da população possui. Normalmente, as técnicas de otimização heurísticas como os algoritmos genéticos, possuem a população formada por indivíduos de mesmo tamanho e matriz por geração, porém, o algoritmo proposto utiliza o con-

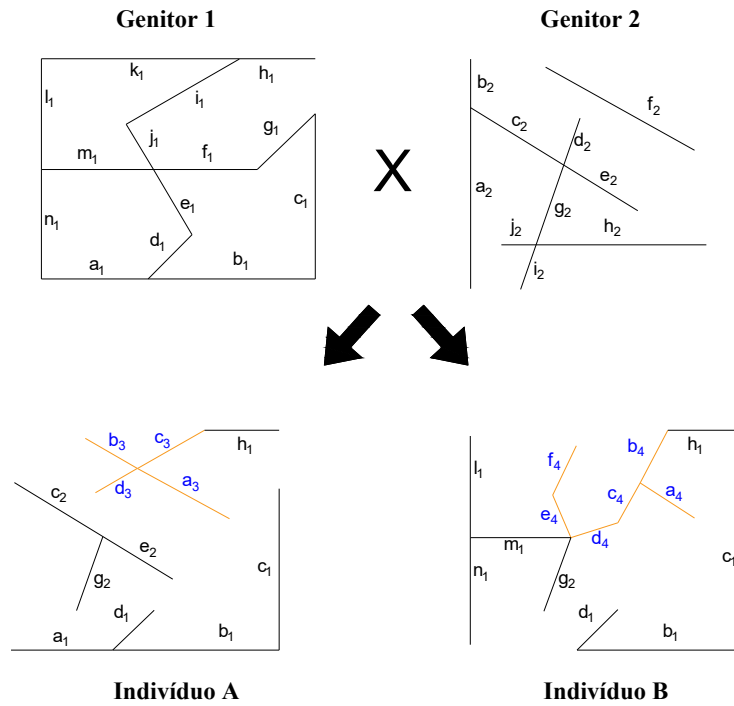


Figura 5.14 - Ilustração da criação da nova população a partir do processo de cruzamento e mutação.

junto de matrizes por geração, produzindo a matriz populacional tridimensional.

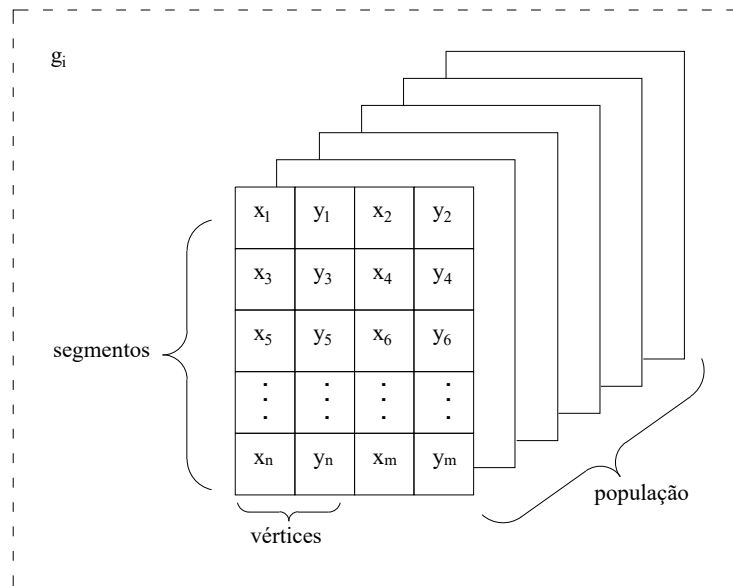


Figura 5.15 - Ilustração da criação da matriz tridimensional que forma a população de determinada geração.

Estando a população formada, faz-se necessário o tratamento dos segmentos da matriz de cada indivíduo, pois, os indivíduos ao serem criados podem possuir vértices fora do perímetro da área de construção da malha de aterramento elétrico. O tratamento consiste em percorrer todos os segmentos, sendo que, ao encontrar vértices fora dos limites da área, realiza-se o corte do respectivo vértice e cria-se um novo vértice no limite do perímetro da área de construção da malha. A Figura 5.16 ilustra situação na qual a malha possui segmento fora do perímetro que limita a área da malha de aterramento elétrico. O segmento u_1 possui trecho indicado na cor vermelha, passando fora dos limites do perímetro da área da malha, durante o processo de tratamento dos segmentos o algoritmo retira parte do segmento u_1 que está fora dos limites, fazendo com que sejam formados os segmentos k_1 e m_1 .

Efetuada o tratamento dos segmentos e construída a matriz com as coordenadas dos vértices, o algoritmo realiza a criação da matriz de hastes verticais. As coordenadas que compõem a matriz de hastes verticais é criada a partir dos vértices da matriz de segmentos horizontais. Inicialmente, o processo de determinação dos vértices que vão possuir hastes verticais é realizado de forma aleatória. Estando as matrizes de segmentos horizontais e hastes verticais tratadas, parte-se para a simulação.

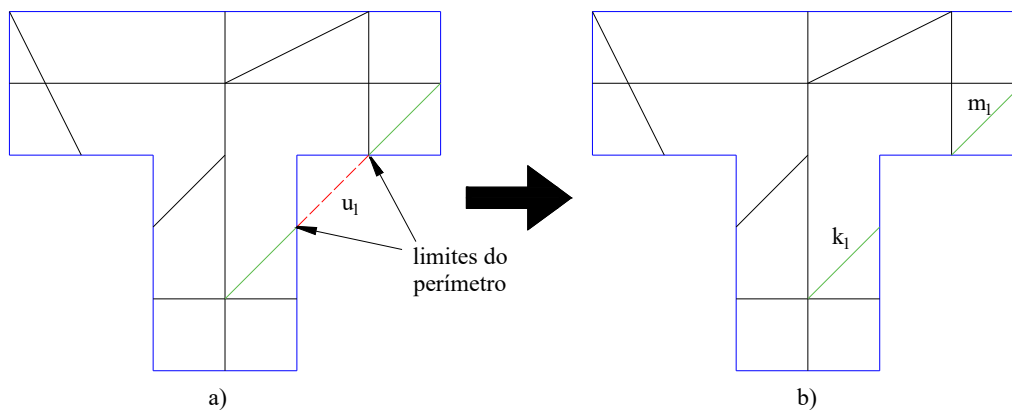


Figura 5.16 - Ilustração da criação da malha: a) com segmento passando fora dos limites de área e b) com segmentos tratados.

Após realizada a simulação, parte-se para a etapa de avaliação dos indivíduos da população criada. O processo de avaliação utiliza função de avaliação específica que avalia o comportamento dos indivíduos quanto a: i) comprimento da malha, ii) tensão de passo, iii) tensão de toque, iv) resistência da malha e v) número de

hastes verticais. A função de avaliação para o algoritmo proposto é dada por:

$$f(x)_{min} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_i & \text{para } V_s \leq \text{GPR} \\ \sum_{i=1}^n P_i \cdot T_i + \gamma & \text{para } V_s > \text{GPR} \end{cases} \quad (5.16)$$

no qual, γ é o custo da penalização do indivíduo e está associado a restrição existente para quando GPR for maior que o potencial de superfície máximo, V_s é o potencial na superfície do solo, GPR é a elevação do potencial da malha, P_i é o vetor de pesos e T_i é o valor normalizado do comprimento da malha, tensão de passo, tensão de toque, resistência da malha e número de hastes verticais, T_i é dado por:

$$T_i = \frac{T}{T_{max}} \quad (5.17)$$

no qual, T é o valor encontrado para o comprimento da malha, tensão de passo, tensão de toque, resistência da malha e número de hastes verticais e T_{max} é o máximo valor permitido para o parâmetro. Em (5.17) ocorre a normalização da função de avaliação, adota-se como comprimento máximo da malha o valor calculado a partir da malha inicial e para número máximo de hastes verticais toma-se como sendo o número total de vértices da malha inicial, o valor máximo para tensão de passo, tensão de toque e valor máximo para resistência de aterramento são estabelecidos por norma (IEEE, 2015).

Após avaliar os indivíduos o algoritmo verifica se os critérios de parada são atendidos, para o caso do algoritmo proposto os critérios de parada são: i) número de geração e ii) valor da função de avaliação. Sendo atendido um dos critérios de parada o algoritmo cessa seu fluxo e apresenta o melhor indivíduo e seus respectivos parâmetros.

5.5 Considerações finais

Apresentou-se neste capítulo a metodologia proposta para a construção do simulador que será aplicado no processo de otimização da geometria de malhas de aterramento elétrico. Apresentou ainda as etapas de construção do algoritmo de otimização heurístico proposto. No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos utilizando a metodologia proposta.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da aplicação da metodologia proposta. São apresentados cinco estudos de caso que tem como objetivo validar o método proposto. No Estudo de Caso 1 e Estudo de Caso 2 é averiguado o comportamento do algoritmo de otimização com relação a influência da resistividade aparente ao solo e profundidade da malha de aterramento elétrico frente ao comprimento da malha. No Estudo de Caso 3, Estudo de Caso 4 e Estudo de Caso 5 são apresentadas geometrias de malhas de aterramento elétrico otimizada e realizada a comparação com malha de aterramento elétrico obtida a partir de método tradicional.

6.1 Teste e validação do simulador

Para validar o simulador proposto, utiliza-se resultados de estudos da literatura comparando-os com os resultados obtidos com pelo simulador proposto, utilizando os mesmos parâmetros de entrada. São realizadas as comparações dos valores de resistência de aterramento elétrico, tensão de toque e tensão de passo na malha de aterramento elétrico para solos homogêneo e heterogêneo. Para comparação dos valores de resistências elétrica encontrados pelo simulador foi realizada comparação com valores contempladas na norma [IEEE \(2015\)](#) obtidos para malha quadrada e geometria em T. Para cada geometria a malha foi dividida em 16 submalhas quadradas com $5m$ de distância entre eletrodos paralelos, como apresentado na Figura 6.1. Para os cálculos, as malhas foram divididas em segmentos de $5m$ com profundidade de $0,5m$, raio do condutor de $0,005m$ e resistividade elétrica aparente do solo $\rho_a = 100\Omega m$.

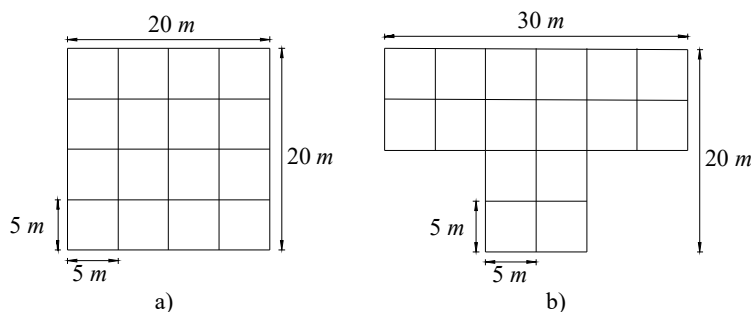


Figura 6.1 - Malhas convencionais utilizadas para validar cálculo de resistência do simulador.

A Tabela 6.1 dispõe os valores encontrados para a resistência de aterramento das malhas apresentadas na Figura 6.1, considerando o solo homogêneo. Os valores são calculados usando as expressões simplificadas citadas na IEEE (2015) e método dos elementos de contorno (MEC), desenvolvido por Ghoneim (2007). A norma IEEE (2015) não estabelece qual dos métodos é o melhor, logo, foi escolhido como referência o simulador proposto. Portanto, o valor percentual disposto na Tabela 6.1 é a diferença em relação ao valor encontrado pelo método proposto e os demais métodos. Observa-se na Tabela 6.1 que os valores obtidos pelo método proposto são próximos dos valores obtidos pelo método do potencial médio descrito por Dwight (1936), para a malha de aterramento elétrico com geometria em T. Para a malha quadrada, o método proposto apresenta resultados próximo dos resultados obtidos pelo método dos elementos de contorno descrito por Ghoneim (2007).

Tabela 6.1 - Resultado comparativo entre o método proposto e os demais métodos.

Método	Malha	
	Quadrada	T
Laurent	3,049 Ω	2,985 Ω
	15,7%	10,3%
Dwight	2,216 Ω	2,216 Ω
	6,4%	1,0%
Schwarz	2,604 Ω	2,542 Ω
	10,0%	13,6%
Sverak	2,624 Ω	2,600 Ω
	10,8%	16,2%
Nahman	3,149 Ω	-
	33,0%	-
Chow	3,262 Ω	-
	37,8%	-
MEC	2,363 Ω	-
	0,2%	-
Simulador proposto	2,367 Ω	2,238 Ω

Para comparar os valores de tensão de passo e tensão de toque obtidos através do simulador proposto com valores obtidos através de método utilizando expressões simplificadas apresentadas pela norma IEEE (2015), foi utilizada três malhas de aterramento elétrico com geometrias distintas: malha retangular de $35m \times 20m$ com 28 submalhas, malha em geometria L de $30m \times 20m$ com 16 submalhas e malha em geometria T de $30m \times 25m$ com 18 submalhas, apresentadas na Figura 6.2. A comparação foi realizada para situação de solo homogêneo e solo heterogêneo, além disto, para cada geometria a malha foi dividida em 16 submalhas quadradas de $5m$ de distância entre os condutores paralelos, profundidade da malha de $0,5m$, raio do condutor de $0,005m$, corrente de malha de $1000A$, ângulo de tensão de passo de 90° ,

Tabela 6.2 - Tensão de passo em solo homogêneo.

Geometria	IEE Std. 80 [V]	Simulador proposto [V]	Diferença [%]
Retangular	814,47	737,18	10,48
Geometria L	1.228,98	930,61	32,06
Geometria T	1.010,44	937,59	7,77

passo de simulação de $1m$.

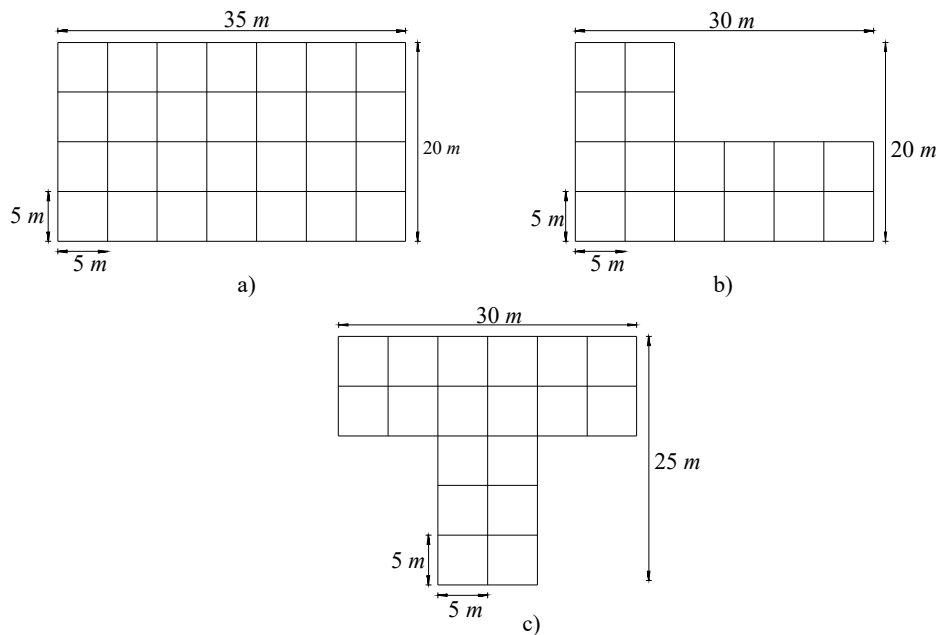


Figura 6.2 - Malhas de aterramento elétrico convencionais: a) quadrada, b) geometria em L e c) geometria em T.

Para o caso do solo homogêneo foi considerado a resistividade do solo de $300\Omega m$ e para a profundidade da primeira camada do solo foi utilizado valor arbitrário, pois as expressões são invariantes em relação a este parâmetro. A Tabela 6.2 e Tabela 6.3 dispõem os valores obtidos para a máxima tensão de passo e a máxima tensão de toque, respectivamente, utilizando o método convencional e o simulador proposto, em solo homogêneo, sendo a diferença percentual calculada como o módulo da diferença entre o valor dado pela norma IEEE (2015) e o método proposto.

Na situação do solo heterogêneo com estratificação em duas camadas horizontais, foram considerados a resistividade elétrica da primeira camada do solo de $200\Omega m$, espessura da primeira camada de $6m$ e resistividade elétrica da segunda camada de $400\Omega m$. Como o método convencional IEEE (2015) leva em consideração o solo

Tabela 6.3 - Tensão de toque em solo homogêneo.

Geometria	IEE Std. 80 [V]	Simulador proposto [V]	Diferença [%]
Retangular	1.207,85	1.219,54	0,96
Geometria L	1.848,63	1554,25	18,94
Geometria T	1.554,54	1.560,96	0,41

como sendo a massa homogênea, foi necessário calcular a equivalência das resistividades aparentes do solo estratificado através do método proposto por [Endrenyi \(1963\)](#), considerando o solo homogêneo. Como o método de [Endrenyi \(1963\)](#) leva em consideração algumas características geométricas da malha, foi possível calcular a resistividade aparente para cada malha, obtendo: i) $266,67\Omega m$ para malha retangular, ii) $261,69\Omega m$ para a malha com geometria em L e iii) $264,76\Omega m$ para a malha com geometria em T.

As Tabela 6.4 e Tabela 6.5 dispõem os valores obtidos para a máxima tensão de passo e a máxima tensão de toque, respectivamente, para solo heterogêneo, utilizando o método convencional e o simulador proposto. Observa-se que as maiores diferenças encontradas foram para tensão de toque e tensão de passo na malha com geometria em L. O método sugerido na norma [IEEE \(2015\)](#) baseia-se em expressões simplificadas obtidas para malhas quadradas, no qual são utilizados fatores de correção para as demais geometrias. Estes fatores de correção produzem erros que variam com a área e o comprimento do eletrodo da malha.

Tabela 6.4 - Tensão de passo em solo heterogêneo.

Geometria	IEE Std. 80 [V]	Simulador proposto [V]	Diferença [%]
Retangular	723,98	556,02	30,21
Geometria L	1.072,90	689,38	55,63
Geometria T	891,75	693,81	28,53

Tabela 6.5 - Tensão de toque em solo heterogêneo.

Geometria	IEE Std. 80 [V]	Simulador proposto [V]	Diferença [%]
Retangular	1.073,66	901,77	19,06
Geometria L	1.613,85	1.131,02	42,69
Geometria T	1.371,94	1.133,86	21,00

6.2 Dados de entrada para o processo de otimização

O algoritmo de otimização utilizado, embora inspirado em algoritmo genético, apresenta diferenças em sua metodologia, principalmente na formação do indivíduo, em algoritmos genéticos os indivíduos possuem cromossomos de tamanho iguais, normalmente por geração é formada matriz com cromossomos de mesma dimensão, porém, o algoritmo de otimização proposto, utiliza-se de indivíduos com cromossomos de tamanhos diferentes, formando geração a partir de matrizes tridimensionais.

O algoritmo de otimização utilizado, possui taxa de cruzamento e mutação fixas, o número de geração é fixo e utilizado como critério de parada do algoritmo. Para o uso do algoritmo de otimização faz-se necessário realizar o processo de estratificação do solo e redução para duas camadas, no caso de haver mais de duas camadas. Além disto, em alguns casos é necessário o uso da teoria de redes de Ladder para determinar impedância equivalente e posterior determinação da corrente aplicada à malha. O algoritmo de otimização encontra o indivíduo mais apto para a situação que atenda os critérios de segurança para malha de aterramento elétrico, que são os valores de tensão de toque, tensão de passo e menor resistência da malha de aterramento elétrico. O algoritmo de otimização proposto utiliza dez indivíduos por geração e possui como critérios de parada o número de gerações ou $f(x)_{min} = 0$, a função de avaliação está em função do comprimento da malha, tensão de toque, tensão de passo, resistência da malha e número de hastes verticais.

Para realizar os cálculos dos estudos de casos faz-se necessário os dados de entrada: i) desenho do perímetro da área no formato *Drawing Exchange Format* (dxf), ii) profundidade da malha de aterramento em $[m]$, iii) seção do eletrodo horizontal em $[mm^2]$, iv) resistividade da primeira camada do solo em $[\Omega m]$, v) resistividade da segunda camada do solo em $[\Omega m]$, vi) profundidade da primeira camada em $[m]$, vii) corrente aplicada na malha em $[A]$, viii) comprimento máximo dos segmentos em $[m]$, ix) passo para o cálculo do potencial e das tensões em $[m]$, x) passo do ângulo para cálculo da tensão de passo em graus, xi) número de gerações, xii) número de indivíduos por geração, xiii) se utilizará hastes verticais e xiv) pesos P_i das variáveis da função de avaliação $f(x)_{min}$.

6.3 Estudo de Caso 1

Com o intuito de demonstrar o comportamento do algoritmo de otimização proposto, este estudo de caso apresenta a influência da resistividade aparente do solo frente ao comprimento da malha de aterramento elétrico. Foi utilizado área de $10m \times 10m$,

corrente de malha de 350A, profundidade da malha de 0,6m, condutor horizontal com seção de 35mm², resistividade da brita de 3000Ωm, população de dez indivíduos por geração e não foram considerados hastes verticais, taxa de cruzamento linear de 50%, taxa de mutação de 0,2% e critério de parada de 30 gerações ou $f(x)_{min} = 0$. A Tabela 6.6 dispõe os valores obtidos do comprimento médio da malha após dez simulações realizadas para diferentes resistividades aparente do solo. A Figura 6.3 apresenta a relação entre o comportamento da resistividade aparente do solo × incremento dos condutores, na tentativa de manter a malha de aterramento elétrico dentro dos padrões solicitados por normas.

Tabela 6.6 - Comprimento da malha × resistividade do solo para o Estudo de Caso 1.

Resistividade $\rho_a [\Omega m]$	Comprimento [m]
100	87
150	90
200	92
250	98
300	103
350	105
400	107
450	108
500	108,5
550	108,8
600	109,2
650	111
700	116
800	125
900	136
1000	148

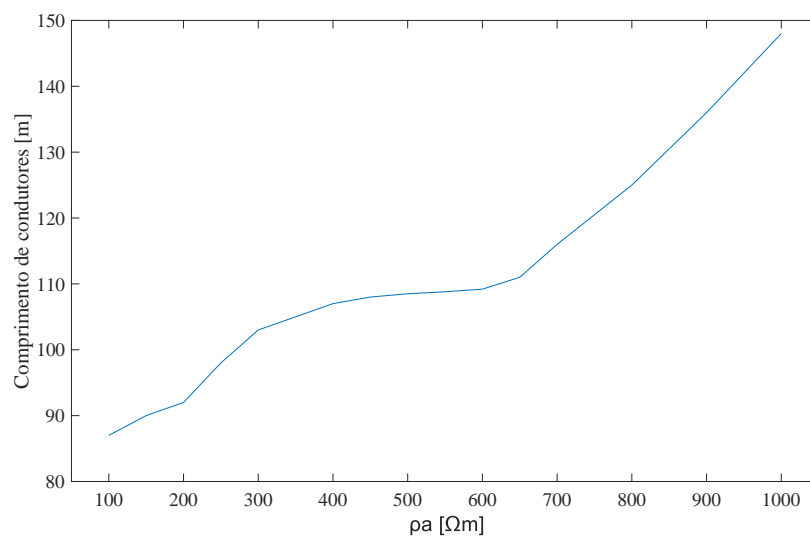


Figura 6.3 - Comprimento da malha × resistividade do solo.

Observa-se que com o aumento da resistividade aparente do solo, o algoritmo reage com o acréscimo de condutores horizontais de forma a manter os valores de resistência de aterramento, tensão de passo e tensão de toque dentro de limites solicitados por normas.

6.4 Estudo de Caso 2

Este estudo de caso apresenta a influência da profundidade da malha de aterramento elétrico frente ao comprimento da malha de aterramento elétrico. Foi utilizada área de $10m \times 10m$, corrente de malha de $350A$, solo heterogêneo com resistividades de $200\Omega m$ e $100\Omega m$ para primeira e segunda camada, espessura da primeira camada do solo de $1,3m$, condutor horizontal com seção de $35mm^2$, resistividade da brita de $3000\Omega m$, população de dez indivíduos por geração, não foram considerados hastes verticais e critério de parada de 30 gerações ou $f(x)_{min} = 0$.

A Tabela 6.7 dispõe os valores obtidos do comprimento médio da malha após dez simulações realizadas para diferentes profundidades da malha de aterramento elétrico. A Figura 6.4 apresenta a relação entre o comportamento das profundidades da malha de aterramento elétrico \times decremento dos condutores, na tentativa de manter a malha de aterramento elétrico dentro dos padrões solicitados por normas. Observa-se que com o aumento da profundidade da malha, o algoritmo reage com o decréscimo de condutores horizontais, pois, o aumento da profundidade da malha segue em direção da segunda camada do solo que possui resistividade menor, proporcionando assim, menor comprimento dos condutores horizontais.

Tabela 6.7 - Comprimento da malha \times profundidade da malha para o Estudo de Caso 2.

Profundidade da malha [m]	Comprimento [m]
0,5	98,5
0,6	97,1
0,7	95,5
0,8	91,2
0,9	88,1
1	84,6
1,2	84,2
1,3	83,8
1,4	84,4
1,5	84,9
1,7	85,3
1,8	85,8
2	86,6
2,1	86,4
2,3	85,8
2,5	84,3

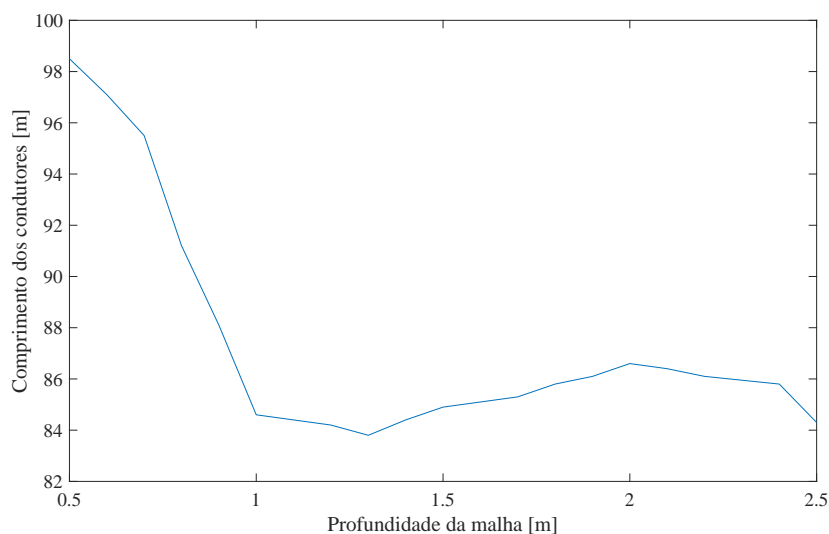


Figura 6.4 - Comprimento da malha \times profundidade da malha no solo.

6.5 Estudo de Caso 3

É considerado para este estudo de caso área com perímetro de $40m \times 50m$, condutor horizontal de $35mm^2$, profundidade da malha de $0,8m$, resistividade da primeira camada do solo de $500\Omega m$, resistividade da segunda camada do solo de $80\Omega m$, espessura da primeira camada do solo de $6m$, corrente de malha de $1000A$, resistividade da brita $3000\Omega m$, espessura da camada de brita de $0,2m$, tempo de atuação da proteção de $0,5s$, ângulo de 5° para cálculo da tensão de passo, taxa de cruzamento linear de 50% , taxa de mutação de $0,2\%$ e critério de parada de 30 gerações ou $f(x)_{min} = 0$. A Tabela 6.8 dispõe os valores obtidos através da IEEE (2015) e método de otimização proposto, os valores de tensão de passo e tensão de toque obtidos estão dentro dos limites solicitados por normas, que são: $2273,829V$ para tensão de passo e $691,494V$ para tensão de toque.

Tabela 6.8 - Valores dos parâmetros da malha de aterramento elétrico do Estudo de Caso 3.

	Resistência de aterramento [Ω]	Tensão de Toque [V]	Tensão de Passo [V]	Comprimento da malha [m]	Hastes Verticais
IEEE (2015)	3,718	665,910	276,170	910	43
Método proposto	2,121	769,453	221,395	888,789	17

A Figura 6.5 apresenta a malha obtida pelo algoritmo de otimização, os círculos na cor vermelha são os locais onde serão inseridas as hastes verticais, a Figura 6.6(a)

apresenta o potencial de superfície dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o potencial de superfície máximo encontrado é de $5694,851V$ e o GPR máximo é de $5631,715V$. A Figura 6.6(b) apresenta o perfil tridimensional da tensão de toque e o contorno dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o máximo valor de tensão de toque ocorre na coordenada $x = 50m, y = 0m$. A Figura 6.6(c) apresenta o perfil tridimensional e contorno da tensão de passo dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o máximo valor de tensão de passo encontra-se nas coordenadas $x_1 = 0m, y_1 = 0m, x_2 = 0,70711m$ e $y_2 = 0,70711m$.

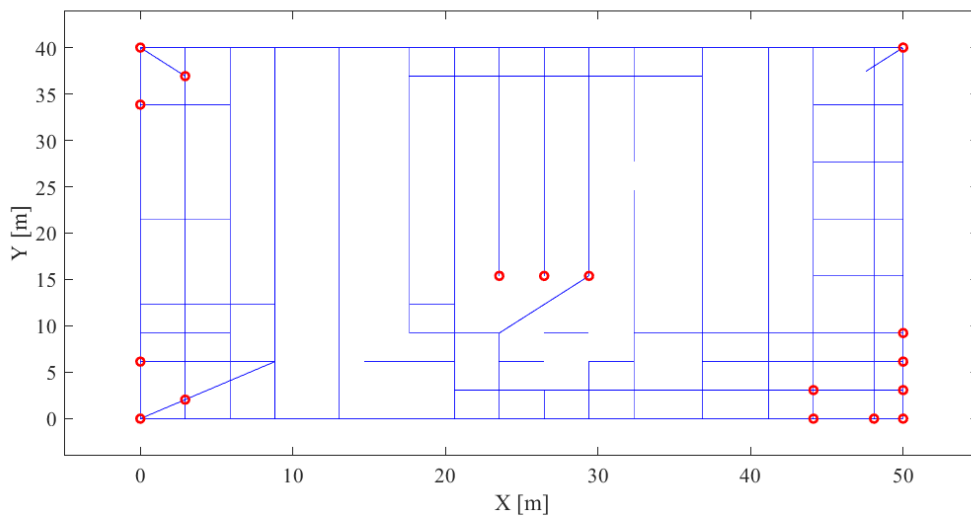
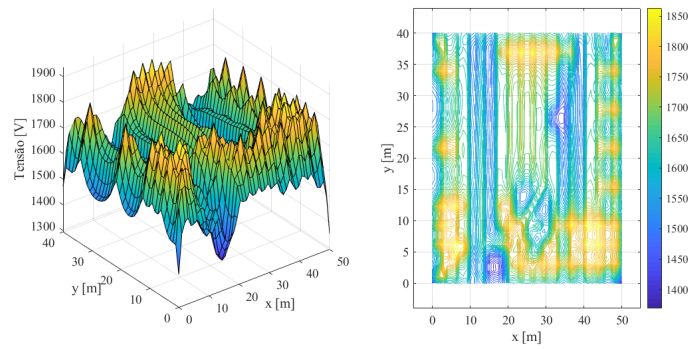


Figura 6.5 - Malha de aterramento com geometria otimizada para o Estudo de Caso 3.

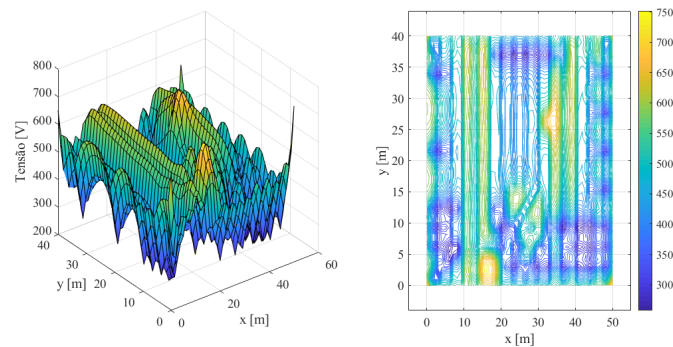
O cálculo dos parâmetros da malha de aterramento através do método proposto pela [IEEE \(2015\)](#) apresentou $f(x)_{min} = 56,71$, o método de otimização proposto apresentou $f(x)_{min} = 56,10$. Observa-se que através do método de otimização proposto, a quantidade de hastes verticais reduz em aproximadamente 60%, se comparado ao método proposto pela [IEEE \(2015\)](#).

6.6 Estudo de Caso 4

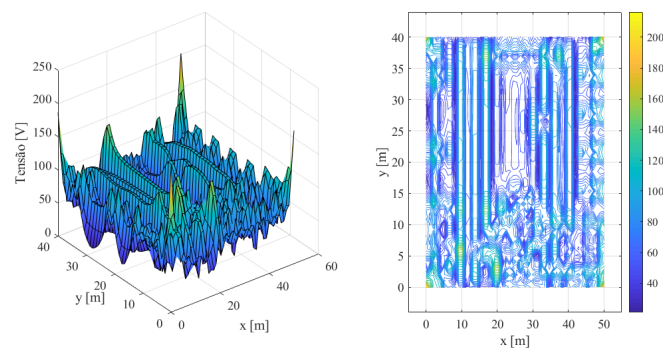
É considerado para este estudo de caso área com perímetro de $50m \times 50m$, condutor horizontal de $50mm^2$, profundidade da malha de $0,8m$, resistividade da primeira camada do solo de $27\Omega m$, resistividade da segunda camada do solo de $80\Omega m$, espessura da primeira camada do solo de $6m$, corrente de malha de $6000A$, resistividade da brita $3000\Omega m$, espessura da camada de brita de $0,1m$, tempo de atuação da proteção de $0,5s$, ângulo de 10° para cálculo da tensão de passo, taxa de cruzamento



(a)



(b)



(c)

Figura 6.6 - Identificação das tensões do Estudo de Caso 3: a) tensão de superfície, b) tensão de toque e c) tensão de passo.

linear de 50%, taxa de mutação de 0,2% e critério de parada de 30 gerações ou $f(x)_{min} = 0$. A Tabela 6.9 dispõe os valores obtidos através da IEEE (2015) e método de otimização proposto, os valores de tensão de passo e tensão de toque obtidos estão dentro dos limites definidos por normas, que são: 2273,829V para tensão de passo e 691,494V para tensão de toque.

Tabela 6.9 - Valores dos parâmetros da malha de aterramento elétrico do Estudo de Caso 4.

	Resistência de aterramento [Ω]	Tensão de Toque [V]	Tensão de Passo [V]	Comprimento da malha [m]	Hastes Verticais
IEEE (2015)	0,538	661,13	427,21	1100	27
Método proposto	0,526	660,21	103,5	325	9

A Figura 6.7 apresenta a malha obtida pelo algoritmo de otimização, os círculos na cor vermelha são os locais onde serão inseridas as hastes verticais, a Figura 6.8(a) apresenta o potencial de superfície dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o potencial de superfície máximo encontrado é de 3032,548V e o GPR máximo de 3157,506V. A Figura 6.8(b) apresenta o perfil tridimensional da tensão de toque e o contorno dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o máximo valor de tensão de toque ocorre nas coordenadas $x = 6,12m$ e $y = 6,12m$. A Figura 6.8(c) apresenta o perfil tridimensional e contorno da tensão de passo dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o máximo valor de tensão de passo encontra-se nas coordenadas $x_1 = 38,77m$, $y_1 = 8,16m$, $x_2 = 37,77m$ e $y_2 = 8,16m$.

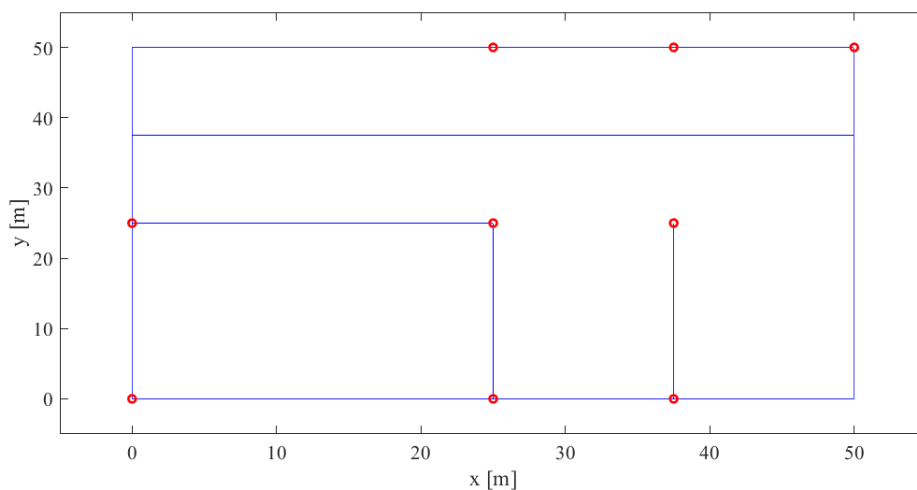
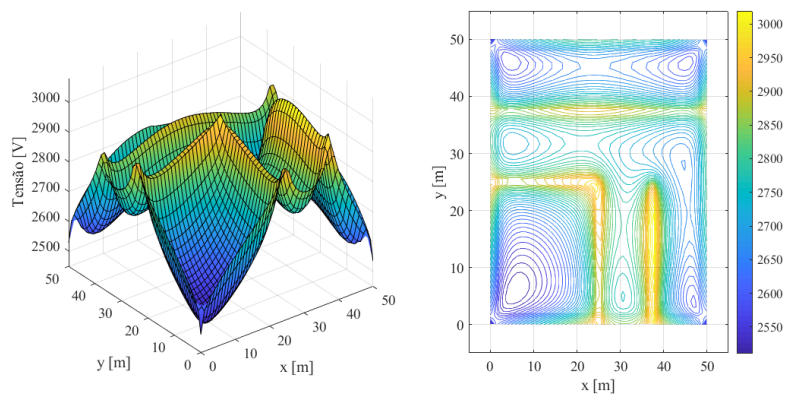


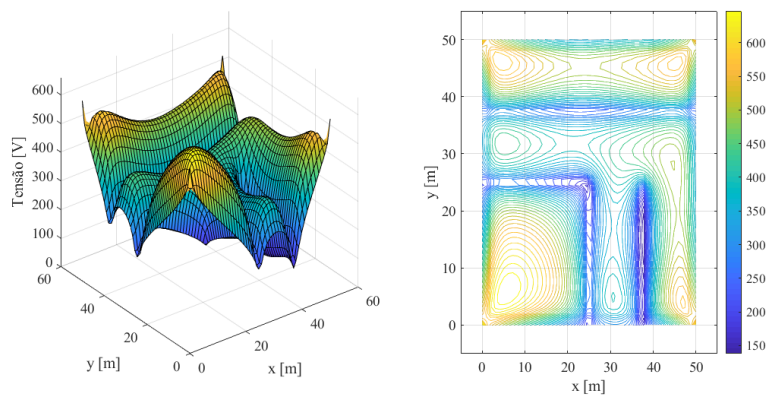
Figura 6.7 - Malha de aterramento com geometria otimizada para o Estudo de Caso 4.

O cálculo dos parâmetros da malha de aterramento através do método proposto pela IEEE (2015) apresentou $f(x)_{min} = 58,72$, o método de otimização proposto apresentou $f(x)_{min} = 25,15$. Observa-se que através do método de otimização proposto, a quantidade de condutores horizontais é 70% menor e quantidade de hastes

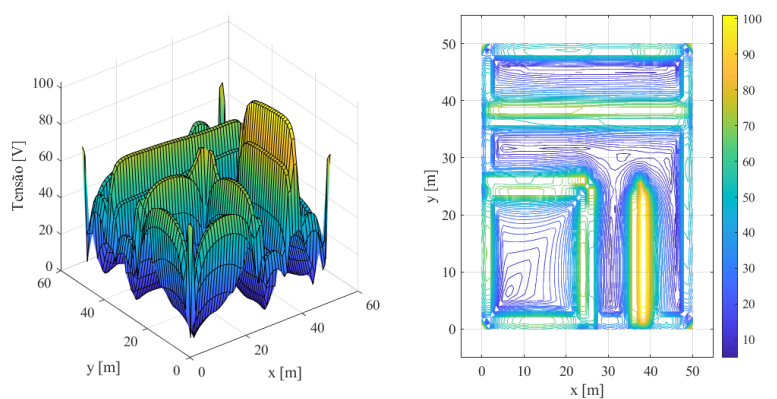
verticais 66% se comparado ao método proposto pela IEEE (2015).



(a)



(b)



(c)

Figura 6.8 - Identificação das tensões do Estudo de Caso 4: a) tensão de superfície, b) tensão de toque e c) tensão de passo.

6.7 Estudo de Caso 5

É considerado para este estudo de caso área com perímetro não convencional apresentada na Figura 6.9, condutor horizontal de $70mm^2$, profundidade da malha de $0,6m$, resistividade da primeira camada do solo de $240\Omega m$, resistividade da segunda camada do solo de $521,9\Omega m$, espessura da primeira camada do solo de $9,7m$, corrente de malha de $2083,14A$, resistividade da brita $3000\Omega m$, espessura da camada de brita de $0,1m$, tempo de atuação da proteção de $0,5s$, ângulo de 10° para cálculo da tensão de passo, taxa de cruzamento linear de 50% , taxa de mutação de $0,2\%$ e critério de parada de 30 gerações ou $f(x)_{min} = 0$. A Tabela 6.10 apresenta os valores obtidos através da IEEE (2015) e método de otimização proposto, os valores de tensão de passo e tensão de toque obtidos estão dentro dos limites definidos por normas, que são de tensão de passo de $2273,829V$ e tensão de toque de $691,494V$.

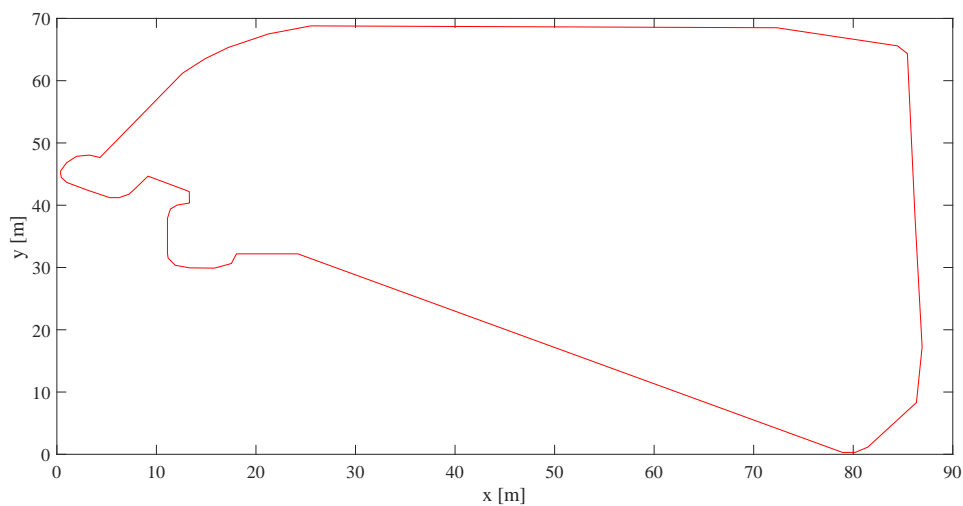


Figura 6.9 - Área para malha de aterramento do Estudo de Caso 5.

Tabela 6.10 - Valores dos parâmetros da malha de aterramento elétrico do Estudo de Caso 5.

	Resistência de aterramento [Ω]	Tensão de Toque [V]	Tensão de Passo [V]	Comprimento da malha [m]	Hastes Verticais
IEEE (2015)	2,38	652,41	219,60	2100	0
Método proposto	2,73	638,54	221,05	1253	8

A Figura 6.10 apresenta a malha obtida pelo algoritmo de otimização, os círculos na cor vermelha são os locais onde serão inseridas as hastes verticais, a Figura 6.11(a) apresenta o potencial de superfície dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o potencial de superfície máximo encontrado é de $5694,851V$ e o GPR máximo de $5631,715V$. A Figura 6.11(b) apresenta o perfil tridimensional da tensão de toque e o contorno dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o máximo valor de tensão de toque ocorre nas coordenadas $x = 1,01m$ e $y = 44,47m$. A Figura 6.11(c) apresenta o perfil tridimensional e contorno da tensão de passo dentro do perímetro da malha de aterramento elétrico, o máximo valor de tensão de passo encontra-se nas coordenadas $x_1 = 76,81m$, $y_1 = 5,05m$, $x_2 = 77,52m$ e $y_2 = 5,76m$. O cálculo dos parâmetros da malha de aterramento através do método proposto pela IEEE (2015) apresentou $f(x)_{min} = 33,19$, o método de otimização proposto apresentou $f(x)_{min} = 32,69$.

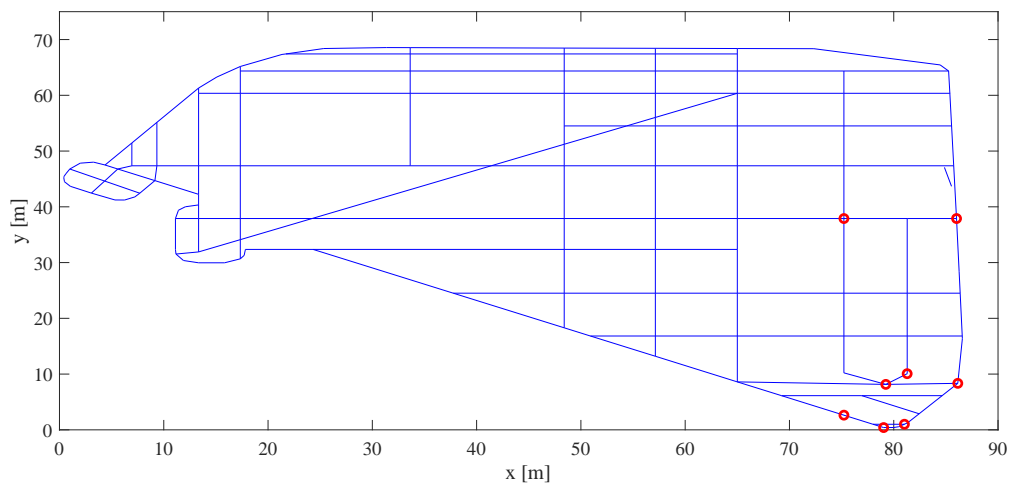
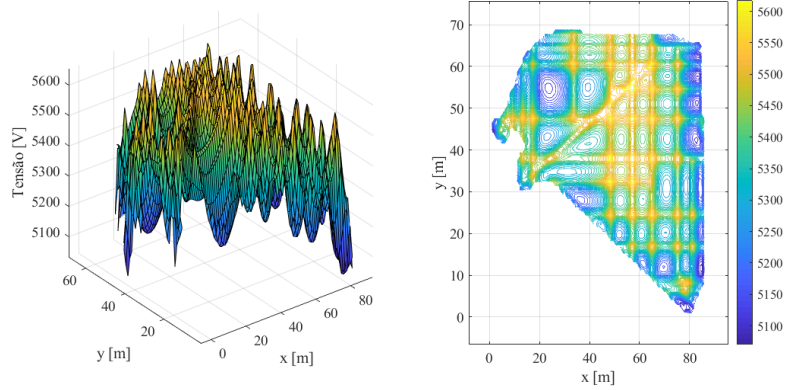
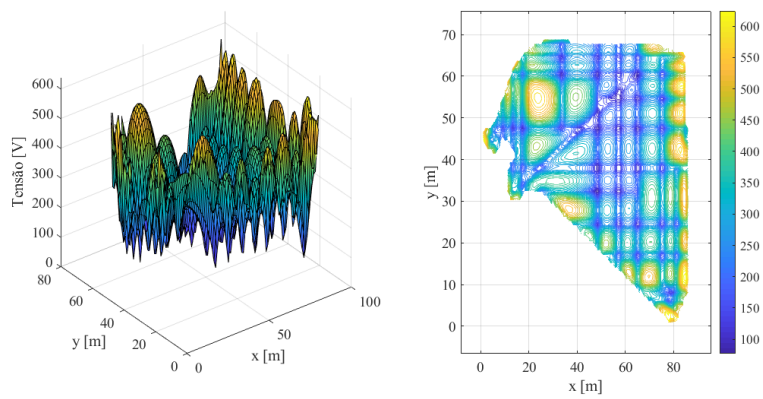


Figura 6.10 - Malha de aterramento com geometria otimizada para o Estudo de Caso 5.

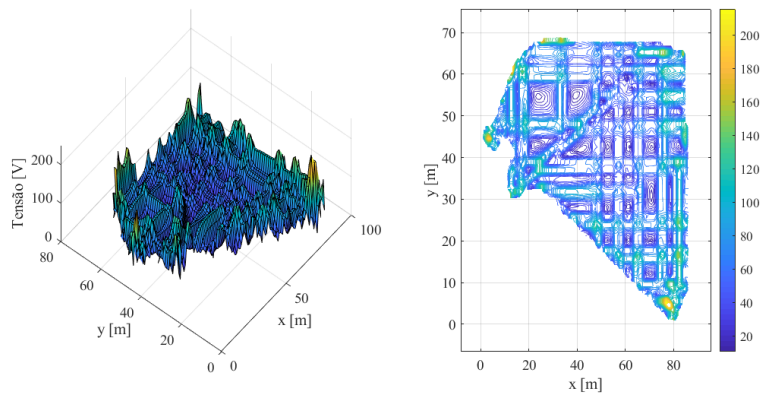
Observa-se que através do método de otimização proposto, a quantidade de condutores horizontais é 40% menor comparado ao método proposto pela IEEE (2015). O tempo de simulação foi de dezesseis horas e quinze minutos, obtida a partir de simulação em computador Intel i5-3230M, CPU de $2,6GHz$ com $6GB$ RAM DDR3 $1600MHz$.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.11 - Identificação das tensões do Estudo de Caso 5: a) tensão de superfície, b) tensão de toque e c) tensão de passo.

6.8 Discussão

A metodologia proposta apresenta possibilidade de otimizar a geometria de malhas de aterramento elétrico e garantir os aspectos de segurança estabelecidos por norma, além disto, possibilita a otimização somente dos condutores horizontais ou dos condutores horizontais e hastes verticais. O trabalho de [Heppe \(1979\)](#) apresenta metodologia de cálculo de potenciais na superfície do solo com base no método das imagens convencionais, na qual é proposto expressões matemáticas que permitem a utilização de eletrodos horizontais em qualquer orientação angular e espaçamentos entre si em solos estratificados em até duas camadas. Porém [Heppe \(1979\)](#) apresenta estudos somente para malhas de aterramento quadradas (com ângulos de 90°) contendo eletrodos igualmente espaçados.

O método de determinação dos potenciais utilizados neste trabalho preenche a lacuna existente nos demais trabalhos da área de estudo de malhas de aterramento. Tendo como base o trabalho de [Heppe \(1979\)](#), encontra-se os potenciais de superfície para área não convencionais e em qualquer ângulo, como apresentado no Estudo de Caso 5, que apresenta área não convencional conforme Figura 6.9. Neste estudo de caso é possível obter redução de aproximadamente 40% da quantidade de condutores horizontais na malha de aterramento e conseqüentemente redução da mão de obra aplicada na construção da malha de aterramento, se comparado a métodos tradicionais de projeto de malhas de aterramento.

O Estudo de Caso 3 apresenta a otimização da geometria da malha de aterramento para área retangular de $40m \times 50m$, a malha otimizada é apresentada na Figura 6.5, está geometria proporciona redução de 3% dos condutores horizontais, porém, apresenta redução de 60% das hastes verticais se comparado com métodos tradicionais de projetos de malhas de aterramento, o que ocasionalmente contribui para redução de mão de obra de execução da malha de aterramento. É importante ressaltar que a geometria apresentada na Figura 6.5, apresenta desvantagem com relação ao método tradicional por proporcionar não uniformidade do potencial de superfície, por nem sempre manter o distanciamento igualmente espaçados entre os condutores.

A geometria dos condutores apresentada na Figura 6.7, Estudo de Caso 4, proporciona redução de 70% do condutores horizontais e 66% das hastes verticais, se comparado ao método tradicional apresentado em [IEEE \(2015\)](#), apesar de assim como no Estudo de Caso 3 possuir desvantagem de não uniformidade da distribuição do potencial de superfície no solo, os valores de tensão de toque e tensão de passo encontram-se dentro dos limites determinados por norma ([IEEE, 2015](#)), além

disto o valor da tensão de passo e tensão de toque para geometria otimizada tende ser maior que para geometria tradicional em decorrência do uso de menos condutores horizontais na malha de aterramento. Vale lembrar que menor quantidade de condutores produz menor efeito indutivo na malha de aterramento.

A Tabela 6.6, Estudo de Caso 1, dispõe resultados sobre o comportamento do algoritmo de otimização, relacionando a resistividade aparente e o comprimento da malha. Para valores de resistividade do solo até $1000\Omega m$ o algoritmo apresentou ser estável, obtendo diversidade de geometria otimizada, porém, o comprimento de condutores horizontais para cada resistividade aparente foram próximos em todas as simulações. Para a situação apresentada no Estudo de Caso 1 com valores de resistividade aparente do solo maiores que $1000\Omega m$ o algoritmo apresenta instabilidade na convergência, indicando ser sensível para os valores de pesos P_i utilizados na função de avaliação para o parâmetro de comprimento de malha e tensão de toque, sendo necessário alterar os valores dos pesos da função de avaliação para convergência do algoritmo. A Figura 6.3 apresenta o comportamento do algoritmos com relação ao aumento da resistividade aparente do solo, observa-se que o comprimento da malha tende a aumentar com o aumento da resistividade aparente, tal fato, se deve ao aumento do potencial de superfície do solo em decorrência do aumento da resistividade aparente do solo.

A Tabela 6.7, Estudo de Caso 2, dispõe os valores obtidos pelo algoritmo de otimização para comprimento da malha em função da profundidade da malha de aterramento em solo estratificado em duas camadas, sendo a primeira camada do solo mais resistiva que a segunda camada. Durante as simulações o algoritmo apresentou estabilidade, convergindo e apresentando diversidade de resultados sempre com valores próximos. Não foi observado valores de profundidade para malha de aterramento maiores que $2,5m$ por entender que na prática dificilmente irá ser implantada malha de aterramento com profundidades maiores que a observada e apresentada na Tabela 6.7. A Figura 6.4 apresenta o comportamento da quantidade de condutores horizontais da malha em função da profundidade da malha de aterramento, observa-se que a quantidade de condutor horizontal reduz com o aumento da profundidade da malha, devido a malha se aproximar da camada que apresenta menor resistividade, a quantidade de condutor estabiliza a partir de profundidade de $1,0m$, portanto, profundidades da malha maiores que $1,0m$ pode representar desperdício de mão de obra na execução da malha de aterramento apresentada no Estudo de Caso 2.

O algoritmo de otimização apresentou estabilidade para formação de indivíduos a partir da concepção de limitar os pontos de buscas ao perímetro da área em que a malha de aterramento será construída com taxa de cruzamento de 50% e taxa de mutação de 0,2%, inicialmente experimentou-se a criação de indivíduos a partir do uso de fractais, porém, o algoritmo de otimização apresentou dificuldade de divergência, aumentando demasiadamente o tempo de processamento, além de apresentar baixa diversidade de geometria otimizada. A partir da metodologia utilizada no algoritmo de otimização é possível empregar o uso de reconhecimento de padrão para atuar na atualização automática dos valores de pesos utilizados na função de avaliação, pois, a depender da área de construção da malha e valores de resistividade do solo, observa-se sensibilidade dos pesos P_i da função de avaliação para o processo de convergência. Faz-se necessário a análise da geometria otimizada para situações de alta frequência, por exemplo, em descarga atmosférica, apesar do efeito indutivo reduzir com a diminuição do comprimento dos condutores horizontais não se sabe a respeito do efeito capacitivo existente.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

O conceito de otimização de geometria de malhas a partir do uso de matrizes com tamanhos diferentes para formação de populações foi proposto neste trabalho. A metodologia proposta neste trabalho possibilita a otimização da geometria de malhas de aterramento elétrico em frequência industrial de $50Hz$ e $60Hz$, com condutores horizontais dispostos em qualquer angulação e distância entre si em qualquer profundidade com solo estratificado em até duas camadas, bem como otimização da posição de hastes verticais na malha de aterramento. Foram desenvolvidas três etapas principais durante a realização deste trabalho, que consistiram: i) levantamento e estudo dos métodos presentes na literatura, ii) modelagem e equacionamento do método proposto e iii) implementação computacional. A hipótese formulada para a problemática foi conferida e corroborada e os objetivos propostos foram atingidos.

Na primeira etapa foram realizados o levantamento e o estudo de trabalhos que apresentam métodos de cálculo de parâmetros de malhas de aterramento, enfatizando os que utilizam o método das imagens e do potencial médio. Observou-se que mesmo os trabalhos que apresentavam metodologias para cálculos de malhas com quaisquer geometrias obtiveram equacionamentos ou estudos de casos apenas para malhas retangulares contendo eletrodos perpendiculares e paralelos. Posições, as quais, acarretam em simplificações consideráveis das expressões. Os trabalhos que tratavam sobre otimização, apresentava resultados para geometrias retangulares, otimizando principalmente nos espaçamentos horizontais e verticais dos eletrodos, bem como na localização das hastes verticais.

Na segunda etapa realizou a modelagem matemática para o método proposto com a dedução das expressões necessárias para o cálculo dos valores desejados. As expressões apresentadas em [Heppe \(1979\)](#) foram revisadas e o sistema matricial foi adequado para que o GPR se tornasse variável do sistema. Posteriormente foi adicionada a modelagem na presença de hastes verticais. A terceira etapa foi composta pela implementação do algoritmo de otimização e estratégia para criar novas malhas dentro de limite do perímetro. Além disto, foi realizada implementação computacional, em que foram utilizados soluções da geometria analítica para o cálculo das distâncias relativas entre os segmentos das malhas de aterramento criadas.

Portanto, conclui-se que o método proposto apresenta as vantagens: i) possibilita o cálculo dos parâmetros de malhas de aterramento com eletrodos em posições e

deslocamentos arbitrários, ii) permite obter o valor da corrente de dispersão para o solo em cada segmento, possibilitando distribuição não uniforme de corrente de dispersão ao longo do eletrodo, iii) trabalha diretamente com as resistividades do solo com estratificação em duas camadas horizontais sem a necessidade do cálculo da resistividade aparente equivalente, iv) o potencial, a tensão de passo e a tensão de toque podem ser calculadas em qualquer ponto da superfície do solo, v) permite análise detalhada do desempenho da malha em diferentes regiões, vi) permite o cálculo dos parâmetros da malha de aterramento elétrico na presença de hastes verticais e vii) proporciona malha de aterramento elétrico com geometria otimizada, visando a economia de condutores e número de hastes verticais, possibilitando redução do efeito indutivo.

As desvantagens do método proposto são: i) complexidade da modelagem e da implementação, ii) tempo gasto nos cálculos, os quais se elevam consideravelmente com o aumento do número de segmentos e da precisão utilizada e iii) realiza o cálculo dos parâmetros considerando a frequência industrial.

7.1 Contribuições do Trabalho

As contribuições podem assim ser descritas:

- Revisão matemática das expressões do potencial induzido pela corrente de dispersão em segmento e das resistências mútuas e próprias entre os segmentos pelo método das imagens e do potencial médio.
- Obtenção das expressões para segmentos em qualquer posição e profundidade do solo.
- Resolução do sistema matricial dando como entrada a corrente aplicada na malha de aterramento elétrico.
- Criação de metodologia que possibilite a otimização da geometria da malha e posição de hastes verticais.
- Obtenção das produções bibliográficas:
 - a) Wesley P. Calixto, Carlos L. B. Silva, Viviane M. Gomes, Marcio R. C. Reis, Antonio M. Silva Filho, Antonio P. Coimbra and Gabriel A. Wainer, "Application of the Horizontal Soil Stratification and Lateral Profiling Methods for 3D Mapping of the Soil Electrical Resistivity", MDPI Energies, p.p.1-24, v.15, 2022.

- b) SILVA, CARLOS L. B.; PIRES, T. G.; CALIXTO, W. P.; OLIVEIRA, D. N.; SILVA FILHO, A. M.; SOUZA, L. A. P.; "Calculation of Grounding Grids Parameter at Arbitrary Geometry". Transactions on Environment and Electrical Engineering, v.2, p. 11-16, 2017.
- c) T.G. Pires, C.L.B. Silva, D.N. Oliveira, J.W.L. Nerys, A.J.Alves and W.P. Calixto, "Computation of grounding grids parameter on unconventional geometry", Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), 2015 CHILEAN Conference on, Santiago, Chile, 2015.
- d) T.G. Pires, C.L.B. Silva, W.P. Calixto, D.N. Oliveira, J.W.L. Nerys, A.J.Alves, E.G. Domingues, J.L.Domingos and G.P.Furriel, "Simulation and determination of grounding grid parameters in non-symmetrical shapes", 2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), Fortaleza, Brasil, 2015.
- e) T.G. Pires, C.L.B.Silva, D.N. Oliveira, A.M. Silva Filho, J.W.L. Nerys, A.J. Alves and W.P. Calixto, "Computation of Resistance and Potential of Grounding Grids in Any Geometry"EEEIC 2016 - IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Florence,ca, Italia, 2016.
- f) C.L.B. Silva, T.G. Pires, D.N. Oliveira, A.M. Silva Filho, J.W.L. Nerys, A.J. Alves and W.P. Calixto, "Optimization of Grounding Grids Multi Design Geometry"EEEIC 2016 - IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, Florença, Italia, 2016.
- g) T.G. Pires, C.L.B. Silva, A.M. Silva Filho, J.W.L. Nerys, A.J. Alves, V.M. Gomes, T.M. Pereira and W.P. Calixto, "Ground Resistance and Potential on the Soil Surface of Grids with Arbitrary Geometries". International Conference on Grounding and Earthing 7th International Conference on Lightning Physics and Effects, Porto de Galinhas, Brasil, 2016.
- h) SOUZA, LUIS A. P.; SILVA, CARLOS L. B.; CALIXTO, WESLEY P.; "Optimized setting of directional overcurrent relays via genetic algorithm". In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018, Niteroi. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018.

- i) P. SOUZA, LUIS A.; B. SILVA, CARLOS L.; CALIXTO, WESLEY P. . Optimized Coordination of Directional Overcurrent Relays Using Genetic Algorithm. In: 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe), Palermo, 2018.
- j) OLIVEIRA, D. N. ; SILVA, C. L. B. ; CALIXTO, W. P. ; ALVES, A. J. ; GOMES, V. ; DOMINGOS, J. L.; "Heuristic Methodology for Horizontal Multilayer Soil Stratification". In: 16 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016, Florença. 16th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016.
- k) SILVA FILHO, ANTONIO; BORGES DA SILVA, CARLOS; OLIVEIRA, MARCO; PIRES, THYAGO; ALVES, AYLTON; CALIXTO, WESLEY P.; NARCISO, MARCELO. "Correlation method of physical characteristics with electrical properties of the soil". In: 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016, Florence. 2016.
- l) OLIVEIRA, D. N.; CALIXTO, W. P. ; ALVES, A. J. ; SILVA, C. L. B.; MOTA, I.; "MULTILAYER SOIL PARAMETERS ESTIMATION OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHMS". In: International Conference on Grounding and Earthing , International Conference on Lightning Physics and Effects, Manaus, 2014.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados deste trabalho, verificaram-se lacunas a serem respondidas em trabalhos futuros, quais sejam:

- a) Determinação dos parâmetros do método das imagens complexas que permita o cálculo para solos estratificados em mais de duas camadas horizontais;
- b) Realizar a otimização da geometria da malha de aterramento elétrico considerando os efeitos de alta frequência (descargas atmosféricas);
- c) Implementar computacionalmente o cálculo para malhas otimizadas em profundidades diferentes ao longo da área.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. **Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. 1. ed. Rua Conselheiro Nebias, 1131, Campus Elisios, São Paulo, Brasil, 2012. 33, 36, 37
- BRASIL. **Lei número 11.337**. 1. ed. Diário Oficial: Presidência da República, 2006. 27
- CALIXTO, W.; ALVARENGA, B.; MOTA, J.; BRITO, L.; WU, M. Electromagnetic problems solving by conformal mapping - a mathematical operator for optimization. **Mathematical Problems in Engineering**, 2010. 66, 67, 69
- CALIXTO, W. P. **Métodos Matemáticos e Computacional Aplicados a Prospecção Geométrica com Estratificação Tridimensional**. Tese (Doutorado), Uberlândia, Brasil, 2012. 36, 37, 38, 66, 67
- CALIXTO, W. P.; COIMBRA, A. P.; MOTA, J. C.; WU, M.; SILVA, W. G.; ALVARENGA, B.; BRITO, L. C.; ALVES, A. J.; DOMINGUES, E. G.; PINHEIRO NETO, D. Troubleshooting in geoelectrical prospecting using real-coded genetic algorithm with chromosomal extrapolation. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**, 2015. 66
- CAMPBELL, G. **Mutual Inductances of Circuits Composed of Straight Wires**. 1. ed. [S.l.]: Physical Review, 1915. V. 5, n. 6, p. 452-458. 59
- CHOW, Y.; SALAMA, M. M. A. A simplified method for calculating the substation grounding grid resistance. **Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 2, p. 736-742, 1994. IEEE. 29
- CHURCHMAN, C. W. **Introdução a teoria dos sistemas**. 1. ed. [S.l.]: Editora Vozes, 1971. ISBN:978-85-326-5131-0. 65
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos**. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2015. ISBN:978-85-352-7932-0. 65
- CORDEIRO Junior, Z. J. M. **Um algoritmo de nuvem de partículas para combinação de classificadores em aprendizado multi-visão**. Dissertação (Mestrado) — Ciências da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 3 2011. Dissertação. 70, 71
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, 1 2003. 34
- COVITTI, A.; DELVECCHIO, G.; FUSCO, A.; LERARIO, F.; NERI, F. Two cascade genetic algorithms to optimize unequally spaced grounding grids with rods. **The International Conference on Computer as a Tool**, v. 2, n. 1, p. 1533-1536, 1 2005. EUROCON, DOI: 10.1109/EURCON.2005.1630257. 27

- DALZIEL, C. F. Efect of electric shock on man. **Electrical Engineering**, 1941. 45
- DAWALIBI, F.; BARBEITO, N. Measurements and computations of the performance of grounding systems buried in multilayer soils. **Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 4, p. 1483–1490, 1991. IEEE. 29
- DWIGHT, H. B. Calculation of resistances to ground. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 55, n. 12, p. 1319–1328, 1936. 27, 92
- ELSHERBINY, M. M.; CHOW, Y. L.; SALAMA, M. M. A. A fast and accurate analysis of grounding resistance of a driven rod in a two-layer soil. **Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 808–814, 1996. IEEE. 29
- ENDRENYI, J. Evaluation of resistivity tests for design of station grounds in nonuniform soil. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, 1963. V.82, n.69,p.966-970. 94
- FLETCHER, R. **Practical Methods of Optimization**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 2000. ISBN:978-11-187-2320-3. 66
- GARRETT, D. L.; PRUITT, J. G. Problems encountered with the average potential method of analyzing substation grounding systems. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 12, p. 3585–3596, 1985. IEEE. 28
- GHONEIM, S. S. M. **Optimization of Grounding Grids Design with Evolutionary Strategies**. Tese (Doutorado), Duisburg, Germany, 2007. 92
- GOMES, F.; GOMES, V. M.; ASSIS, A. O.; REIS, M. C.; CRUZ, G.; CALIXTO, W. P. Heuristic regression method for descriptive data analysis. In: **16th International Conference on Environment and Electrical Engineering**. Florença, Itália: [s.n.], 2016. 69
- GOMES, V. M. **Complexidade Natural de Sistemas com Base em Análise de Sensibilidade**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2020. 72
- GOMES, V. M.; ASSIS, A. O.; MATIAS, C.; SARAIVA, J.; GOMES, F.; WAINER, G.; LIMA, B.; MAGALHAES, A.; CALIXTO, W. P.; FLORES, P. H. R.; OES, J. B. Analytical method for calculating the sensitivity index of system parameters. In: **Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies**. Pucon, Chile: [s.n.], 2017. 71
- GOUDA, O.; AMER, G.; SALIM, O.; ELSAYED, E. Techniques used for unequally spaced grounding grid design. **Journal of Multidisciplinary Research and Reviews**, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2018. 30
- HABJANIC, A.; TRLEP, M. Optimal design of the grounding grid by fem considering different layered soil models. **Przeglad Elektrotechniczny**, v. 8, n. 7, p. 112–114, 2007. 29

HALLIDAY, D.; RESNIK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 4. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 1996. 51

HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, 1994. 71

HEPPE, A. Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 6, p. 1978–1989, 1979. IEEE. 28, 29, 31, 59, 106, 109

HOLLAND, J. **Adaptation in Natural and Artificial Systems**. 1. ed. University of Michigan Press: Reissue, 1992. 68

HOWE, G. W. Capacity of radio-telegraph antenna. **The Electrician**, v. 73, n. 1, p. 829–859, 1914. 27

IEEE. **Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System**. 1. ed. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2012. (Revision of IEEE Std 81-1983),2012. 33, 34, 36, 46

IEEE. **IEEE Standard for Qualifying Permanent Connections Used in Substation Grounding**. 1. ed. IEEE, 2014. (Revision of IEEE Std 837-2002). 2014. 43

IEEE. **Guide for Safety in AC Substation Grounding**. 1. ed. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA, 2015. (Revision of IEEE Std 80-2000/ Incorporates IEEE Std 80-2013/Cor 1-2015). 27, 30, 31, 39, 40, 41, 43, 45, 75, 90, 91, 92, 93, 94, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106

KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. **Swarm Intelligence**. 1. ed. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2001. ISBN:978-15-586-0595-9. 69

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 5. ed. [S.l.]: UFSC, 2002. Modificada e Ampliada. 38, 41, 42, 44

KOUTEYNIKOFF, P. Numerical computations of the grounding resistance of substations and towers. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 3, n. 3, p. 957–965, 7 1980. IEEE. 28

LEE K.; EL-SHARKAWI, M. **Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems**. 1. ed. [S.l.]: Wiley InterScience - IEEE Press Series on Power Engineering, 2008. ISBN:978-04-714-5711-4. 66, 70

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 1. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Brasport, 2006. 67, 69

MAIER, M. W.; RECHTIN, E. **The Art of Systems Architecting**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2009. ISBN:978-14-200-7913-5. 65

NBR 15751. **Sistemas de aterramento de subestações Requisitos**. Brasil, 2013. 42

PEREIRA FILHO, M. L. **Aplicação do método de imagens complexas ao cálculo de malhas de aterramento em solos com estratificação horizontal**. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1999. 27

PINHEIRO NETO, D. **Processo de Otimização Aplicada a Análise de Risco de Investimento em Geração de Energia Elétrica com Fontes Renováveis**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2017. 67

PIRES, T. G. **Cálculo de Parâmetros de Malhas de Aterramento em Geometrias não Convencionais**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2016. 29, 33, 35, 39, 53, 55

PRITSKER, A. **Introduction to Simulation and SLAM-II**. 3. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 1986. ISBN:978-04-702-3457-0. 65

REIS, M. R. C. **Análise Comparativa de Métodos de Otimização Aplicados à Sintonia do Controlador PI**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2014. 65

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicação**. 1. ed. Barueri, São Paulo, Brasil: Manole, 2005. ISBN:978-85-204-1683-7. 67

RHOADES, P. A. C. R. J. D.; PRATHER, R. J. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 1, p. 651–6556, 1 1976. 34

ROEPER, R. **Correntes de curto circuito em redes trifásicas**. 5. ed. São Paulo, Brasil: Siemens AG, 1975. 38, 39

SHANNON, R. E. **Systems Simulation: The Art and Science**. 1. ed. [S.l.]: Prentice-Hall, 1975. ISBN:978-01-388-1839-5. 65

SHERIF, G. S. M.; IBRAHIM, T. B. M. Control the cost, touch and step voltages of the grounding grids design. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 10, n. 8, p. 943–951, 10 2016. 30

SILVA Filho, A. M. **Metodologia para Correlacionar a Umidade, Compactação e Condutividade elétrica aparente do solo**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, outubro 2015. 34

SOUZA, L. A. P. **Comparação entre Métodos de Otimização Aplicados aos Ajustes de Relés Direcionais de Sobrecorrente**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, 2019. 66

SUMATHI, S.; HAMSAPRIYA, T.; SUREKHA, P. **Evolutionary Intelligence: An Introduction to Theory and Applications with MATLAB**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2008. ISBN:978-35-407-5158-8. 69

SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. 1. ed. New York, USA: New York: Dover Publications, 1968. v. 1. 28, 38

SVERAK, J. G. Optimized grounding grid design using variable spacing technique. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, n. 1, p. 362–374, 1976. IEEE. 27

TAKAHASHI, T.; KAWASE, T. Calculation of earth resistance for a deep-driven rod in a multi-layer earth structure. **Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 2, p. 608–614, 1991. IEEE. 28

TELLÓ, M.; DIAS, G.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H.; MUSTAFA, T.; COELHO, V. **Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequências: com apresentação de casos**. 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. ISBN 978-85-7430-623-0. 33, 36, 39, 43

THAPAR, B.; GEREZ, V.; BALAKRISHNAN, A.; BLANK, D. Simplified equations for mesh and step voltages in an ac substation. **Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 2, p. 601–607, 1991. IEEE. 27

UMA, U. U.; UZOECHI, L. O.; ROBERT, B. J. Optimization design of ground grid mesh of 132/33 kv sustation using etap. **Nigerian Journal of Technology**, v. 35, n. 4, p. 926–934, 2016. 30

VISACRO Filho, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Artliber Editora, 2002. 35, 46

WANG, J.; L, X.; LU, L.; FANG, F. Parameter sensitivity analysis of crop growth models based on the extended fourier amplitude sensitivity test method. **Environmental Modelling & Software**, 2013. 71

WENNER, F. **A method of measuring earth resistivity**. 1. ed. [S.l.]: Bulletin of the Bureau of Standards, 1916. V. 12, n. 4, p. 469-478. 35, 37

