

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Projeto Otimizado de Redes de Terra em
Subestações**

Francisco Samuel Bessa da Silva

VERSÃO FINAL

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores
Major Energia

Orientador: Prof. Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Julho 2012

Resumo

A presente dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um algoritmo que permite otimizar o dimensionamento de malhas de terra. O processo de otimização consiste em minimizar a quantidade de material utilizado nas redes de terra de uma subestação nomeadamente a nível dos condutores e elétrodos de terra, dando sempre prioridade à segurança dos equipamentos e pessoas na área de influência do sistema de terra.

O algoritmo de otimização realiza o dimensionado das malhas de terra tendo em conta os critérios de segurança propostos pelo Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrónicos (IEEE), mais precisamente a norma *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

Os critérios de segurança propostos por este guia baseiam-se na corrente tolerável pelo corpo de uma pessoa quando está exposta a um circuito accidental, garantindo-se que não ocorra fibrilação ventricular durante o choque elétrico. O dimensionamento é realizado limitando as tensões de toque e passo para potenciais toleráveis pelo corpo humano.

O algoritmo desenvolvido é validado recorrendo a exemplos da norma *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*. Em seguida é utilizado para realizar um estudo que determina a influência que as variáveis utilizadas no dimensionamento têm na quantidade de condutor necessário para garantir os critérios de segurança. A dissertação termina com aplicação do algoritmo de otimização em projetos reais de subestações AT/MT.

Palavras-Chave: Sistema de Terra, Malha de Terra, Tensão de Toque, Tensão de Passo, Tensão da Malha, Segurança, Tensão Tolerável, GPR, Corrente de Defeito, Otimização.

Abstract

The present dissertation has as its main goal the development of an algorithm that allows the optimization of ground mesh design. The optimization process aims to minimize the amount of material used in the design of the ground net of an electrical substation regarding of electrical conductors as well as ground electrodes, giving always priority to safety of equipment and people in the influence are of the grounding system.

The optimization algorithm performs the sizing of ground mesh having into account the safety criteria proposed by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), precisely in the norm: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.

The safety criteria proposed by this guide are based on the tolerable current of a person's body when exposed to an accidental circuit, ensuring that ventricular fibrillation doesn't occur during electric shock. The sizing is carried out limiting the touch and step voltages to tolerable values of the human body.

The developed algorithm is validated based on examples present in the norm IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Therefore, the optimization algorithm is used to carry out a study which determines the influence that the factors used in the design have in the necessary amount of conductor to ensure the safety criteria. The dissertation ends up with the application of the optimization algorithm in real HV/MV substation projects.

Keywords: Grounding System, Grounding Grids, Touch Voltage, Step Voltage, Grid Voltage, Security, Tolerable Voltage, GPR, Fault Current, Optimization

Agradecimentos

A elaboração desta dissertação não teria sido possível sem a colaboração de várias pessoas e entidades, ao longo destes meses, a quem quero expressar o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar quero agradecer ao meu orientador e supervisor, Doutor António Carlos Sepúlveda Machado e Moura, por todo o apoio, disponibilidade, conselhos e motivação que transmitiu durante este período. A sua colaboração foi fundamental para desenvolvimento desta dissertação.

Agradecer, às instituições da EDP Distribuição e REN por terem colaborado durante este período no esclarecimento de dúvidas e fornecimento de dados.

Ao Engenheiro Jorge Santos da EDP Distribuição, pela sua disponibilidade, colaboração no esclarecimento de dúvidas e pelo apoio prestado no fornecimento de dados de projetos de redes de terra em subestações AT/MT.

Ao Engenheiro Mário Soares da REN, pela visita realizada à subestação de Ermesinde e pela sua pronta disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

Ao Sr. Constante da REN, responsável pela subestação de Ermesinde, pelos conselhos e informações partilhadas.

Aos colegas e amigos, que me acompanharam ao longo de todo percurso académico, agradeço o apoio, motivação e as competências técnicas transmitidas.

Finalmente quero agradecer, à família que me apoio incondicionalmente neste percurso académico, em especial aos meus pais e irmãs a quem dedico este trabalho.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vii
Agradecimentos	ix
Índice.....	xi
Lista de figuras	xv
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
Capítulo 2	5
Sistemas de Terra.....	5
2.1 Importância dos Sistemas de Terra	5
2.2 Tipos de Defeitos	7
2.2.1 Corrente de Defeito Homopolar	8
2.2.2 Divisão da Corrente de Defeito	9
2.2.3 Efeito Assimétrico da Corrente de Defeito	11
2.2.4 Corrente de Defeito Máxima na Malha de Terra	12
Capítulo 3	13
Critérios de Dimensionamento	13
3.1 Circuitos Acidentais	13
3.1.1 Tensão de Toque	14

3.1.1.1	Tensão Metal - Metal	15
3.1.1.2	Tensão de Transferência.....	15
3.1.2	Tensão de Passo	15
3.2	Efeito da Corrente no Corpo Humano	17
3.2.1	Resistência e Percurso da Corrente Elétrica no Corpo Humano	17
3.2.2	Frequência	18
3.2.3	Intensidade e Tempo de Duração da Corrente Elétrica	18
3.2.4	Importância da Eliminação dos Defeitos.....	19
3.3	Corrente Tolerável pelo Corpo Humano	19
3.4	Tensão de Toque e Passo Tolerável	21
3.4.1	Tensão de Toque Metal - Metal Tolerável	23
3.4.2	Tensão de Transferência Tolerável	24
3.5	Influência de uma Camada de Material Protetor.....	24
Capítulo 4		27
Características do Solo		27
4.1	Modelo do Solo	27
4.2	Fatores que Influenciam a Resistividade do Solo	28
4.3	Modelo Equivalente do Solo Uniforme	31
4.4	Utilização de Material Protetor à Superfície do Solo	32
Capítulo 5		33
Algoritmo de Otimização		33
5.1.	Principais Imposições Regulamentares.....	33
5.2.	Cálculo da Seção dos Condutores	34
5.3.	Resistência da Rede de Terra.....	36
5.4.	Estrutura do Algoritmo de Otimização.....	37
5.5.	Considerações e Limitações do Algoritmo.....	47
Capítulo 6		49
Validação do Algoritmo de Otimização		49
6.1	Caso 1.....	50
6.2	Caso 2.....	52
6.3	Caso 3.....	54
6.4	Conclusão	56
Capítulo 7		57
Aplicação do Algoritmo		57
7.1	Estudo de Sensibilidade.....	57
7.1.1	Corrente de Defeito	58

7.1.2	Resistividade do Solo	59
7.1.3	Profundidade da Malha	60
7.1.4	Resistividade da Camada Protetora.....	61
7.1.5	Espessura da Camada Protetora	62
7.1.6	Tempo de Duração do Defeito	62
7.1.7	Malha Com e Sem Elétrodo Verticais	63
7.1.8	Tipo de Condutor.....	65
7.1.9	Conclusão.....	66
7.2	Aplicação do Algoritmo em Projetos da EDP Distribuição	67
7.2.1	Projeto 1.....	68
7.2.2	Projeto 2.....	70
7.2.3	Projeto 3.....	73
7.2.4	Conclusão.....	75
Capítulo 8		77
Conclusão e Trabalhos Futuros		77
8.1	Trabalhos Futuros.....	79
Referências		81
Anexos		83
A.1.	Método de Wenner.....	83
A.2.	Fator de Decaimento	85
A.3.	Simplificação da Formula da Corrente Homopolar.....	87
A.4.	Demonstração do Cálculo do Fator de Divisão de Corrente.....	88
A.5.	Efeito dos Elétrodo Verticais nas Malhas de Terra.....	90
A.6.	Descrição da Utilização do PORT.....	93
A.7.	Influência da Profundidade e Espaçamento dos Condutores na Tensão da Malha e de Passo	98

Lista de figuras

Figura 2.1 - Defeito dentro da Subestação, neutro local ligado à terra [3].	8
Figura 2.2 - Defeito dentro da Subestação, neutro ligado à terra numa localização remota [3].	8
Figura 2.3 - Defeito dentro da Subestação, neutro ligado à terra na subestação e noutros locais [3].	8
Figura 2.4 - Típica divisão de corrente para um defeito no lado da alta tensão da subestação, retirado [3].	10
Figura 2.5 - Circuito equivalente do sistema de terra.....	10
Figura 2.6 - Evolução temporal da corrente de curto-circuito assimétrica.....	12
Figura 3.1 - Tensão de toque.	14
Figura 3.2 - Tensão de passo.....	16
Figura 3.3 - Situações típicas de choque elétrico, retirado [3]......	16
Figura 3.4 - Corrente de fibrilação em função do peso corporal, retirado [1]......	20
Figura 3.5 - Esquema e circuito equivalente da tensão de passo.	22
Figura 3.6 - Esquema e circuito equivalente da tensão de toque.	22
Figura 3.7 - Representação da colocação de uma camada de material protetor à superfície.	25
Figura 4.1 - Efeito da temperatura, humidade e sais solúveis na resistividade do solo, retirado [1].	29
Figura 5.1 - Fluxograma do algoritmo de otimização.....	46
Figura 6.1 - Malha obtida em a) por [1] e em b) pelo PORT, para caso 1.....	52
Figura 6.2 - Malha obtida em a) por [1] e em b) pelo PORT, para caso 2.....	54
Figura 6.3 - Malha obtida em a) por [1] e em b) pelo PORT, para caso 3.....	56
Figura 7.1 - Gráfico que representa a relação entre a corrente de defeito e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.	59

Figura 7.2 - Gráfico que representa a relação entre a resistividade do solo e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.	60
Figura 7.3 - Gráfico que representa a relação entre a profundidade a que é instalada a malha e a quantidade de condutor utilizado.....	60
Figura 7.4 - Gráfico que representa a relação entre a resistividade da camada protetora e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.	61
Figura 7.5 - Gráfico que representa a relação entre a espessura da camada protetora e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.	62
Figura 7.6 - Gráfico que representa a relação entre o tempo de duração do defeito e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.	63
Figura 7.7 - Malha de terra com elétrodos em a) e sem elétrodos em b)	64
Figura 7.8 - Malha de terra implementada pela EDP Distribuição no projeto1.	69
Figura 7.9 - Malha de terra otimizada pelo PORT para projeto1.	70
Figura 7.10 - Malha implementada pela EDP Distribuição no projeto 2.....	71
Figura 7.11 - Malha de terra otimizada pelo PORT para projeto 2.	72
Figura 7.12 - Malha de terra implementada pela EDP Distribuição no projeto 3.....	73
Figura 7.13 - Malha de terra otimizada pelo PORT para projeto 3.	75
Figura A.1 - Método de Wenner, retirado [1].	83
Figura A.2 - Esquema equivalente da ligação de dois cabos de guarda à malha de terra, retirado [2].....	89
Figura A.3 - Malhas utilizadas no estudo desenvolvido por Sverak, retirado [15].	91
Figura A.4 - Perfil da distribuição de potencial à superfície, retirado [15].	92
Figura A.5 - Interface gráfica do PORT.....	93
Figura A.6 - Pop-up Menu para selecionar a) tipo de material condutor, em b) a seção mínima dos condutores.	94
Figura A.7 - Botão que executa o processo de dimensionamento e otimização.	95
Figura A.8 - Exemplo da mensagem de erro apresentada pelo PORT.....	95
Figura A.9 - Mensagem informativa fornecida pelo PORT quando os dados inseridos levam a um dimensionamento inválido.....	96
Figura A.10 - Exemplo da Interface gráfica, após realização do dimensionamento.	97
Figura A.11 - Mensagem para confirmar o desejo de saída da interface gráfica.	97
Figura A.12 - Variação da tensão da malha com a profundidade e com o espaçamento.....	99
Figura A.13 - Variação da tensão de passo com a profundidade e com o espaçamento.	100

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Resistividade para vários tipos de solos, retirado [4].	30
Tabela 4.2 – Resistividade do material protetor colocado à superfície.	32
Tabela 5.1 – Constantes que caracterizam o material usado, retirado [1].	35
Tabela 5.2 – Seção mínima dos condutores utilizados na rede de terra pelas empresas.	36
Tabela 6.1 – Valores retirados de [1] e do PORT que representam o caso 1.	50
Tabela 6.2 – Valores retirados de [1] e do PORT que representam o caso 2.	53
Tabela 6.3 – Valores retirados de [1] e do PORT que representam o caso 3	55
Tabela 7.1 – Resultados obtidos pelo PORT para malha de terra com e sem elétrodos.....	64
Tabela 7.2 – Variação do material condutor utilizado na malha de terra	65
Tabela 7.3 – Quantidade adicional de condutor no caso do aumento do fator de x para y. ..	66
Tabela 7.4 – Resultados obtidos pelo PORT e pela EDP Distribuição no projeto 1	69
Tabela 7.5 – Resultados obtidos pelo PORT na aplicação do projeto 2.	72
Tabela 7.6 – Resultados obtidos pelo PORT na aplicação do projeto 3.	74
Tabela A.1 – Valores que caracterizam os estudos efetuados em cada malha, retirado [15].	91
Tabela A.2 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 10m.	100
Tabela A.3 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 7m.	101
Tabela A.4 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 5m.	101
Tabela A.5 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 3,5m.	101
Tabela A.6 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 2m.	102

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AC	Corrente Alternada
AT	Alta Tensão
CDEGS	<i>Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis</i>
CENELEC	<i>European Committee for Electrotechnical Standardization</i>
EDP	Energias de Portugal
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
GIS	Subestação Isolada a Gás
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MT	Média Tensão
PORT	Programa de Otimização de Redes de Terra
REN	Redes Energéticas Nacionais

Lista de símbolos

A	Área ocupada pela malha de terra [m^2]
b	Raio do disco metálico [m]
C_s	Fator de correção para cálculo da resistência de contato entre pés e uma camada superficial de material protetor colocado à superfície
d	Diâmetro do condutor [m]
D	Espaçamento entre os condutores da malha de terra [m]
D_f	Fator de decaimento
D_m	Distância máxima entre quaisquer dois pontos da malha de terra [m]
D_x	Espaçamento dos condutores segundo eixo " x " [m]
D_y	Espaçamento dos condutores segundo eixo " y " [m]
E	Tensão entre fase e neutro [V]
E_m	Tensão máxima da malha [V]

E_S	Tensão máxima de passo [V]
$E_{Tolerável_passo}$	Tensão de passo tolerável [V]
$E_{Tolerável_toque}$	Tensão de toque tolerável [V]
$E_{Tolerável_passo_70kg}$	Tensão de passo Tolerável para uma pessoa com peso corporal de 70kg [V]
$E_{Tolerável_toque_70kg}$	Tensão de toque Tolerável para uma pessoa com peso corporal de 70kg [V]
f	Frequência do sistema elétrico [Hz]
GPR	<i>Ground Potencial Rise</i> [V]
h	Profundidade a que é colocada a malha de terra [m]
h_s	Espessura da camada protetora colocada à superfície [m]
I_B	Intensidade de corrente suportada pelo corpo humano [A]
I_{B50kg}	Corrente máxima tolerável por uma pessoa com peso corporal de 50kg [A]
I_{B70kg}	Corrente máxima tolerável por uma pessoa com peso corporal de 70kg [A]
I_C	Corrente que circula pelo corpo humano [A]
I_f	Valor eficaz da corrente simétrica de defeito à terra [A]
I_F	Valor eficaz da corrente de defeito do sistema de terra afetada do fator de decaimento [A]
I_g	Valor eficaz da corrente simétrica na malha de terra [A]
I_G	Corrente máxima na malha de terra [A]
I_0	Valor eficaz da componente homopolar da corrente de defeito à terra [A]
K	Fator de reflexão
k_f	Constante que caracteriza o tipo de material condutor utilizado
K_h	Fator de correção que ajusta os efeitos da profundidade da malha
K_i	Fator de correção para traduzir a irregularidade da corrente
K_{ii}	Fator de correção que ajusta os efeitos dos condutores interiores nos cantos da malha
K_m	Fator geométrico da malha para o cálculo da tensão máxima da malha
K_S	Fator geométrico da malha para o cálculo da tensão de passo
L_C	Comprimento total dos condutores da malha de terra [m]
L_M	Comprimento efetivo dos condutores enterrados para cálculo da tensão da malha [m]
L_p	Perímetro da malha de terra [m]
L_T	Comprimento total dos condutores enterrados [m]
L_r	Comprimento de cada elétrodo de terra [m]
L_R	Comprimento total dos elétrodos utilizados na malha de terra [m]
L_S	Comprimento efetivo dos condutores enterrados para cálculo da tensão de passo [m]
L_x	Comprimento máximo da malha de terra na direção do eixo do "x" [m]
L_y	Comprimento máximo da malha de terra na direção do eixo do "y" [m]

n	Fator geométrico que traduz o número de condutores em paralelo
R_A	Resistência do circuito accidental [Ω]
R_{A_passo}	Resistência do circuito accidental de passo [Ω]
R_{A_toque}	Resistência do circuito accidental de toque [Ω]
R_B	Resistência do corpo humano [Ω]
R_f	Resistência entre o pé e o solo [Ω]
R_g	Resistência da malha de terra [Ω]
S	Seção do condutor [mm^2]
S_B	Energia tolerada pelo corpo a um choque elétrico para 99,5% de uma população
S_{B50kg}	Energia tolerada pelo corpo a um choque elétrico para 99,5% de uma população com peso corporal de 50kg
S_{B70kg}	Energia tolerada pelo corpo a um choque elétrico para 99,5% de uma população com peso corporal de 70kg
S_f	Fator de divisão de corrente
T_a	Constante de tempo contínua de offset [s]
T_m	Temperatura de fusão [$^{\circ}C$]
t_f	Tempo de duração do defeito [s]
t_s	Tempo a que o corpo é exposto a uma corrente [s]
U_{malha}	Potencial do sistema de terra [V]
U_{passo}	Tensão de passo [V]
$U_{pé}$	Potencial nos pés [V]
$U_{pé1}$	Potencial no pé 1 [V]
$U_{pé2}$	Potencial no pé 2 [V]
U_{toque}	Tensão de toque [V]
X_0	Reactância da componente homopolar [$\Omega/fase$]
X_1	Reactância da componente direta [$\Omega/fase$]
X_2	Reactância da componente inversa [$\Omega/fase$]
X/R	Razão entre a reactância e a resistência da rede para montante
Z_{eq}	Impedância equivalente dos caminhos alternativos da corrente elétrica em relação à malha de terra [Ω]
ρ	Resistividade do solo [$\Omega.m$]
ρ_s	Resistividade da camada protetora colocada à superfície do solo [$\Omega.m$]

Capítulo 1

Introdução

Nos últimos tempos verificou-se um aumento das cargas elétricas ao longo dos anos, o que leva à necessidade de construção de novas subestações e aumento da capacidade das já existentes. Nos tempos atuais em que o mundo se debate com uma crise económica, a necessidade de efetuar de maneira eficiente os investimentos em infraestruturas elétricas torna-se cada vez mais importante. Nesta dissertação pretende-se abordar a otimização de redes de terra com objetivo de obter um dimensionamento seguro com menor custo possível.

Numa subestação é fundamental que em caso de defeito esteja garantida a proteção das pessoas e equipamentos, assim como a qualidade e continuidade de serviço. A existência de redes de terra pretende facilitar o controlo da distribuição do potencial elétrico à superfície do solo e a eliminação dos defeitos através da combinação com dispositivos de proteção.

As malhas de terra instaladas nas subestações têm como objetivo realizar o escoamento das correntes de defeito e estabelecer uma terra única para que todas as estruturas metálicas se encontrem ao mesmo potencial. A sua forma é semelhante à de um “tapete” que engloba toda a área da subestação, usualmente a uma profundidade de 0,5 a 1,5 metros, constituída por condutores horizontais cruzados e frequentemente por elétrodos verticais. O dimensionamento é considerado seguro se a corrente de defeito levar a obter potenciais à superfície do solo que conduzam a tensões de passo e toque inferiores aos valores toleráveis pelo corpo humano.

As redes de terra são normalmente constituídas por cobre, devido às vantagens que este apresenta em relação a outros materiais. No entanto, o elevado valor deste metal em mercado leva a sua utilização a ser cada vez mais ponderada. Nesta dissertação é realizado um estudo sobre a influência dos vários tipos de materiais, na quantidade de condutor necessário para o dimensionamento das malhas de terra de modo a satisfazer os critérios de segurança.

2 Introdução

Neste trabalho pretende-se otimizar a utilização dos condutores e elétrodos aplicados na malha de terra, garantindo sempre os critérios de segurança impostos pelo *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*.

A realização desta dissertação passa pelas seguintes fases:

- Estudo da norma de referência *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*;
- Desenvolvimento de um algoritmo de otimização de redes de terra para subestações AT/MT;
- Validação do algoritmo de otimização;
- Determinação e análise dos principais fatores que influenciam o dimensionamento das malhas de terra;
- Aplicação do algoritmo a projetos reais da EDP Distribuição.

Esta dissertação tem como principais objetivos o desenvolvimento de um algoritmo de otimização de malhas de terra e transmitir informações essenciais sobre principais fatores que o condicionam o dimensionamento. O algoritmo pretende levar em conta a quantidade de material utilizado no dimensionamento da malha de terra, nomeadamente o nível dos condutores e elétrodos de terra. Este método de dimensionamento baseia-se nas tensões toque e passo toleráveis pelas pessoas quando sujeitas a uma diferença de potencial na área de influência da malha de terra.

No capítulo 2 é abordada a importância das redes de terra nas subestações e as circunstâncias que podem levar à ocorrência de um choque elétrico, seguido de uma breve descrição do sistema de terra. É realizada também uma abordagem aos tipos de defeitos que podem ocorrer e possíveis causas e localizações. O capítulo termina com a descrição da propagação da corrente de defeito pelo sistema de terra e da realização do cálculo da corrente máxima que flui para malha de terra.

No capítulo 3 é efetuada a descrição de como ocorre a exposição de uma determinada pessoa a uma diferença de potencial e as fórmulas matemáticas que expressam essa ocorrência. É também salientado os efeitos que a corrente elétrica, provoca no corpo humano em relação à sua frequência, intensidade, duração e percurso pelo corpo. Por fim, são explicadas e deduzidas as equações que traduzem matematicamente a tensão tolerável pelo corpo das pessoas expostas a um choque elétrico e as vantagens que uma camada de material protetor à superfície pode acrescentar.

No capítulo 4 é realizada uma caracterização do solo que permite adquirir conhecimento sobre as principais características que podem ser encontradas nos locais onde são instaladas as redes de terra. Ao longo do capítulo são abordados os principais modelos de solo que são utilizados no dimensionamento das redes de terra e os fatores que influenciam a sua resistividade. É também realizada uma descrição de como é obtida uma aproximação a um

solo uniforme e os principais materiais utilizados para camada protetora colocada à superfície.

O capítulo 5 tem o objetivo descrever como foi desenvolvido o algoritmo de otimização indicando as principais considerações e métodos matemáticos utilizados. Neste capítulo são também referidas, as principais imposições regulamentares utilizadas em Portugal para o dimensionamento das redes de terra.

O desenvolvimento de um algoritmo requer a sua validação, por forma a verificar a coerência dos seus resultados. No capítulo 6 é realizada a validação do algoritmo de otimização recorrendo a exemplos de [1].

No capítulo 7 desta dissertação é utilizado o algoritmo de otimização para realizar um estudo sobre os principais fatores que influenciam o dimensionamento das redes de terra, mostrando o impacto que estes podem causar na quantidade de condutor a utilizar na malha de terra. Em seguida é aplicado o algoritmo a projetos reais da EDP Distribuição, seguindo-se uma análise dos resultados obtidos.

No último capítulo são referidas as principais conclusões que se obtiveram com a realização desta dissertação e uma referência a possíveis trabalhos futuros.

Em anexo são apresentados algumas deduções utilizadas pelos métodos de cálculo implementados no algoritmo de otimização e um estudo sobre a influência da profundidade e espaçamento dos condutores na tensão da malha e de passo.

4 Introdução

Capítulo 2

Sistemas de Terra

Ao longo deste capítulo é feita uma abordagem sobre a importância dos sistemas de terra, como são constituídos, qual o seu objetivo e as dificuldades que existem para realizar o seu dimensionamento.

Em seguida são abordados os tipos de defeitos que podem ocorrer, as possíveis causas e consequências. E por fim é analisada a distribuição da corrente de defeito pelo sistema de terra e o método de cálculo utilizado.

2.1 Importância dos Sistemas de Terra

O dimensionamento de um sistema de terra deve ser efetuado para que garanta a proteção dos equipamentos elétricos e sobretudo a proteção das pessoas que possam estar sujeitas a correntes de defeito, que surgem no corpo devido a uma diferença de potencial a quando do toque em estruturas metálicas ou até pelo simples passo numa zona de influência do sistema de terra.

As circunstâncias que tornam possíveis a ocorrência de acidentes por choque elétrico, segundo [1], são as seguintes:

- Corrente de defeito relativamente elevada, em relação à área do sistema de terra e à sua resistência em relação à terra remota;
- Resistividade do solo e distribuição das correntes de terra, de tal forma que possam provocar na superfície do solo, locais com elevado potencial;
- Presença de um indivíduo num determinado ponto, tempo e posição em que o corpo vai fazer uma ligação entre dois pontos com elevada diferença de potencial;
- Ausência de resistência de contato suficiente, de forma a limitar a corrente que atravessa o corpo humano para um valor seguro sob as circunstâncias anteriormente descritas;
- Duração do defeito e do contato com corpo, ou seja o fluxo de corrente que atravessa o corpo humano por tempo suficiente para causar danos.

6 Sistemas de Terra

A frequência relativamente baixa dos acidentes é devido à baixa probabilidade de coincidência de todas as condições desfavoráveis acima listadas.

Com o dimensionamento de sistemas de terra pretende-se atingir os seguintes objetivos, [2]:

- Assegurar que pessoas nas proximidades de instalações ligadas à terra não estejam expostas ao perigo de um choque elétrico;
- Providenciar meios para conduzir correntes elétricas para a terra sob condições normais ou em situações de defeito sem exceder os limites operativos dos equipamentos ou afetar a continuidade de serviço.

O sistema de terra inclui todas as instalações de ligação à terra interligadas na área da subestação, incluído a malha de terra, cabos de guarda, condutores de neutro, cabos subterrâneos, fundações, etc. A malha de terra consiste em condutores nus horizontais interligados e com ou sem elétrodos de terra. No dimensionamento da malha de terra os critérios de segurança das tensões toleráveis devem ser cumpridos considerando todo o sistema de terra, pois uma determinada corrente de defeito tende a dividir-se por todo sistema e só uma parte desta flui para malha, caso não se considerasse esta situação a malha de terra ficava sobredimensionada.

É importante que um sistema de terra apresente uma baixa resistência, mas esta por si só não é uma razão de segurança. Existe a necessidade de controlar uma interação entre dois sistemas de terra para garantir a sua segurança, [1].

- Terra intencional - Composta por elétrodos de terra enterrados a uma certa profundidade abaixo da superfície do solo;
- Terra accidental - Temporariamente estabelecida por uma pessoa exposta a um potencial na proximidade de uma instalação de um sistema de terra.

Não existe uma relação simples entre a resistência do sistema de terra e a corrente de defeito máxima a que uma pessoa poderá ser exposta. Numa subestação com uma resistência de terra relativamente baixa pode ser perigosa, enquanto outra subestação com resistência de terra superior pode ser segura, devido a esta ser projetada cuidadosamente [1].

Uma vez que as tensões são dependentes dos locais, seria impossível dimensionar um sistema de terra aceitável para todos os locais. A corrente na rede, a duração do defeito, a resistividade do solo, o material à superfície, o tamanho e a forma da rede, todos estes fatores têm um efeito substancial sobre as tensões em torno da área da subestação [3]. Existem vários fatores que podem levar a um excessivo potencial à superfície da terra, por isso torna-se fundamental que em cada caso seja devidamente estudado e dimensionado conforme as características do local, assegurando a proteção de pessoas e equipamentos na área da subestação e na sua proximidade.

Sendo assim, os sistemas de terra têm como objetivo principal limitar as tensões perigosas que possam ser aplicadas a uma pessoa que venha a ficar em contato com os elementos ligados à rede de terra, e simultaneamente favorecer a intervenção dos dispositivos de proteção, melhorando as condições de segurança [4].

2.2 Tipos de Defeitos

Os sistemas elétricos de energia estão sujeitos a vários tipos de defeitos em diferentes locais. Os curto-circuitos são geralmente chamados de defeitos ou falhas e ocorrem de forma aleatória nos sistemas elétricos. O curto-circuito consiste num contato entre superfícies condutoras a potências diferentes. As suas consequências podem danificar gravemente o sistema elétrico e colocar determinados pontos da instalação sob potenciais que colocam em risco a segurança das pessoas e equipamentos. Alguns dos locais onde é frequente a sua ocorrência são apresentados em seguida, assim como possíveis causas da sua origem [5]:

- **Barramentos das subestações e quadros elétricos**, geralmente devido à ação de elementos externos;
- **Linhas aéreas**, devido a sobretensões de descargas atmosféricas ou ação de elementos externos, rutura de condutores, isoladores e apoios;
- **Cabos subterrâneos, transformadores e máquinas rotativas**, devido a falhas de isolamento, aquecimento, efeitos mecânicos, envelhecimento, campos elétricos elevados.

As principais consequências dos defeitos podem resultar em correntes elevadas que se durarem demasiado tempo provocam o aquecimento dos condutores e a sua deterioração, esforços eletrodinâmicos e variações de tensão. Existem dois tipos de curto-circuitos o trifásico simétrico e assimétrico. O curto-circuito simétrico ocorre menos frequentemente e não provoca o desequilíbrio no sistema elétrico, devido aos três condutores serem solicitados de forma equivalente em módulo nas três fases, desfasadas de $\pm 120^\circ$. Este defeito não é importante para dimensionamento da malha de terra, pois em caso de defeito à terra, não existirá corrente no neutro devido à soma das correntes ser nula. Nos curto-circuitos assimétricos são defeitos desequilibrados do tipo Fase-Fase, Fase-Terra e Fase-Fase-Terra.

A corrente máxima que vai surgir na rede terra deve ser determinada, uma vez que é esta corrente que irá produzir maior *GPR* (aumento do potencial de terra) dentro e perto da área da subestação.

Infelizmente, pode ser extremamente complicado determinar o defeito que irá resultar na pior situação de fluxo de corrente entre a malha de terra e as terras circundantes [1].

As figuras 2.1 à 2.3 mostram a corrente máxima de defeito na rede terra I_F , para vários locais e configurações do sistema e a respetiva corrente na malha I_G .

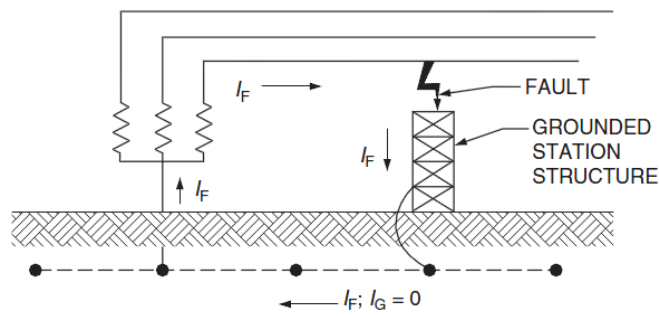


Figura 2.1 - Defeito dentro da Subestação, neutro local ligado à terra [3].

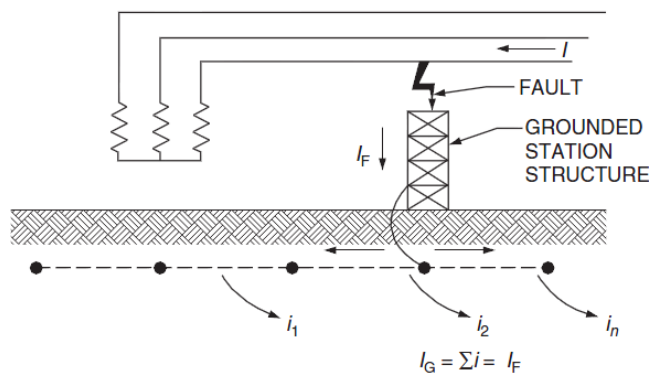


Figura 2.2 - Defeito dentro da Subestação, neutro ligado à terra numa localização remota [3].

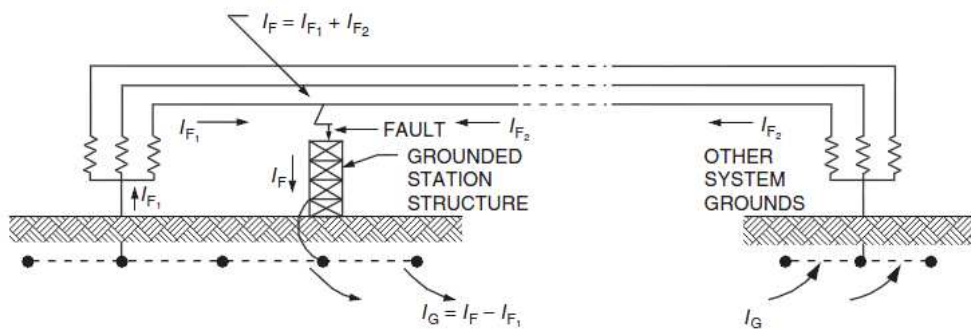


Figura 2.3 - Defeito dentro da Subestação, neutro ligado à terra na subestação e noutros locais [3].

2.2.1 Corrente de Defeito Homopolar

Existem vários tipos de curto-circuitos como foi referido anteriormente, mas apenas são abordados para o dimensionamento de redes de terra os defeitos Fase-Fase-Terra e Fase-Terra. O dimensionamento da malha de terra é baseado no pior defeito, traduzindo-se na máxima corrente que flui pela malha e que leva a situações de potenciais mais elevados. A corrente de defeito é proporcional à componente homopolar e ao fator de divisão de corrente. A divisão da corrente é praticamente independente do tipo de defeito e o pior

defeito pode ser definido como aquele que irá resultar na maior componente homopolar ou fluxo de corrente de defeito à terra, $3I_0$ [1].

O cálculo da componente homopolar da corrente de defeito à terra, I_0 , é realizado utilizando as seguintes expressões:

No caso de um defeito Fase-Fase-Terra,

$$I_0 = \frac{E \times X_2}{X_1 \times (X_0 + X_2) + (X_2 \times X_0)} \quad (2.1)$$

No caso de um defeito Fase-Terra,

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (2.2)$$

Onde,

I_0 é valor simétrico eficaz da componente homopolar da corrente de defeito [A];

E é a tensão entre a fase e o neutro [V];

X_1 é reactância da componente direta [Ω /fase];

X_2 é a reactância da componente inversa [Ω /fase];

X_0 é a reactância da componente homopolar [Ω /fase].

O efeito da resistência foi desprezado, tornando assim as equações mais simplificadas e suficientemente precisas [1].

No anexo A.3 é demonstrada a simplificação das expressões da corrente homopolar.

2.2.2 Divisão da Corrente de Defeito

A figura 2.4 mostra como um sistema de terra se comporta em caso de defeito, facilmente se verifica que no caso de ligações à rede de terra, como por exemplo de cabos de guarda, neutros de transformadores, etc., a corrente de defeito vai se propagar com proporções diferentes pelas várias partes do sistema de terra. Sendo assim, nas subestações que contenham cabos de guarda ou outras ligações à malha de terra, a corrente de defeito I_f , não é exatamente a corrente que flui pela malha de terra, pois se tal fosse considerado levaria a um sobredimensionamento. No dimensionamento da rede de terra interessa determinar qual o fator de divisão da corrente S_f , que traduz a corrente que flui para a malha de terra. Este fator de divisão de corrente, vai depender de vários parâmetros, alguns dos quais são [1]:

- Localização do defeito;
- Magnitude da resistência da rede de terra da subestação;
- Tubos e cabos enterrados na vizinhança ou diretamente ligados ao sistema de terra da subestação;

- Cabos de guarda, neutros, ou caminhos de retorno para outras terras.

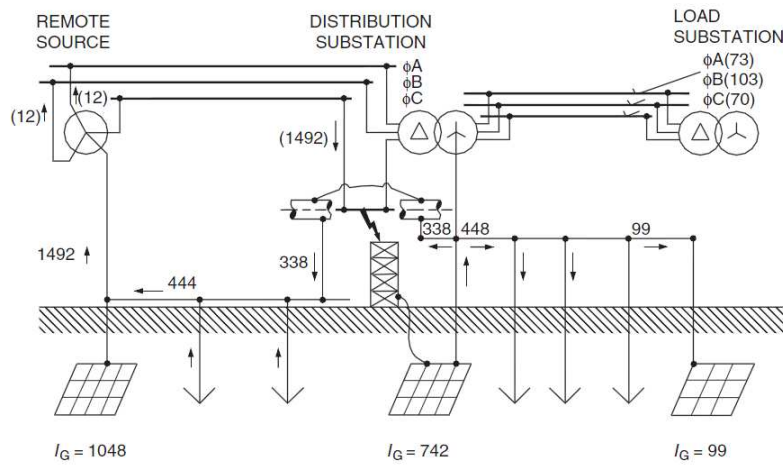


Figura 2.4 - Típica divisão de corrente para um defeito no lado da alta tensão da subestação, retirado [3].

Através da figura 2.5, facilmente se verifica que o cálculo do fator de divisão de corrente consiste em determinar a corrente de defeito que flui para malha de terra da subestação, recorrendo a um modelo equivalente do sistema de terra.

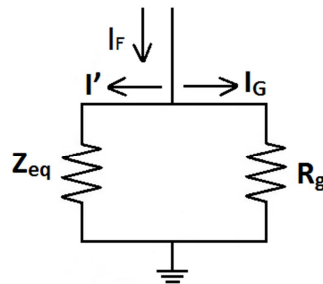


Figura 2.5 - Circuito equivalente do sistema de terra.

Assim, o fator de divisão da corrente é obtido pela seguinte equação:

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} \quad (2.3)$$

Onde,

S_f é o fator de divisão da corrente;

Z_{eq} é impedância equivalente dos caminhos alternativos da corrente elétrica em relação à malha terra [Ω];

R_g é a resistência da malha de terra da subestação [Ω].

Nesta dissertação é utilizado um modelo simplificado para determinar o fator de divisão da corrente, indicado na equação (2.3) e demonstrado no anexo A.4.

Considerando a hipótese que o fluxo da corrente de defeito à terra é constante, a corrente simétrica que flui para malha de terra é expressa pela seguinte equação:

$$I_g = S_f \times I_f \quad (2.4)$$

Onde,

I_g é o valor eficaz da corrente simétrica na malha de terra [A];

I_f é o valor eficaz da corrente simétrica de defeito à terra, $3I_0$ [A].

2.2.3 Efeito Assimétrico da Corrente de Defeito

No cálculo da corrente de defeito, é necessário contabilizar o valor eficaz da corrente assimétrica para um determinado defeito. A corrente de defeito assimétrica é caracterizada por três períodos distintos, o sub-transitório, transitório e permanente, como se pode verificar na figura 2.6.

Na equação (2.5) é introduzido um fator de decaimento D_f , que pretende representar o valor eficaz de uma corrente assimétrica, integrada ao longo da duração de defeito t_f .

$$I_F = D_f \times I_f \quad (2.5)$$

Onde,

I_F é a corrente eficaz de defeito do sistema de terra afetada do fator de decaimento [A].

O fator de decaimento é obtido considerando o efeito inicial da componente contínua de offset.

O valor resultante de I_F é sempre maior que I_f , porque o fator de decaimento é baseado numa suposição bastante conservadora em que componente da corrente alternada não decai com o tempo, mas permanece no seu valor inicial em regime sub-transitorio [3].

A figura 2.6, representa o decaimento exponencial durante os vários períodos do defeito e a componente contínua de offset.

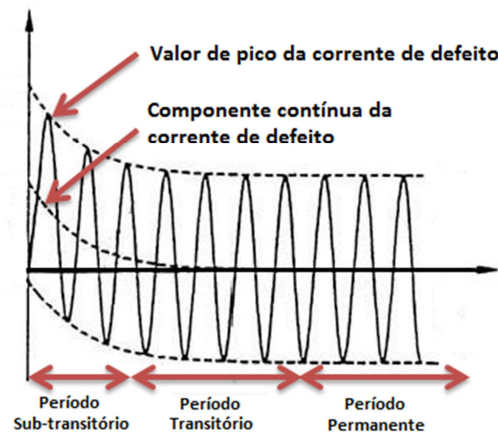


Figura 2.6 - Evolução temporal da corrente de curto-circuito assimétrica.

O fator de decaimento depende da razão entre X/R , da duração do defeito e da frequência do sistema elétrico. Valores elevados de X/R e durações curtas do defeito, levam a fatores de decaimento maiores.

É possível obter o fator de decaimento através da seguinte equação:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{\left(\frac{-2t_f}{T_a}\right)}\right)} \quad (2.6)$$

Onde,

D_f é o fator de decaimento;

t_f é o tempo de duração do defeito [s];

T_a é uma constante de tempo contínua de offset [s];

T_a é dado pela seguinte equação:

$$T_a = \frac{X}{(2\pi f R)} \quad (2.7)$$

Onde,

X/R é a razão entre a reatância e a resistência da rede a montante;

f é a frequência do sistema elétrico [Hz].

No anexo A.2 é realizada a demonstração de como se obtém a equação (2.6).

2.2.4 Corrente de Defeito Máxima na Malha de Terra

O valor máximo da corrente que irá percorrer a malha de terra, é determinado através da equação (2.8), onde se verifica que depende do fator de divisão de corrente e do fator de decaimento, enunciados na equação (2.3) e na equação (2.6), respetivamente.

$$I_G = S_f \times D_f \times I_f \quad (2.8)$$

Capítulo 3

Critérios de Dimensionamento

Neste capítulo é desenvolvido com o objetivo de indicar os métodos matemáticos em que se baseiam os critérios de segurança utilizados no dimensionamento das redes de terra. Numa primeira fase é realizada uma abordagem às possíveis situações de perigo que uma pessoa pode ficar exposta, durante a presença de um defeito no sistema de terra. Em seguida é analisado os efeitos e consequências da passagem da corrente elétrica pelo corpo humano e a importância da eliminação rápida dos defeitos.

A última seção deste capítulo é dedicada à dedução da tensão e corrente tolerável pelo corpo humano. Esta dedução é realizada tendo como base os critérios de segurança impostos por [1] e recorrendo aos métodos utilizados nesse guia.

3.1 Circuitos Acidentais

Os circuitos acidentais, correspondem a situações em que uma pessoa é utilizada como caminho para corrente elétrica, tal situação pode ocorrer quando o sistema de terra está a escoar uma corrente, devido à presença de um defeito à terra. Quando uma pessoa faz parte de um circuito fica sujeita às consequências de um choque elétrico. A probabilidade de uma pessoa ficar sujeita a um circuito acidental é bastante baixa devido às condições simultaneamente necessárias para que tal aconteça, como foi referido no capítulo 2.

O corpo de uma determinada pessoa fica sujeita ao perigo de fazer parte de um circuito quando é estabelecida uma diferença de potencial entre dois locais do corpo, fazendo com que se estabeleça um percurso para a corrente elétrica. As situações mais comuns que caracterizam o estabelecimento de um circuito acidental através do corpo são: tensão toque e tensão passo. No caso da tensão de toque existem ainda dois casos particulares são eles a tensão metal-metal e tensão de transferência.

3.1.1 Tensão de Toque

A tensão de toque é a diferença de potencial estabelecida através do toque numa estrutura metálica ligado ao sistema de terra e a superfície do solo em contato com os pés, como mostra a figura 3.1. Consequentemente, teremos a passagem de uma corrente pelo braço, tronco e pernas; dependendo da duração e da intensidade da corrente, pode ocorrer graves ferimentos.

A expressão matemática que traduz a tensão de toque é facilmente obtida pela observação da figura 3.1:

$$U_{toque} = U_{malha} - U_{pé} \quad (3.1)$$

Onde,

U_{toque} é tensão de toque [V];

U_{malha} é potencial do sistema de terra [V];

$U_{pé}$ é potencial no local onde os pés da pessoa estão em contato com solo [V].

O potencial da malha é obtido através da seguinte expressão:

$$U_{malha} = R_g \times I_G \quad (3.2)$$

Onde,

R_g é a resistência da malha de terra [Ω];

I_G é a corrente máxima que flui para a malha de terra [A].

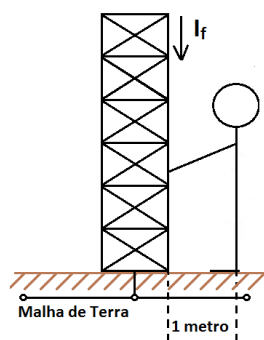


Figura 3.1 - Tensão de toque.

3.1.1.1 Tensão Metal - Metal

Um caso particular da tensão de toque é a tensão metal-metal, este tipo de tensão surge tipicamente quando objetos metálicos ou estruturas dentro do local da subestação não estão ligadas à rede terra. Consideráveis tensões de toque metal-metal podem estar presentes quando uma pessoa está em contato com duas estruturas metálicas onde apenas uma está ligada à malha de terra.

A tensão de toque metal - metal entre estruturas metálicas ligadas à malha de terra é assumida ser desprezável nas subestações convencionais. No caso de uma subestação isolada a gás (GIS), a tensão metal - metal entre estruturas metálicas ligadas à malha de terra pode ser substancial por causa de defeitos internos ou induzidos por correntes nos compartimentos [1].

3.1.1.2 Tensão de Transferência

A tensão de transferência é definida como a diferença de potencial que pode ocorrer pelo contato entre uma estrutura metálica, ligada a um sistema de terra bastante afastado do local de toque, e a superfície da terra no local de contato considerada a um potencial nulo.

A tensão de transferência é um caso particular da tensão de toque e pode ser resolvida, através de ligações à terra em vários locais.

3.1.2 Tensão de Passo

É a diferença de potencial estabelecida à superfície do solo entre os pés de uma pessoa na área de influência da malha de terra quando sujeita a uma corrente de defeito, admitindo uma distância de 1 metro entre os pés.

Através da figura 3.2, facilmente se obtém a seguinte equação que traduz a tensão de passo numa determinada pessoa.

$$U_{passo} = U_{pé1} - U_{pé2} \quad (3.3)$$

Onde,

U_{passo} é tensão de passo [V];

$U_{pé1}$ é potencial à superfície do solo no pé 1 [V];

$U_{pé2}$ é potencial à superfície do solo no pé 2 [V].

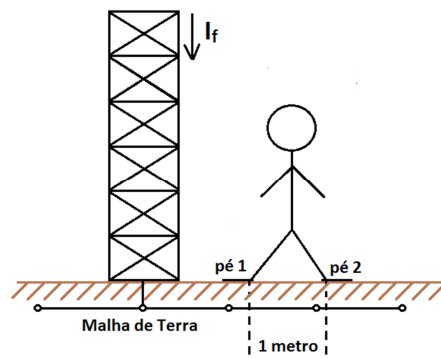


Figura 3.2 - Tensão de passo.

Na figura 3.3 estão representadas as tensões definidas anteriormente e a sua variação de potencial à superfície do solo. Através de uma análise, facilmente se verifica o elevado potencial que uma pessoa pode ficar submetida por uma tensão de transferência.

É importante verificar o comportamento da tensão de toque e de passo na superfície do solo, facilmente se pode concluir que habitualmente a tensão de toque irá apresentar valores mais elevados em relação à tensão de passo.

Na figura 3.3 é possível verificar que a tensão da malha é superior à tensão de toque e de passo. Ao longo da dissertação vai-se concluir que esta variável é fundamental para o dimensionamento e otimização das malhas de terra.

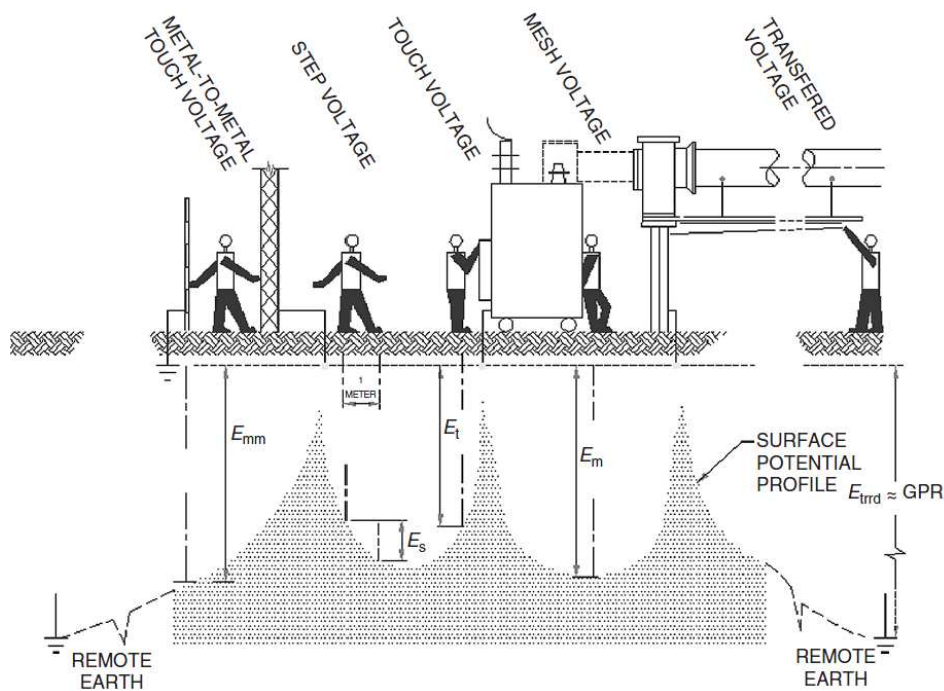


Figura 3.3 - Situações típicas de choque elétrico, retirado [3].

3.2 Efeito da Corrente no Corpo Humano

A introdução de correntes no corpo humano, a partir do exterior, pode causar alterações temporárias e irreversíveis das funções vitais, ferimentos mais ou menos graves, podendo provocar danos mortais. Os efeitos da corrente elétrica ao passar pelo corpo humano estão dependentes dos seguintes fatores:

- A intensidade, o tempo de duração e a frequência da corrente elétrica;
- Resistência do corpo humano;
- O percurso da corrente no corpo humano.

É fundamental para o dimensionamento de um sistema de terra ter conhecimento dos limites e consequências que a corrente elétrica pode provocar no corpo humano. A consequência mais perigosa é um efeito designado por fibrilação ventricular, que resulta em paragem cardíaca imediata.

3.2.1 Resistência e Percurso da Corrente Elétrica no Corpo Humano

O corpo humano pode ser aproximado a uma resistência, quando sujeito a correntes contínuas e correntes alternadas a 50Hz ou 60Hz. Genericamente os efeitos prejudiciais ao corpo humano, aquando da passagem de uma corrente contínua são menos significativos que os correspondentes a uma corrente alternada com o mesmo valor eficaz.

Vários testes foram realizados por Dalziel para determinar as correntes a que o corpo humano podia aguentar a 60Hz, com as mãos e os pés molhados [6]. Os valores obtidos revelaram que o pior caso era quando se estabelecia uma tensão entre a mão e o pé resultando numa corrente 9.0mA e uma tensão de 10.2V. Sendo assim, a resistência obtida para um contato mão - pé é igual a $10.2/0.009$, ou seja 1133Ω . O valor da resistência do corpo obtido nesta experiência é aproximado para 1000Ω , devido aos pressupostos admitidos por [1], para qualquer que seja o percurso da corrente.

O percurso da corrente entre a mão e um pé ou entre os pés é quando a maior parte da corrente percorre o corpo pelos locais onde estão localizados órgãos vitais, como é o caso do coração. Testes realizados por Loucks [7] mostram que é geralmente aceite que a corrente que flui de um pé para o outro é muito menos perigosa.

Tendo em conta o estudo realizado por Loucks poderia considerar-se o uso uma resistência superior a 1000Ω , quando se trata de um percurso pé - pé. No entanto devem ser considerados os seguintes fatores, mencionados em [1]:

- Uma tensão entre dois pés, dolorosa mas não fatal, pode resultar em uma queda que poderia causar um maior fluxo de corrente através da área do peito. O grau de risco seria ainda assim dependente da duração do defeito e da possibilidade de outro choque sucessivo;

- Uma pessoa poderia estar a trabalhar ou descansar numa posição propensa, quando ocorre o defeito.

Devido aos fatores mencionados, a resistência de 1000Ω vai ser considerada para qualquer que seja o percurso da corrente pelo corpo.

$$R_B = 1000\Omega \quad (3.4)$$

Esta condição estabelecida por [1], permite aumentar a margem de segurança no dimensionamento das redes de terra, através da aplicação de uma medida conservadora.

3.2.2 Frequência

As pessoas são muito vulneráveis aos efeitos da corrente elétrica a frequências de 50 ou 60Hz. Correntes de aproximadamente 0.1A podem ser letais. Estudos realizados, (Dalziel e Mansfield [8]; Dalziel, Ogden e Abbott [9]) indicam que em frequências de 3 000 – 10 000Hz, o corpo humano pode tolerar correntes mais elevadas. Em alguns casos o corpo humano pode ser capaz de suportar correntes provenientes de descargas atmosféricas [1].

3.2.3 Intensidade e Tempo de Duração da Corrente Elétrica

Os efeitos da corrente elétrica no corpo humano tornam-se mais perigosos com o aumento da intensidade e duração da corrente de defeito. A partir de dados experimentais ao longo dos anos estabeleceram-se limites de perigosidade da corrente elétrica em relação aos efeitos fisiológicos que a sua passagem provoca no corpo humano [4]. Os efeitos mais comuns da corrente elétrica no corpo, descrevendo por ordem crescente da intensidade de corrente, são: limiar de percepção, contração muscular, inconsciência, fibrilação ventricular, bloqueio das vias respiratórias e queimaduras [1].

O corpo humano quando sujeito a correntes de aproximadamente 1mA começa a sentir uma ligeira sensação de formigueiro entre as mãos ou dedos. No entanto, com correntes 60mA a 100mA atinge-se o limite de fibrilação ventricular, podendo levar a situações de graves ferimentos ou até a morte [1].

No dimensionamento de um sistema de terra pretende-se que as correntes que circulam pelo corpo durante o contato sejam inferiores ao limite de fibrilação ventricular para evitar que ocorram ferimentos graves ou até a morte.

Dalziel estabeleceu uma equação para uma duração do contato com defeito entre 0.03s e 3.0s que permite relacionar a corrente de defeito que percorre o corpo humano com a duração e obter assim a energia do choque elétrico tolerada por uma determinada percentagem de uma população.

$$S_B = (I_B)^2 \times t_S \quad (3.5)$$

Onde,

I_B é a intensidade de corrente suportada pelo corpo humano [A];

t_S é o tempo a que o corpo está exposto a uma corrente [s];

S_B é uma constante empírica relacionada com a energia tolerada pelo corpo quando sujeito a um choque elétrico, para uma determinada percentagem de uma população.

3.2.4 Importância da Eliminação dos Defeitos

Um defeito com baixa intensidade de corrente, mas com elevada duração pode ser tanto ou mais perigoso que um defeito com elevada intensidade de corrente e baixa duração. Com base na equação (3.5) facilmente se entende que a eliminação de um defeito é extremamente importante para a segurança das pessoas, destacando-se duas razões, [1]:

- A probabilidade de exposição a um choque elétrico é muito reduzida quando o tempo de eliminação de defeito é rápido, em contraste com as situações em que as correntes de defeito podem persistir durante vários minutos ou possivelmente horas.
- A experiência e testes mostram que a hipótese de ocorrerem ferimentos graves ou até a morte é bastante reduzida se a duração do fluxo de corrente que atravessa o corpo for muito breve.

3.3 Corrente Tolerável pelo Corpo Humano

Na seção 3.1, foi verificado que a corrente elétrica no corpo humano é extremamente perigosa. O dimensionamento do sistema de terra é efetuado para que o corpo humano não fique sujeito ao perigo de um choque elétrico que leve a causar graves ferimentos ou até a morte.

Com base nos resultados e estudos de Dalziel (Dalziel [10]; Dalziel e Lee [11]), presume-se que 99,5% das pessoas podem suportar com segurança, sem que ocorra fibrilação ventricular, a passagem de uma corrente com a intensidade e duração determinada pela seguinte equação, [1]:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_S}} \quad (3.6)$$

Como definido na equação (3.5), S_B é uma constante empírica relacionada com a energia tolerada pelo corpo ao choque elétrico para 99,5% de uma população.

$$k = \sqrt{S_B} \quad (3.7)$$

O peso corporal influencia o limite da corrente de fibrilação a que um determinado corpo pode estar sujeito, como é mostrado na figura 3.4. Estudos realizados por Dalziel levaram a concluir que para $50kg$ o valor de $S_{B50kg} = 0.0135$ e para $70kg$ $S_{B70kg} = 0.0246$.

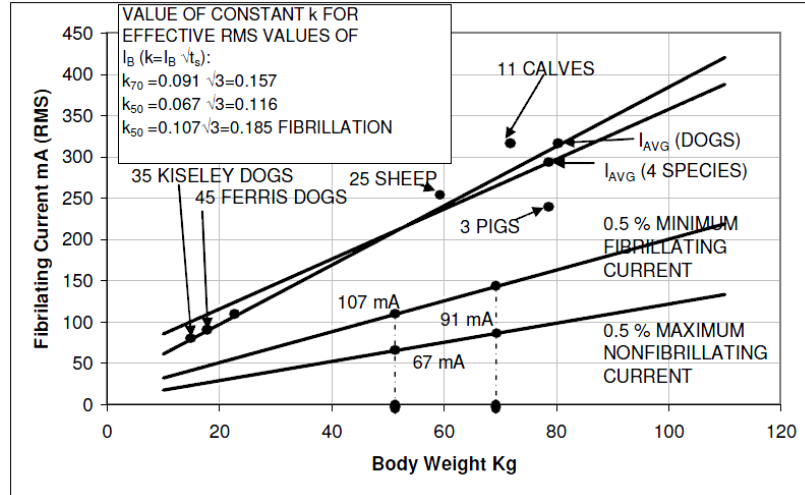


Figura 3.4 - Corrente de fibrilação em função do peso corporal, retirado [1].

A figura 3.4 representa a relação entre a corrente de fibrilação e o peso corporal de várias espécies de animais, quando expostos a choques elétricos durante 3s. É possível verificar que em pessoas com peso corporal de $50kg$ e $70kg$ a corrente para ocorrer fibrilação ventricular em 0,5% de uma população é $67mA$ e $91mA$, respetivamente.

Aplicando a equação (3.6) a pessoas com peso corporal de $50kg$ fica:

$$I_{B50kg} = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.8)$$

I_{B50kg} é a corrente máxima tolerável por uma pessoa com peso corporal de $50kg$ [A].

No caso de pessoas com peso corporal de $70kg$:

$$I_{B70kg} = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.9)$$

I_{B70kg} é a corrente máxima tolerável por uma pessoa com peso corporal de $70kg$ [A].

As equações (3.8) e (3.9) são limitadas para tempos de contato entre $0.03s$ e $3.0s$, sendo que para maiores ou menores períodos de tempo esta equação não é válida [1].

O peso corporal que vai ser considerado para dimensionar a rede de terra é de $70kg$, este valor é usado no método de dimensionamento proposto por [1], pois o uso de um peso corporal de $50kg$ pode levar a valores muito conservadores.

No dimensionamento vai ser considerado que $t_s = t_f$, ou seja que a duração do contato é igual à duração do defeito. É uma situação que nem sempre acontece, mas que deve ser considerada para dimensionamento devido à difícil quantificação do tempo de contacto em relação ao tempo de duração do defeito. Ao considerar esta suposição quando a duração de contato é menor que a duração do defeito, a corrente tolerável considerada no dimensionamento da malha de terra é mais conservadora em relação à que seria obtida com o tempo t_s , isto permite obter um dimensionamento com uma margem de erro a favorecer a segurança.

3.4 Tensão de Toque e Passo Tolerável

O dimensionamento das redes de terra que é realizado neste trabalho tem como base as tensões toleráveis pelo corpo de uma pessoa. São consideradas duas situações a que uma pessoa pode estar sujeita a fazer parte de um circuito acidental à terra, no interior ou nos arredores da subestação, são elas a tensão de passo e a tensão de toque representadas nas figuras 3.5 e 3.6, respetivamente.

Na figura 3.5 e 3.6 a variável I_c , representa a corrente que circula pelo corpo humano, como é óbvio a corrente I_c tem que ser inferior ou igual a I_B , quando $I_c = I_B$ estamos perante a tensão máxima tolerável.

A figura 3.5, mostra a corrente de defeito I_f , a ser injetada no sistema de terra da subestação. A corrente I_c , flui entre os dois pés de uma determinada pessoa, considerando uma distância de um metro.

A figura 3.6, mostra a corrente de defeito I_f , a ser injetada para o sistema de terra da subestação. Está também representada uma pessoa a tocar numa estrutura metálica, estando esta ligada à malha de terra da subestação, a corrente I_c flui a partir do local de toque na estrutura metálica pelo corpo da pessoa até à superfície do solo que está em contato com os pés.

Este critério de segurança definido por [1], tem como base o uso de um modelo simplificado, considerando apenas a resistência de Thévenin do corpo humano. É possível determinar a tensão tolerável pelo corpo humano, usando a corrente tolerável definida nas equações (3.8) e (3.9).

As figura 3.5 e 3.6, mostram que resistência do circuito acidental R_A , é dada pela resistência do corpo mais a resistência entre pé e o solo, R_f .

No caso da tensão de passo verifica-se na figura 3.5, que as resistências pé-solo estão em série, logo:

$$R_{A_{passo}} = R_B + 2R_f \quad (3.10)$$

No caso da tensão de toque verifica-se na figura 3.6, que as resistências pé-solo estão em paralelo, logo:

$$R_{A_{toque}} = R_B + \frac{R_f}{2} \quad (3.11)$$

A resistência do corpo R_B , é considerada constante e já foi definida na equação (3.4).

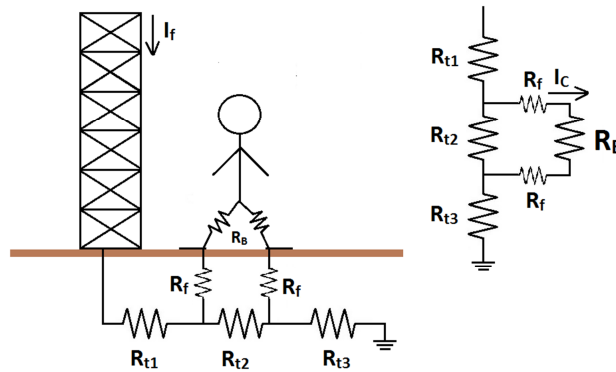


Figura 3.5 - Esquema e circuito equivalente da tensão de passo.

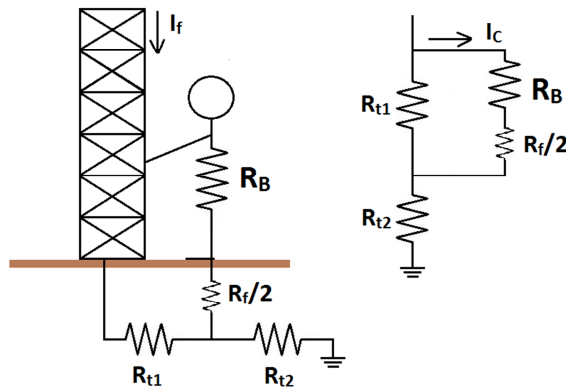


Figura 3.6 - Esquema e circuito equivalente da tensão de toque.

A resistência R_f , é considerada por [1], como um disco metálico condutor e a resistência de contato dos sapatos, meias, etc., é considerada desprezável. Este modelo assume ainda que a resistência mútua entre pés têm um efeito desprezável.

Laurent [12], definiu que a resistência entre o pé e o solo pode ser obtida através da seguinte equação:

$$R_f = \frac{\rho}{4b} \quad (3.12)$$

Onde,

ρ é a resistividade do solo [$\Omega \cdot m$];

b é o raio do disco metálico [m].

Considerando que $b = 0.08$, e através de uma ligeira aproximação o valor de R_f será dado pela seguinte equação, [1]:

$$R_f = 3\rho \quad (3.13)$$

A aproximação realizada na equação (3.13), permite obter um valor de R_f mais conservador, introduzindo uma margem de erro que está do lado da segurança.

Assim, através da equação (3.13) e (3.10) facilmente se verifica que a tensão de passo tolerável é dada por:

$$E_{Tolerável_passo} = (1000 + 6\rho) \times I_B \quad (3.14)$$

No caso da tensão de toque, através da equação (3.13) e (3.11), obtém-se:

$$E_{Tolerável_toque} = (1000 + 1.5\rho) \times I_B \quad (3.15)$$

Aplicando na equação (3.14) a corrente tolerável imposta pela equação (3.9), obtém-se a seguinte equação para a tensão tolerável de passo, considerando uma pessoa com peso corporal de 70kg:

$$E_{Tolerável_passo_70kg} = (1000 + 6\rho) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.16)$$

Aplicando na equação (3.15) a corrente tolerável imposta pela equação (3.9), obtém-se a seguinte equação para a tensão tolerável de toque, considerando uma pessoa com peso corporal de 70kg:

$$E_{Tolerável_toque_70kg} = (1000 + 1.5\rho) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.17)$$

3.4.1 Tensão de Toque Metal - Metal Tolerável

Tendo como base a norma do IEEE Std 80, nas subestações convencionais um caso típico da tensão de toque metal - metal ocorre quando estruturas metálicas dentro do local da subestação não estão ligadas à rede de terra, por exemplo um contato entre uma estrutura ligada com outra que não se encontra ligada à malha de terra. Quando esta situação ocorre

para garantir a segurança das pessoas é necessário verificar que a tensão a que vão estar sujeitas é igual ou inferior à tensão tolerável metal - metal.

Esta tensão tolerável metal - metal é facilmente obtida através das equação (3.17), considerando que $\rho = 0$, isto deve-se ao facto da resistência do circuito accidental depender apenas de R_B .

$$E_{Tolerável_toque_metal-metal_70kg} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.18)$$

A nível prático, os perigos resultantes a partir do contato metal - metal podem ser facilmente evitados através da ligação dos locais onde possa surgir potenciais perigosos à malha de terra da subestação. Para efeitos de dimensionamento esta tensão tolerável metal-metal não vai ser utilizada, devido a ser considerado que todas as partes metálicas suscetíveis de serem tocadas se encontram ligadas à malha de terra da subestação.

3.4.2 Tensão de Transferência Tolerável

Conforme estabelecido por [1] é impraticável e muitas vezes impossível dimensionar uma rede de terra com base na tensão de transferência. Esta tensão pode ser extramente elevada devido a tensões induzidas nos circuitos de comunicação, neutros, etc.

É aconselhado por [1] que estes locais devem ser evitados usando isolamento ou neutralizando os dispositivos e por tratamento e clara identificação desses circuitos, tubos, etc., como sendo equivalentes a linhas sob tensão.

3.5 Influência de uma Camada de Material Protetor

A colocação de uma camada de material protetor na superfície do solo é uma prática bastante comum nas subestações e tem como objetivo aumentar a resistência de contato entre o solo e os pés das pessoas. O material adicionado convém ter uma resistividade bastante superior relativamente à resistividade do solo subjacente, para que as correntes tenham tendência a permanecer principalmente nesta camada.

Com adição da camada protetora sobre o solo a resistência de contato entre o solo e os pés das pessoas obtida pela equação (3.13), passa a ser influenciada por um fator de correção que pretende traduzir o efeito da utilização de um material protetor à superfície do solo.

$$R_f = 3\rho_s C_s \quad (3.19)$$

Onde,

ρ_s é a resistividade do material protetor colocado à superfície [$\Omega.m$];

C_s é o fator de correção para utilização de uma camada protetora à superfície.

O fator de correção para a camada protetora colocada à superfície é obtido através da seguinte equação:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (3.20)$$

Onde,

h_s é a espessura da camada protetora colocada à superfície [m].

A figura 3.7, representa a estrutura do solo quando é adicionada uma camada de material protetor na superfície.

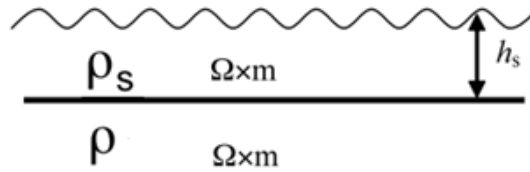


Figura 3.7 - Representação da colocação de uma camada de material protetor à superfície.

A maior resistência de contato entre o solo e os pés, leva a que a corrente que flui através do corpo será consideravelmente menor, traduzindo-se numa medida prática para contribuir para um aumento das tensões toleráveis pelo corpo humano.

Aplicando o fator de correção da camada superficial nas equações (3.16) e (3.17), obtêm-se:

No caso da tensão de passo tolerável:

$$E_{Tolerável_passo_70kg} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.21)$$

No caso da tensão de toque tolerável:

$$E_{Tolerável_toque_70kg} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (3.22)$$

Se não for utilizada nenhuma camada de material protetor, fica $C_s = 1$ e $\rho_s = \rho$.

Capítulo 4

Características do Solo

Na elaboração de um projeto de redes de terra é importante o conhecimento das características do solo, principalmente a sua resistividade. Este fator é muito importante para dimensionamento, porque uma aproximação mal efetuada pode por em causa a segurança das pessoas e equipamentos.

A resistividade de um terreno corresponde à resistência teórica em ohm de um cubo de terra de 1 metro de lado e exprime-se em $\Omega.m$. A elevada gama de valores que a resistividade do solo pode atingir, desde 1 a $10\,000\Omega.m$, afetam significativamente o desempenho do sistema de terra, no qual se pretende que a corrente de defeito se dissipe para o solo envolvente sem que a subestação fique sujeita a potenciais perigosos. A resistividade do solo na proximidade dos elétrodos pode ser afetada devido à corrente que flui através destes. As características térmicas e o teor em humidade determinam se uma corrente de uma dada intensidade e duração causam uma secagem significativa, que resulte num aumento da resistividade do solo [1].

Não é possível atribuir um valor típico de resistividade a um tipo específico de solo, usualmente são encontrados valores diferentes de resistividade para o mesmo solo em localizações distintas.

Torna-se fundamental na elaboração de um projeto de terras fazer uma avaliação e caracterização da estrutura do solo, através de medições, amostras e vários estudos geológicos para que se consiga determinar com grande precisão as características e a estrutura do solo onde se pretende instalar as redes de terra.

4.1 Modelo do Solo

O solo é extramente difícil de caracterizar devido a sua constituição não uniforme, mas através de estudos é possível chegar a um modelo aproximado da sua constituição. É necessário ter em conta que o modelo solo é apenas uma aproximação das condições do solo reais e que uma correspondência perfeita é impossível.

A forma mais simples de modelizar um tipo de solo é considerando um modelo uniforme, sendo esta a forma normalmente utilizada quando há uma variação moderada da resistividade. Em condições de solo homogêneos, que raramente ocorrem na prática, o modelo de solo uniforme pode ser bastante preciso. Se houver uma grande variação na resistividade em diferentes locais do solo, o modelo de solo uniforme é desfavorável, podendo-se obter resultados menos precisos [1].

Quando estamos perante solos onde existem duas camadas com resistividades distintas, pode ser necessário para obter resultados mais precisos modelar o solo em duas camadas. O modelo das duas camadas é constituído por uma camada superior de profundidade finita e uma camada inferior de espessura infinita. A mudança abrupta de resistividade nos limites de cada camada do solo pode ser descrita por meio de um fator de reflexão. O fator de reflexão, K , é definido pela equação (4.1):

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} \quad (4.1)$$

Onde,

ρ_1 é a resistividade da camada superior do solo [$\Omega.m$];

ρ_2 é a resistividade da camada inferior do solo [$\Omega.m$].

A representação mais precisa de um sistema de terra deve basear-se na variação real da resistividade do solo presente no local de instalação das redes de terra, mas raramente é economicamente justificável ou tecnicamente viável modelar todas essas variações. Na maioria dos casos, a representação de um sistema de terra com base num modelo de duas camadas é suficiente para que se garanta um dimensionamento seguro [1].

Existe ainda a possibilidade de não ser possível uma representação devidamente precisa do solo através do método das duas camadas, devido ao solo ser altamente não uniforme. Nestes casos, pode-se adotar outras formas para modelizar o solo, recorrendo a técnicas de multicamadas que são utilizadas quando um modelo de duas camadas não é viável. Um modelo de solo de multicamadas pode incluir diversas camadas horizontais ou camadas verticais.

4.2 Fatores que Influenciam a Resistividade do Solo

O solo apresenta vários fatores que influenciam de forma significativa a sua resistividade. Na figura 4.1 é mostrado o efeito da humidade, temperatura e composição química na resistividade solo.

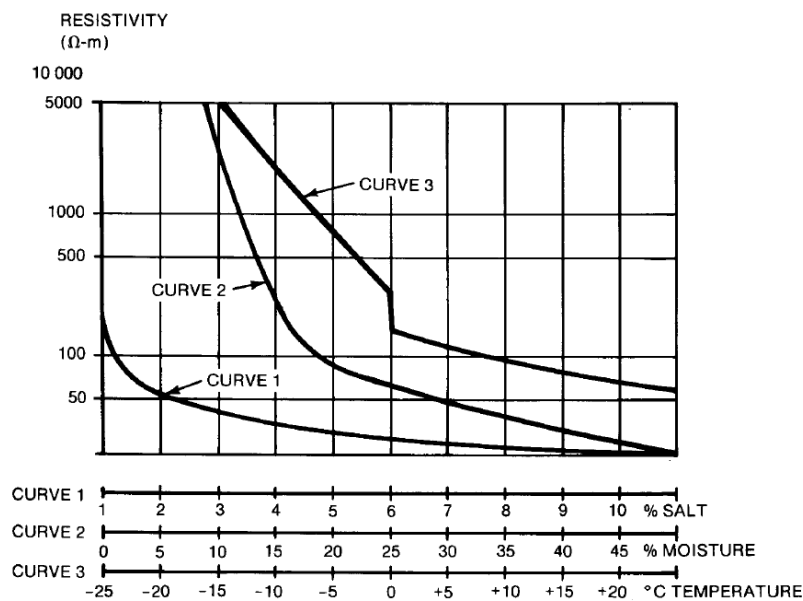


Figura 4.1 - Efeito da temperatura, humidade e sais solúveis na resistividade do solo, retirado [1].

A condução elétrica no solo é essencialmente eletrolítica. Por esta razão a resistividade da maioria dos solos, aumenta abruptamente com a redução humidade, sendo esse aumento mais significativo quando teor de humidade representa menos de 15% do peso do solo. A quantidade de humidade depende ainda do tamanho do grão do solo, do grau de compressão do solo e variabilidade dos tamanhos dos grãos. No entanto, como mostra a curva 2 da figura 4.1, a resistividade é pouco afetada quando o teor de humidade é superior aproximadamente 22% [1].

O efeito da temperatura sobre a resistividade do solo é quase insignificante para temperaturas acima do ponto de solidificação. A 0°C, a água no solo começa a congelar e a resistividade aumenta rapidamente, a curva 3 mostra esta variação típica para um solo de barro arenoso contendo 15,2% de humidade em peso [1].

A composição e a quantidade de sais solúveis, ácidos ou alcalinos presentes no solo pode afetar consideravelmente a resistividade do solo. A curva 1 da figura 4.1 ilustra um efeito típico do sal (cloreto de sódio) sobre a resistividade de um solo contendo 30% de humidade em peso [1].

Além dos fatores apresentados no gráfico podem existir outros que também influenciam na resistividade como por exemplo o tipo de solo, compactidade, granulometria, estratificação do solo, etc., estes porém são os mais importantes e que se destacam, quando se pretende caracterizar um determinado solo.

Existem vários tipos de solo e com resistividades variadas para diferentes locais, na tabela 4.1 são apresentados alguns valores que caracterizam o solo em função da sua natureza.

Tabela 4.1 — Resistividade para vários tipos de solos, retirado [4].

Natureza dos Terrenos	Resistividade [$\Omega \cdot m$]
Terreno pantanoso	1 a 30
Lama	20 a 100
Húmus	10 a 150
Turfa húmida	5 a 100
Argila plástica	50
Mármore e argilas compactas	100 a 200
Mármore do Jurássico	30 a 40
Areia argilosa	50 a 500
Areia siliciosa	200 a 3 000
Solo pedregoso nu	1 500 a 3 000
Solo pedregoso recoberto de relva ou erva curta	300 a 500
Calcários macios	100 a 300
Calcários compactos	1 000 a 5 000
Calcários fissurados	500 a 1 000
Xistos	50 a 300
Micaxistos	800
Granito e grés, consoante a alteração geológica	1 500 a 10 000
Granito muito alterado	100 a 600
Betão com 1 de cimento e 3 inertes	150
Betão com 1 de cimento e 5 inertes	400
Betão com 1 de cimento e 7 inertes	500

Um solo mais compacto apresenta uma maior continuidade física em função da redução do espaço físico entre as suas partículas, proporcionando um menor valor de resistividade.

A granulometria do solo influencia a sua resistividade na medida em que material com maior granulometria, tende a aumentar a resistividade em decorrência da menor capacidade de retenção de água no solo deixando-a fluir para camadas mais profundas ou evaporar-se, existindo ainda um menor contacto entre os grãos resultando numa menor condutividade elétrica. A existência de grãos de tamanhos variados tende a diminuir a resistividade, pois os menores preenchem os espaços vazios existentes entre os grãos maiores, provocando uma maior continuidade da massa do solo e maior capacidade de retenção da humidade.

Os solos raramente são homogêneos e normalmente são formados por várias camadas estratificadas, com resistividades diferentes. Considerando um solo de duas camadas em que ρ_1 é a resistividade da camada superior e ρ_2 a resistividade da camada inferior, localizadas num local onde se pretende dimensionar uma rede de terra, verifica-se o seguinte [1]:

Se $\rho_1 < \rho_2$, a densidade de corrente é maior nos condutores localizados nas extremidades da malha de terra, pois a corrente tem tendência em ir para camada superior por causa da resistividade ser menor.

Se $\rho_1 > \rho_2$, a densidade de corrente é mais uniforme ao longo de todos os condutores da malha de terra, isto é causado pela tendência da corrente da rede ir para baixo para a camada de menor resistividade.

Analisando o que foi referido anteriormente, facilmente se conclui que é preferível camadas superiores com resistividade elevada e que com a profundidade esta vá diminuindo, levando as correntes a fluir para solos mais profundos.

Estas variações de resistividade no solo têm influência considerável sobre o desempenho da maioria dos sistemas de terra, afetando tanto o valor da resistência de contato como as tensões toque e passo toleráveis à superfície do solo [1].

4.3 Modelo Equivalente do Solo Uniforme

No projeto de otimização de redes de terra o algoritmo desenvolvido nesta dissertação é baseado numa estrutura de solo uniforme. A utilização do algoritmo para solos com duas ou mais camadas é possível, mas vem acompanhado de um erro em todos os parâmetros que envolvem a resistividade do solo. É por isso aconselhado que a utilização desta aproximação seja efetuada para solos em que o contraste entre as resistividades das várias camadas é moderado.

A resistividade aproximada para um modelo de solo uniforme pode ser obtida através de uma média aritmética dos dados medidos pela resistividade aparente, conforme mostra a equação (4.2).

$$\rho_a(av1) = \frac{\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)}{n_T} \quad (4.2)$$

Onde,

$\rho_a(1) + \rho_a(2) + \rho_a(3) + \dots + \rho_a(n)$, são os dados da resistividade obtidos para diferentes espaçamentos no método quatro pinos de Wenner;

n_T é numero total de medições.

Esta aproximação a um solo uniforme, através dos valores de resistividade medidos ao longo do terreno onde vai ser instalada a rede de terra é menos eficaz quando a resistividade de um solo varia significativamente.

No anexo A.1 encontra-se descrito o processo de aplicação do método de Wenner para realizar as medições no local onde se pretende implementar a rede de terra.

4.4 Utilização de Material Protetor à Superfície do Solo

A utilização de uma camada de material protetor à superfície do solo com elevada resistividade, normalmente de gravilha ou asfalto, usualmente com uma espessura entre 0,05 a 0,15m. Os valores de resistividade da camada superficial dependem de muitos fatores, alguns dos quais são: tipo de material, tamanho, estado da material, quantidade e tipo de teor em humidade, a contaminação atmosférica, etc. Esta camada é bastante útil devido às vantagens que apresenta no retardamento da evaporação da humidade e limitação da secagem das camadas superficiais do solo durante períodos prolongados de tempo seco. Além disso, como foi referido na seção 3.5, cobrindo a superfície com um material de elevada resistividade torna-se muito útil para a segurança das pessoas, devido ao aumento da tensão tolerável pelo corpo humano [1].

Os principais materiais e espessura da camada protetora colocada à superfície do solo nas subestações em Portugal são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resistividade do material protetor colocado à superfície.

Tipo de Camada Protetora	Espessura [m]	Resistividade [$\Omega \cdot m$]
Gravilha	0,12	2500
Alcatrão	0,05	9000

A gravilha é muito comum o seu uso no interior da subestação, enquanto o alcatrão pode ser necessário a sua utilização no perímetro da subestação, fundamentalmente na zona exterior à vedação. Existe principalmente duas razões para utilização de alcatrão, elevados potenciais à superfície do solo e por ser um material que se fixa fortemente ao solo, pois o uso de gravilha numa zona exterior á vedação poderia levar à sua dispersão com o decorrer do tempo.

Capítulo 5

Algoritmo de Otimização

Este capítulo tem como objetivo descrever as várias etapas do desenvolvimento do algoritmo de otimização. Numa primeira fase é realizada uma abordagem sobre as principais imposições regulamentares utilizadas em Portugal no dimensionamento de redes de terra. Em seguida são referidos os métodos utilizados para o cálculo da seção dos condutores e da resistência da rede de terra.

Na fase final do capítulo é descrita a estrutura do algoritmo de otimização, indicando os principais passos e termina com uma referência às principais limitações e considerações utilizadas.

5.1. Principais Imposições Regulamentares

As principais imposições regulamentares são obtidas pelo regulamento de segurança de subestações e postos de transformação e de seccionamento utilizado em Portugal [13], que tem como objetivo fixar as condições técnicas a que devem obedecer o estabelecimento e a exploração das subestações em locais públicos ou privados.

As principais imposições regulamentares que influenciam o dimensionamento dos sistemas de terra são:

- A resistência de terra dos elétrodos deverá ser tão pequena quanto possível e inferior, em qualquer ocasião, a 20Ω .
- As chapas, varetas e tubos devem ficar enterrados verticalmente no solo, a uma profundidade tal que entre a superfície do solo e o eletrodo haja uma distância mínima de $0,80m$. A profundidade para fitas ou cabos não será inferior a $0,60m$.
- O diâmetro mínimo das varetas e tubos será, respetivamente, de $20mm$ e $50mm$ e o seu comprimento mínimo de $2m$;
- A seção mínima dos cabos será de $50mm^2$, para qualquer material.

Estas imposições são implementadas no algoritmo, por forma a garantir que no processo de dimensionamento as medidas impostas pelo regulamento estão a ser cumpridas.

É importante salientar que muitas destas medidas são estandardizadas pelas empresas para valores ligeiramente superiores aos necessários, principalmente no que diz respeito a seção dos condutores e ao comprimento dos elétrodos, devido às vantagens económicas que advém na aquisição de maior quantidade de material do mesmo tipo, tamanho ou seção.

5.2. Cálculo da Seção dos Condutores

Na realização do dimensionamento de redes de terra é importante ter em atenção que tipo de material se utiliza, pois as suas características podem ser ótimas para um determinado local e péssimas para outros. É importante fazer uma avaliação correta dos tipos de materiais mais favoráveis a nível técnico e económico.

A seção dos condutores a utilizar na malha de terra é calculada a partir do tipo de material que vai ser utilizado, da duração e da intensidade da corrente de defeito, como mostra a seguinte equação:

$$S = I_f \times k_f \sqrt{t_f} \quad (5.1)$$

Onde,

S é a seção do condutor em *kcmils* ($kcmils = 1,974 \times mm^2$).

k_f é a constante correspondente ao material a utilizar que é obtida da tabela 5.1, que é dependente da condutividade do material, da temperatura de fusão, da capacidade térmica e da temperatura ambiente, considerada de 40°C.

O diâmetro do condutor é facilmente calculado, recorrendo à seguinte equação:

$$d = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} \quad (5.2)$$

No dimensionamento de um sistema de terra o cobre é o material condutor mais comum a ser utilizado. Os condutores de cobre, para além da elevada condutividade, têm a vantagem de ser resistentes à maior parte da corrosão subterrânea. Existem outras hipóteses no mercado que são frequentemente usadas quando por exemplo o roubo é um problema, como é caso do aço revestido a cobre em elétrodos e ocasionalmente para ligações à malha de terra. Além deste, existe ainda a hipótese do alumínio, mas é utilizado com menos frequência devido à sua principal desvantagem que é o seu comportamento como um ânodo

perante outros metais, levando a que facilmente se possa corroer e assim diminuir a sua capacidade condutora.

Tabela 5.1 — Constantes que caracterizam o material usado, retirado [1].

Material	Condutividade (%)	T_m (°C)	K_f
Cobre, recozido e flexível	100.0	1083	7.00
Cobre, comercial rígido em várias formas	97.0	1084	7.06
Fio de aço revestido por cobre	40.0	1084	10.45
Fio de aço revestido por cobre	30.0	1084	12.06
Elétrodo de aço revestido a cobre	20.0	1084	14.64
Alumínio de grau EC	61.0	657	12.12
Liga de alumínio 5005	53.5	652	12.41
Liga de alumínio 6201	52.5	654	12.47
Fio de aço revestido por alumínio	20.3	657	17.20
Aço 1020	10.8	1510	15.95
Elétrodo de aço inoxidável	9.8	1400	14.72
Elétrodo de aço revestido a Zinco	8.6	419	28.96
Aço inoxidável 304	2.4	1400	30.05

Os condutores do sistema de terra, devem ser escolhidos e dimensionados de modo a que ao longo do tempo de vida esperada da instalação, sejam capazes de [1]:

- Ter condutividade suficiente, por forma não contribuir substancialmente para diferenças de tensão locais, ao longo do condutor.
- Resistir à fusão e à deterioração mecânica sob condição mais desfavorável da intensidade e duração de uma corrente de defeito.
- Ser mecanicamente fiável e resistente a elevadas temperaturas.
- Ser capaz de manter a sua função mesmo quando expostos à corrosão ou abusos físicos.

No dimensionamento da rede de terra a seção mínima considerada para os condutores de terra segundo [1] nunca será inferior a 67 mm^2 , devido à necessidade de garantir capacidade mecânica, corrosiva, condutividade e ainda uma garantia de segurança para duração de vida que a instalação é dimensionada.

O algoritmo vai ser implementado com a opção de usar as seções utilizadas pelas empresas portuguesas, como mostra a tabela 5.2. Pretende-se com isto adaptar o algoritmo às seções mínimas utilizadas por cada empresa, pois a nível económico compensa a aquisição de condutores com seção ligeiramente maior, mas que se adapte a todos os casos necessários, em vez de pequenas quantidades de condutor para várias seções.

Tabela 5.2 – Seção mínima dos condutores utilizados na rede de terra pelas empresas.

Empresa	Seção [mm^2]
EDP	95
REN	150

Na tabela 5.2, são apresentadas as seções mínimas utilizadas pela EDP e REN nas redes de terra. Aplicando o algoritmo a projetos destas empresas é possível selecionar a seção mínima dos condutores para a respetiva empresa. É importante salientar que a diferença de seção utilizada pelas duas empresas deve-se essencialmente à intensidade da corrente de defeito que os sistemas de terra estão sujeitos.

5.3. Resistência da Rede de Terra

A resistência de terra é fundamental para determinar um esboço da malha de terra e para caraterizar as necessidades que um determinado local pode requerer.

A resistência dependerá principalmente da área ocupada pela malha de terra, que é conhecido na fase inicial do dimensionamento. A aproximação a um limite inferior da resistência da malha de terra de uma subestação em solo uniforme, pode ser obtida considerando um prato metálico circular colocado sobre solo, traduzindo-se na equação (5.3) [2]:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \times \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (5.3)$$

Onde,

R_g é a resistência da malha de terra [Ω]

ρ é a resistividade do solo em [$\Omega \cdot m$];

A é área ocupada pela malha de terra [m^2].

O limite superior da resistência da malha de terra pode ser obtido adicionando-se um segundo termo à expressão anterior, ficando:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \times \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{\rho}{L_T} \quad (5.4)$$

Onde,

L_T é o comprimento total dos condutores enterrados [m].

A resistência da malha de terra vai ser calculada, recorrendo à equação expandida Sverak:

$$R_g = \rho \left[\frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (5.5)$$

Onde,

h é a profundidade da malha de terra [m].

A equação (5.5) é utilizada no algoritmo de otimização que é desenvolvido nesta dissertação, sendo também aplicada nos exemplos de dimensionamento de malhas de terra realizados em [1].

5.4. Estrutura do Algoritmo de Otimização

O algoritmo que a seguir é apresentado descreve a forma de otimizar as malhas de terra, garantindo os critérios de segurança através das tensões de passo e toque tolerável para uma pessoa com peso corporal de aproximadamente 70kg, dentro e imediatamente fora da subestação.

Na malha é considerado que os condutores estão igualmente espaçados, isto fará com que a tensão no centro de cada sub-malha irá aumentar do centro para o canto da rede. A taxa deste aumento dependerá do tamanho da rede, numero e localização dos elétrodos de terra, do espaçamento entre condutores paralelos, diâmetro e profundidade dos condutores e da resistividade e perfil do solo [1].

O processo de otimização desenvolvido no algoritmo é baseado num estudo realizado por Sverak, apresentado no anexo A.5.

Em seguida é apresentado por passos a estrutura do algoritmo de otimização desenvolvido nesta dissertação:

1º Passo - Dados: Neste passo é necessário fornecer ao algoritmo os dados que caracterizam o local, o tipo de defeito, o tipo de condutor da malha de terra e comprimento máximo dos elétrodos. As características a definir são:

- Comprimento da malha de terra [m];
- Largura da malha de terra [m];
- Corrente de defeito [A];
- Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$];
- Profundidade da malha [m];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície [m];
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície [$\Omega \cdot m$];
- Tempo de duração do defeito [s];

- Razão entre a reactância e a resistência da rede para montante, X/R ;
- Escolha do tipo de material condutor a utilizar na malha de terra;
- Escolha da seção mínima dos condutores [mm^2];
- Frequência do sistema elétrico [Hz];
- Resistência elétrica do cabo guarda [Ω/km];
- Número de apoios com ligação à terra, numa distância máxima de 1500 metros;
- Resistência à terra nos apoios onde é ligado cabo de guarda à terra [Ω];
- Número de cabos de guarda que são ligados à malha de terra;
- Comprimento máximo dos elétrodos de terra [m].

2º Cálculo da Seção do Condutor: O cálculo da seção a utilizar é realizado de acordo com o referido no capítulo 5.2, utilizando a equação (5.1). O cálculo do diâmetro dos condutores é obtido através da equação (5.2).

3º Passo - Cálculo da Tensão Toque e Passo Tolerável: O cálculo das tensões toleráveis de passo e toque é obtido com base nas equações (3.21) e (3.22), respetivamente.

4º Passo - Cálculo da Resistência da Malha de Terra: O cálculo da resistência da malha de terra é obtido através da equação (5.5).

5º Passo - Cálculo da Corrente na Malha: O cálculo da corrente na malha de terra é obtido pela equação (2.8).

6º Passo - Cálculo do Potencial da Malha: Neste passo calcula-se aumento do potencial da malha de terra, através da equação (3.2).

Se o potencial da malha for inferior à tensão de toque tolerável, passa-se para o passo 14.

No caso do aumento do potencial da malha de terra for superior à tensão de toque tolerável passa-se ao passo seguinte.

7º Passo - Cálculo da Tensão Máxima Malha (E_m) e da Tensão Máxima de Passo (E_s): O cálculo da tensão máxima da malha e de passo é efetuado tendo em conta o método proposto por [1], ou seja utilizando as formulas simplificadas.

Cálculo da Tensão Máxima da Malha (E_m)

Nas redes em que os condutores estão igualmente espaçados, a tensão na malha aumentará ao longo das sub-malhas, do centro para os cantos da rede. A tensão de contato corresponde à diferença de potencial entre a elevação do potencial de terra e o potencial à superfície onde uma pessoa tem os pés, enquanto ao mesmo tempo toca com uma das mãos

numa estrutura que está ligada à rede de terra. A tensão da malha é a máxima tensão de contato na quadrícula mais afastada da malha formada por uma rede de terra [2].

A tensão da malha é obtida segundo [1] como produto do fator geométrico K_m , pelo fator de correção K_i , pela resistividade do solo ρ , e pela corrente por unidade de comprimento do condutor enterrado da rede terra (I_G/L_M), como mostra a seguinte equação:

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_M} \quad (5.6)$$

Onde,

E_m é tensão máxima da malha [V];

ρ é a resistividade do solo [$\Omega.m$];

I_G é a corrente máxima que flui para malha terra [A];

L_M é o comprimento total de condutores enterrados, incluindo ligações entre condutores e também elétrodos de terra [m];

K_m é fator geométrico da malha definido para “n” condutores paralelos;

K_i é fator de correção para traduzir a irregularidade da corrente.

A relação entre K_m e E_m depende em grande medida da relação entre a densidade de corrente na periferia dos condutores e a densidade de corrente nos condutores interiores. Para refletir este efeito da densidade de corrente e corrigir algumas deficiências que traduz K_m , Sverak juntou os termos K_{ii} e K_h [2]. A equação (5.7) mostra como K_m é determinado:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \times \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \times h \times d} + \frac{(D + 2 \times h)^2}{8 \times D \times d} - \frac{h}{4 \times d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \times \ln \left[\frac{8}{\pi(2 \times n - 1)} \right] \right] \quad (5.7)$$

Onde,

D é o espaçamento entre condutores paralelos [m];

n é o fator geométrico da malha de terra;

K_{ii} é o fator de correção que ajusta os efeitos dos condutores interiores no canto da malha.

Nas malhas de terra onde são considerados elétrodos de terra ao longo do seu perímetro, nos cantos, ou no perímetro e ao longo de toda área da malha $K_{ii} = 1$, enquanto que para malhas sem elétrodos de terra ou redes com apenas alguns elétrodos de terra, nenhum localizado nos cantos ou no perímetro.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}} \quad (5.8)$$

A equação E_m , está inicialmente limitada a malhas quadradas, devido a necessidade de utilizar outras formas geométricas foi desenvolvido métodos de cálculo que as contabilizam.

Usando quatro componentes da forma da rede, que foram desenvolvidos por Thapar, Gerez, Balakrishnan e Blank [14], é possível determinar o número de condutores em paralelo, n , através da equação (5.9):

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (5.9)$$

Onde,

$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_p} \quad (5.10)$$

$n_b = 1$, para redes quadradas;

$n_c = 1$, para redes quadradas e retangulares;

$n_d = 1$, para redes quadradas, retangulares e em forma de L.

Caso contrário, deve-se utilizar as seguintes equações:

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}} \quad (5.11)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}} \quad (5.12)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (5.13)$$

Onde,

L_c é comprimento total dos condutores da malha terra [m];

L_p é perímetro da malha de terra [m];

A é a área total da malha de terra [m²];

L_x é comprimento máximo da malha de terra na direção do eixo do "x" [m];

L_y é comprimento máximo da malha de terra na direção do eixo do "y" [m];

D_m é a distância máxima entre quaisquer dois pontos da malha de terra [m].

O fator K_h , representa um fator de ponderação corretiva que salienta os efeitos da profundidade da malha e é dado por:

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (5.14)$$

Onde, $h_0 = 1m$, é a profundidade de referência.

Por causa das estimativas feitas na dedução de K_m , é necessário introduzir uma compensação pelo facto de o modelo matemático para n condutores em paralelo não

representar na globalidade os efeitos geométricos da rede [2]. Sendo assim, K_i irá traduzir um fator de correção relativamente à irregularidade da corrente que é apresentado na equação (5.15):

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n \quad (5.15)$$

Nas malhas de terra sem elétrodos de terra ou redes com apenas alguns elétrodos de terra, nenhum localizado nos cantos ou no perímetro, o comprimento efetivo dos condutores enterrados L_M , é dado pela equação (5.16):

$$L_M = L_C + L_R \quad (5.16)$$

Onde,

L_C é comprimento total dos condutores na malha de terra [m];

L_R é o comprimento total de todos os elétrodos colocados na malha de terra [m].

Nas malhas de terra onde são considerados elétrodos de terra ao longo do seu perímetro, nos cantos, ou no perímetro e ao longo de toda área da malha, o comprimento efetivo dos condutores enterrados L_M , é dado pela equação (5.17):

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \times L_R \quad (5.17)$$

Onde,

L_r é o comprimento de cada eletrodo de terra [m].

Cálculo da Tensão Máxima de Passo (E_s)

O cálculo da tensão máxima de passo é obtido segundo [1], através do produto do fator geométrico K_s , pelo fator correção K_i , pela resistividade do solo ρ , e pela corrente por unidade de comprimento do condutor enterrado no sistema de terra (I_G/L_s), traduzindo-se na equação (5.18):

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s} \quad (5.18)$$

Onde,

E_s é a tensão máxima de passo [V];

K_s é fator geométrico da malha;

L_s é o comprimento do condutor efetivo enterrado [m].

A tensão de passo máxima obtida pela equação (5.18), considera uma distância de 1 metro entre os pés, começando no perímetro da malha e estendendo-se para lá deste, no canto mais extremo da malha. O fator geométrico K_s é obtido através da equação (5.19):

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times h} + \frac{1}{D + h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] \quad (5.19)$$

O comprimento efetivo dos condutores enterrados para as malhas de terra com ou sem elétrodos de terra é dado pela equação (5.20):

$$L_s = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R \quad (5.20)$$

A dedução das equações E_m e E_s é obtida considerando várias hipóteses simplificadoras. As equações são comparadas com resultados mais precisos calculados a partir de métodos computacionais mais complexos para malhas com diversas formas geométricas, tamanhos, número e comprimento dos elétrodos de terra, e conclui-se que fornecem uma precisão bastante aceitável, segundo [1].

8º Passo - Verificar se $E_m < E_{Tolerável_toque_70kg}$ e $E_s < E_{Tolerável_passo_70kg}$: Após efetuado os cálculos de E_m e E_s , é necessário verificar se estes valores são inferiores à tensão de toque e passo tolerável, respetivamente.

No caso de a condição $E_m < E_{Tolerável_toque_70kg}$ e $E_s < E_{Tolerável_passo_70kg}$, não for satisfeita, significa que a malha de terra não cumpre os critérios de segurança. Neste caso é necessário passar para passo 9 para que se modifique a estrutura da malha através de um processo de otimização.

No caso de a condição $E_m < E_{Tolerável_toque_70kg}$ e $E_s < E_{Tolerável_passo_70kg}$ for satisfeita, significa que a malha dimensionada cumpre os critérios de segurança. Neste caso passa-se para o passo 14 para otimizar a quantidade de condutor utilizado na malha.

9º Passo - Elétrodos: Neste passo pretende-se encaminhar o algoritmo quanto à sua otimização. No caso de ser considerado a possibilidade de inclusão de elétrodos na malha de terra passa-se para passo 10. No caso de no passo 1 não ter sido levando em conta a possibilidade de utilizar elétrodos o algoritmo passa para o passo 12.

10º Passo - Adicionar Elétrodos de Terra nos Cantos: Como no passo 8 os critérios de segurança não foram verificados, são colocados elétrodos nos cantos da malha e executa-se de novo os passos de 4 a 8. Se os critérios de segurança forem satisfeitos passa-se para passo 14. Caso não se tenha verificado as condições de segurança passa-se para passo 11.

11º Passo - Adicionar Eléttodos Terra no Perímetro da Malha: Como o passo 10 não foi suficiente para cumprir os critérios de segurança através da introdução de eléctrodos nos cantos da malha, vai efetuar-se a colocação de eléctrodos ao longo do perímetro da malha e executar os passos de 4 a 8. Se os critérios de segurança forem verificados passa-se para o passo 14. Caso não sejam cumpridas as condições de segurança passa-se para passo 12.

12º Passo - Diminuir D: Se não forem utilizados eléctrodos verticais ou a sua colocação ao longo do perímetro não for suficiente para que a tensão da malha e de passo sejam inferiores à tensão de toque e passo toleráveis, respetivamente. É necessário proceder a uma diminuição do espaçamento entre os condutores. A diminuição do espaçamento entre condutores é feito adicionando condutores, segundo o eixo do "x" e do "y".

O espaçamento é constante, quando $D_x = D_y$ isto acontece facilmente nas malhas quadradas. Em que D_x é o espaçamento entre condutores segundo a direção do eixo do "x" e D_y é o espaçamento entre condutores segundo a direção do eixo do "y". No caso de a malha ser quadrada é adicionado um condutor segundo cada eixo, continuando assim a manter-se um espaçamento constante.

Como forma de facilitar a otimização da malha de terra o eixo do "x" vai estar sempre associado ao lado da malha que tem maior comprimento e o "y" ao lado de menor comprimento.

No caso de uma malha retangular é adicionado um condutor segundo o eixo do "x" e de seguida é verificado se é necessário adicionar um condutor segundo a direção do eixo do "y". Esta verificação é feita recorrendo aos valores de D_x e D_y , verificando qual a situação que provoca menor erro:

$$|erro| = D_x - D_y \quad (5.21)$$

Em cada iteração é adicionado condutores à malha de terra e torna-se necessário voltar a realizar os passos de 4 a 8, quando os critérios de segurança forem cumpridos passa-se para passo 17. No caso de se atingir um valor de D menor que 2 metros passa-se para passo 13.

13ºPasso - Não é Possível obter um Dimensionamento Seguro: Neste passo é apresentada uma mensagem ao utilizador a informar que os dados considerados levam a uma situação que não é possível obter um dimensionamento válido. Esta impossibilidade deve-se ao facto da instalação da malha de terra requerer um espaçamento mínimo de 2 metros entre os condutores, para que seja possível abertura de valas para se instalar os condutores da malha [1].

14º Passo - Aumentar D: Neste passo pretende-se aumentar o espaçamento D , entre os condutores, para isso, procede-se à diminuição do número de condutores usados em paralelo na malha de terra. O aumento do espaçamento entre condutores é feito através da diminuição do número de condutores, segundo o eixo do "x" e do "y".

O espaçamento é constante entre os condutores quando $D_x = D_y$, isto acontece facilmente em malhas quadradas, retirando um condutor segundo cada eixo. A variável D_x é o espaçamento entre condutores segundo a direção do eixo do "x" e D_y é o espaçamento entre condutores segundo a direção do eixo do "y".

Como forma de facilitar a otimização da malha de terra o eixo do "x" vai estar sempre associado ao lado da malha que tem maior comprimento e o "y" ao lado de menor comprimento.

No caso de uma malha retangular é retirado um condutor segundo o eixo do "x" e de seguida é verificado se é necessário tirar um condutor segundo a direção do eixo do "y". Esta verificação é feita recorrendo aos valores de D_x e D_y , através da equação (5.21) que indica qual a situação que provoca menor erro.

O algoritmo pretende otimizar ao máximo o espaçamento entre os condutores para que este se traduza num benefício económico, sem que os critérios de segurança sejam postos em causa e garantindo um espaçamento constante entre os condutores ou o menor erro possível, caso a malha seja retangular.

Em cada iteração são retirados condutores da malha de terra e torna-se necessário voltar a realizar os passos de 4 a 8, para verificar se os critérios de segurança estão ser verificados. Quando o aumento do espaçamento entre condutores levar a valores que não cumpram os critérios de segurança as iterações vão parar e vai apresentar como a solução mais vantajosa a anterior, pois é a que apresenta menor número de condutores e é válida segundo os critérios de segurança.

15 º Passo - Eléttodos: Neste passo pretende-se determinar se a malha otimizada contém eléctrodos verticais, nesse caso passa-se para passo 16. No caso de a malha otimizada não conter eléctrodos passa-se para o passo 17.

16 º Passo - Otimizar o Comprimento dos Eléttodos: Após concluída a otimização do espaçamento entre condutores da malha de terra e caso a malha apresente eléctrodos de terra vai-se proceder à sua otimização, que consiste em cada iteração diminuir 0,5 metros ao comprimento de cada eléctrodo. Em cada iteração é necessário executar novamente os passos 4 a 8, para verificar se os critérios de segurança estão ser verificados. Quando a diminuição do comprimento dos eléctrodos levar a valores que não cumpram os critérios de segurança as

iterações vão parar e vai apresentar como solução mais vantajosa a obtida pela iteração anterior.

Em qualquer hipótese o comprimento dos elétrodos nunca irá ser inferior a 2 metros, devido a ser um limite mínimo imposto pelo regulamento de segurança de subestações e postos de transformação e de seccionamento, utilizado em Portugal [13].

Após concluído todo o processo de otimização dos elétrodos a utilizar na malha de terra passa-se para passo 17.

17 ° Passo - Apresentação da Malha final Otimizada: Após efetuada a otimização da malha através dos passos descritos anteriormente são apresentados os resultados finais:

- Tensão toque tolerável $[V]$;
- Tensão passo tolerável $[V]$;
- Tensão da malha $[V]$;
- Tensão de passo $[V]$;
- Resistência da malha de terra $[\Omega]$;
- GPR $[V]$;
- Corrente na malha de terra $[A]$;
- Espaçamento dos condutores segundo eixo do "x" e do "y", D_x e D_y respetivamente $[m]$;
- Número de elétrodos utilizado;
- Comprimento de cada eletrodo $[m]$;
- Seção dos condutores $[mm^2]$;
- Comprimento total dos condutores $[m]$.

Após concluído o dimensionamento da malha de terra, é necessário adicionar mais condutores e elétrodos de terra verticais. Os condutores adicionais são necessários para ligar os equipamentos à malha terra. Os elétrodos de terra verticais, são necessários na base de descarregadores de sobretensão, neutros dos transformadores, etc. O dimensionamento final deve ser sempre revisto para eliminar riscos decorrentes de potenciais de transferência e riscos associados com áreas de preocupação especial [1].

Em seguida é apresentado o fluxograma do algoritmo de otimização, em cada bloco está identificado o passo que está a decorrer:

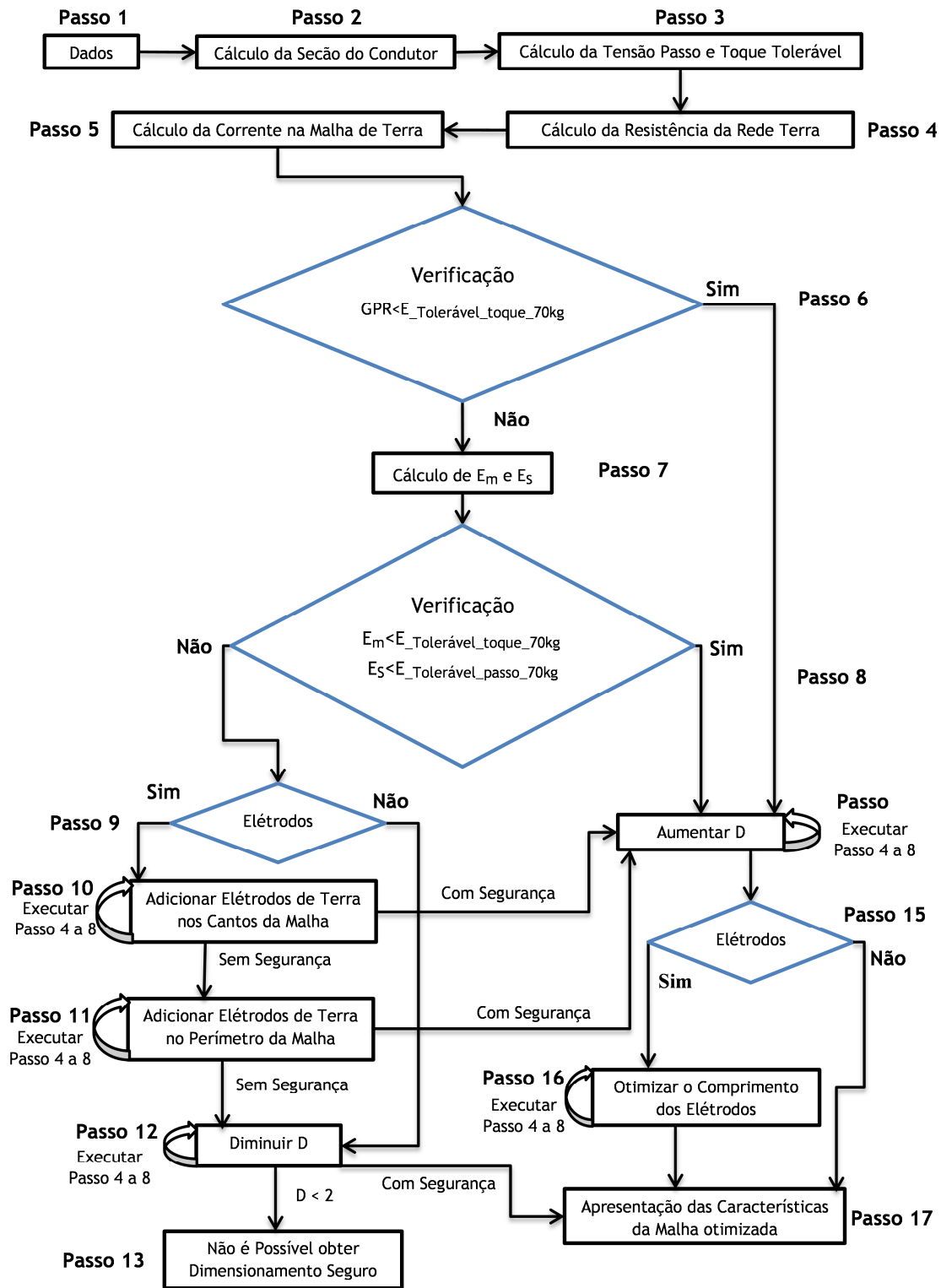


Figura 5.1 - Fluxograma do algoritmo de otimização.

5.5. Considerações e Limitações do Algoritmo

O algoritmo desenvolvido ao longo deste capítulo é realizado utilizando algumas considerações que são indicadas em seguida:

- Corrente que percorre a malha de terra é uniforme;
- Tempo de duração do defeito é igual ao tempo de contato;
- Espaçamento constante entre os condutores da malha;
- Não é calculado o potencial à superfície do solo, é considerado que a sub-malha do canto corresponde à pior situação possível, sendo utilizada para o cálculo da tensão máxima da malha e de passo E_m e E_s , respectivamente;
- É considerado a utilização de solo uniforme;
- É considerado no cálculo das tensões toleráveis um peso corporal de $70kg$;
- São utilizadas equações simplificadas e fatores que permitem a sua utilização em malhas com várias formas geométricas.

Algumas das considerações utilizadas tem efeito de medidas conservadoras, ou seja permitem penalizar o dimensionamento a favor da segurança. É o caso do tempo de duração do defeito ao ser considerado igual ao tempo de contato.

A utilização de algoritmos mais complexos e precisos no dimensionamento das redes de terra pode ser útil quando [1]:

- Os parâmetros excedem as limitações das equações;
- Existem variações significativas na resistividade do solo, que levam a preferir um modelo de solo de duas camadas ou de multicamadas;
- É necessário contabilizar a utilização de condutores espaçados de forma irregular;
- É necessário mais flexibilidade na determinação de possíveis locais de perigo;
- Existe a presença de estruturas metálicas enterradas ou condutores que não estão ligados ao sistema de terra, o que introduz uma complexidade ao sistema.

Capítulo 6

Validação do Algoritmo de Otimização

Após a implementação do algoritmo de otimização apresentado no capítulo anterior, torna-se necessário verificar a sua validade, para isso recorre-se aos exemplos apresentados pelo IEEE Std 80 no anexo B. Os exemplos B.1, B.2 e B.3 de [1], estão validados por algoritmos computacionais mais complexos e utilizam as formas simplificadas que também são utilizadas pelo algoritmo de otimização desenvolvido no capítulo 5.

Ao longo da dissertação a abreviatura PORT (Programa de Otimização de Redes de Terra) pretende-se referir à sua interface gráfica do algoritmo de otimização.

O processo de validação vai consistir em aplicar cada um dos exemplos do IEEE Std 80 no PORT e analisar o dimensionamento e otimização realizado.

Os exemplos que vão ser utilizados baseiam-se nos seguintes dados:

- Comprimento da malha da terra: 70 [m];
- Largura da malha de terra: 70 [m];
- Profundidade da malha de terra: 0,5 [m];
- Seção mínima dos condutores da malha: 67 [mm²];
- Tempo de duração de defeito: 0,5 [s];
- Frequência: 50 [Hz];
- Resistividade do solo: 400 [$\Omega \cdot m$];
- Corrente de defeito: 3180 [A];
- Relação X/R : 3,33;
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície (Gravilha): 2500 [$\Omega \cdot m$];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície: 0,102 [m];
- Tipo condutor utilizado: Cobre rígido;
- Fator de divisão de corrente: 0,6.

O fator de divisão de corrente foi adaptado, como mostra a figura 3.5 e a equação (2.3), para que durante o processo de otimização da rede de terra, seja atualizado em função da variação da resistência da malha de terra, sendo considerado os seguintes parâmetros:

- Resistência elétrica: 0,292 [Ω/km];
- Número de apoios (em 1,5 km): 5;
- Número de cabos de guarda: 2;
- Resistência à terra nos apoios: 795 [Ω].

Em seguida são abordadas três situações específicas para análise da validade do algoritmo desenvolvido. O caso 1 corresponde ao exemplo B1, o caso 2 ao exemplo B2 e o caso 3 ao exemplo B3 do anexo B de [1]. Em cada caso são exploradas diferentes estruturas ou variáveis da malha de terra.

6.1 Caso 1

Neste exemplo é considerado que não são utilizados elétrodos verticais. Introduzindo os dados enunciados anteriormente no PORT obtêm-se os valores apresentados na tabela 6.1, onde é possível fazer uma comparação com os valores obtidos pelo exemplo B.1 do anexo B de [1].

Tabela 6.1 – Valores retirados de [1] e do PORT que representam o caso 1.

	[1]	PORT
Tensão de Toque Tolerável [V]	838,2	840,5
Tensão de Passo Tolerável [V]	2686,6	2696,1
Resistência da Malha, R_g [Ω]	2,78	2,71
GPR [V]	5304	5275,43
Tensão da Malha, E_m [V]	1002,1	814,9
Tensão de Passo, E_S [V]	609,7	623,6
D_x [m]	7	5
D_y [m]	7	5
Seção [mm^2]	67	67
Número de Elétrodos	0	0
Comprimento dos Elétrodos [m]	0	0
Condutor Utilizado [m]	1540	2100
Estado da Malha	Insegura	Segura

Analisando a tensão de toque e de passo toleráveis devia-se obter no PORT valores iguais aos de [1], devido aos critérios de segurança utilizados serem os mesmos. Na tabela 6.1, verifica-se uma ligeira diferença devido às aproximações utilizadas por [1] em cálculos intermédios. Conclui-se que os valores obtidos no PORT são bastante aproximados, confirmando assim a validação dos critérios de segurança impostos pela tensão tolerável.

Os critérios de segurança definidos pelo IEEE Std. 80 indicam que no caso do *GPR* ser inferior à tensão de toque tolerável, a malha de terra é segura. Analisando a tabela 6.1, verifica-se que esta condição não acontece e perante esta situação é necessário que a tensão máxima da malha e de passo sejam inferiores à tensão tolerável de toque e passo, respetivamente.

Através dos valores obtidos em [1], verifica-se que a malha de terra não é segura pois a tensão da malha é superior à tensão de toque tolerável, levando a concluir que os critérios de segurança não são satisfeitos.

Os valores apresentados pelo PORT indicam que a malha de terra é segura, mas facilmente se verifica que apresenta algumas diferenças na sua estrutura principalmente a nível do espaçamento entre condutores que passou dos 7 para os 5 metros, levando assim ao aumento da quantidade de condutor.

A malha de terra dimensionada pelo PORT fica segura com um acréscimo de 560 metros de condutor, o que leva à diminuição da resistência da malha, como se pode verificar pela equação (5.5) e consequentemente o *GPR* diminui.

Analisando o processo de otimização, verifica-se que o PORT devido à insegurança que o exemplo de [1] apresentava necessitou de otimizar o espaçamento dos condutores da malha até que fosse possível obter uma tensão da malha inferior à tensão de toque tolerável. Como pode ser verificado na equação (5.7), a diminuição do espaçamento leva a uma diminuição de K_m , enquanto o L_M aumenta. A mudança destas variáveis é provocada pela nova estrutura da malha de terra que leva a equação (5.6) a obter uma tensão da malha inferior à de [1]. Através do processo de otimização pretende-se cumprir os critérios de segurança e utilizar a menor quantidade possível de condutor.

A tensão máxima de passo aumenta devido à diminuição do espaçamento entre os condutores, analisando a equação (5.19) verifica-se que diminuindo D o valor de K_s aumenta. A diminuição do espaçamento entre condutores leva à diminuição da resistência da malha de terra e ao aumento do fator de divisão de corrente, permitindo assim aumentar o fluxo de corrente que flui para malha de terra. Esta modificação das variáveis leva a equação (5.18) a obter uma tensão de passo ligeiramente superior à de [1], mas bastante inferior à tensão de passo tolerável pelo corpo humano.

A validação do algoritmo de otimização neste exemplo é justificada com o aumento da quantidade de condutor através da diminuição do espaçamento entre condutores e consequente diminuição da tensão da malha. Apesar do dimensionamento das redes de terra não ser um processo linear é possível encontrar nos métodos de cálculo implementados no algoritmo, justificação para resultados obtidos.

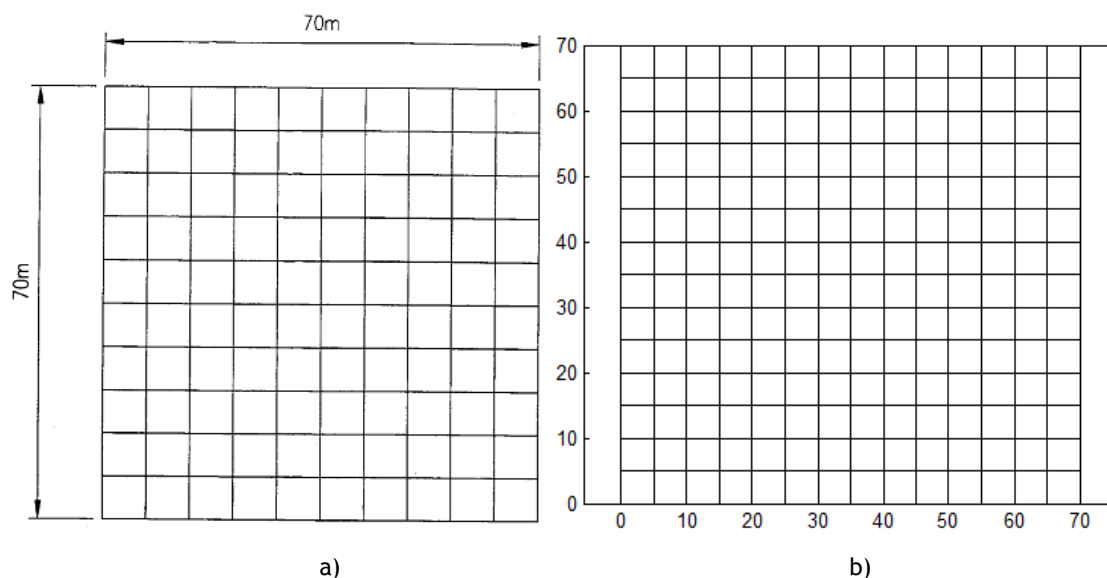


Figura 6.1 - Malha obtida em a) por [1] e em b) pelo PORT, para caso 1.

As duas malhas representadas na figura 6.1 em a) a malha dimensionada por [1], na qual não são assegurados os critérios de segurança e em b) a malha obtida através do PORT onde são verificados os critérios de segurança. Analisando a figura 6.1, facilmente se verifica que a malha dimensionada pelo PORT apresenta maior quantidade de condutor e consequente uma diminuição do tamanho das quadrículas.

6.2 Caso 2

Neste exemplo pretende-se continuar avaliar a validade do algoritmo implementado no PORT, incluindo agora uma nova variável no processo de otimização, o uso de eléktodos verticais.

Os dados utilizados apenas diferem do exemplo anterior devido à consideração do uso de eléktodos verticais até um comprimento máximo de 7,5 metros. Na tabela 6.2, é possível fazer uma comparação dos valores obtidos pelo PORT e pelo exemplo B.2 do anexo B de [1].

Analisando a tabela 6.2 verifica-se que os resultados obtidos pelo PORT levam a obter uma malha segura com menor quantidade de condutor que a malha obtida por [1].

A tensão tolerável de passo e toque apresenta valores iguais aos do caso 1, porque as variáveis que são utilizadas para no seu cálculo, nomeadamente tempo de duração do defeito, resistividade do solo, e a espessura e resistividade da camada protetora mantém os mesmos valores.

Ao considerar a utilização de eléktodos o PORT tira proveito desse facto para aumentar o espaçamento entre os condutores, otimizar o comprimento dos eléktodos e assim diminuir a quantidade de condutor necessário para garantir os critérios de segurança. Na tabela 6.2

verifica-se que apesar da consideração de elétrodos verticais de 7,5 metros, o PORT conseguiu otimizar o seu comprimento para 6,5 metros.

Analisando o processo de otimização, sabendo que o canto da malha é o local onde surgem potenciais mais elevados, o algoritmo tira partido dessa situação para adicionar elétrodos verticais ao longo do perímetro. A colocação de elétrodos ao longo do perímetro, permite aumentar o espaçamento entre os condutores da malha e assim diminuir a quantidade de condutor. O estudo realizado por Sverak, no anexo A.5 mostra a influência que uma boa colocação de elétrodos verticais ao longo do perímetro tem no potencial das sub-malhas.

Tabela 6.2 – Valores retirados de [1] e do PORT que representam o caso 2.

	[1]	PORT
Tensão de Toque Tolerável [V]	838,2	840,5
Tensão de Passo Tolerável [V]	2686,6	2696,1
Resistência da Malha, R_g [Ω]	2,75	2,79
GPR [V]	5247	5371,2
Tensão da Malha, E_m [V]	747,4	837,37
Tensão de Passo, E_S [V]	548,9	527,7
D_x [m]	7	8,75
D_y [m]	7	8,75
Seção [mm^2]	67	67
Número de Elétrodos	20	32
Comprimento dos Elétrodos [m]	7,5	6,5
Condutor Utilizado [m]	1690	1468
Estado da Malha	Segura	Segura

A diminuição da quantidade de condutor a utilizar leva a um ligeiro aumento da resistência da malha de terra e consequentemente um aumento do GPR . Com o aumento do espaçamento verifica-se que o valor de K_m obtido pela equação (5.7) aumenta e o L_M diminui. A alteração das variáveis devido à nova estrutura da malha de terra leva a equação (5.6) a obter uma tensão da malha superior à de [1].

A tensão máxima de passo diminui devido ao aumento do espaçamento entre condutores, analisando a equação (5.19) verifica-se que o aumento de D leva o K_S a diminuir. E como foi referido anteriormente a resistência da malha de terra aumentou, o que permite levar à diminuição do fator de divisão de corrente e consequente diminuição da corrente que flui pela malha de terra. Esta modificação das variáveis leva a equação (5.18) a obter uma tensão de passo ligeiramente inferior à de [1].

Os resultados obtidos pelo PORT são validos devido apresentarem coerência com os valores obtidos em [1] e o processo de otimização ser justificado pelos métodos de cálculo e considerações utilizadas pelo algoritmo.

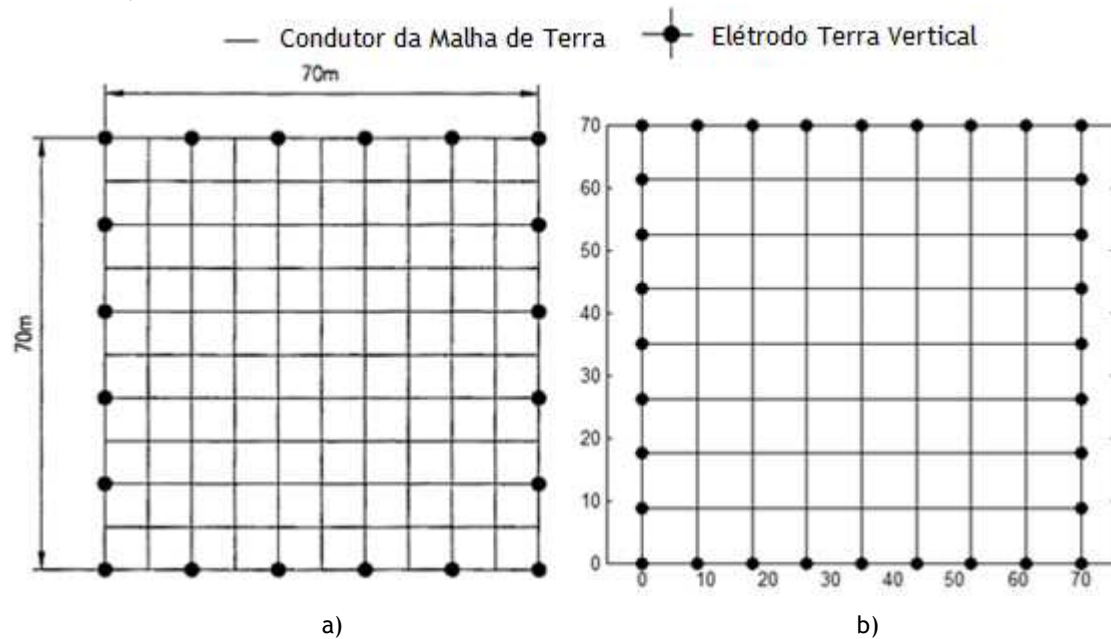


Figura 6.2 - Malha obtida em a) por [1] e em b) pelo PORT, para caso 2.

A figura 6.2 apresenta duas malhas de terra dimensionadas e validadas pelos critérios de segurança impostos pelo IEEE Std 80. A malha obtida pelo PORT está otimizada e facilmente se verifica que tem mais eléetrodos verticais e quadrículas maiores. Esta diferença estrutural permitiu obter uma malha com menor quantidade de condutor.

6.3 Caso 3

Neste exemplo pretende-se continuar analisar a validade do algoritmo implementando no PORT, recorrendo a uma malha com forma geométrica diferente da utilizada nos casos anteriores.

Os dados utilizados neste exemplo são os apresentados no início do capítulo com a exceção dos seguintes:

- Comprimento da malha de terra: 84 [m];
- Largura da malha de terra: 63 [m];
- Comprimento máximo dos eléetrodos verticais: 10 [m].

Na tabela 6.3 é apresentado os valores obtidos pelo PORT e pelo exemplo B.3 do anexo B de [1].

Tabela 6.3 – Valores retirados de [1] e do PORT que representam o caso 3.

	[1]	PORT
Tensão de Toque Tolerável [V]	838,2	840,5
Tensão de Passo Tolerável [V]	2686,6	2696,1
Resistência da Malha, R_g [Ω]	2,62	2,70
GPR [V]	4998,96	5269,15
Tensão da Malha, E_m [V]	595,8	830,18
Tensão de Passo, E_s [V]	522,3	483,01
D_x [m]	7	10,5
D_y [m]	7	10,5
Seção [mm^2]	67	67
Número de Elétrodos	38	28
Comprimento dos Elétrodos [m]	10	10
Condutor Utilizado [m]	2039	1435
Estado da Malha	Segura	Segura

O principal objetivo deste caso 3 é verificar se o processo de otimização continua a ser válido quando se aplica no PORT uma malha com forma geometria retangular.

O exemplo B.3 do anexo B de [1] aplicado no PORT levou a uma diminuição de 604 metros de condutor ou seja, aproximadamente 29,6% do condutor utilizado por [1].

O critério de segurança definido pela tensão tolerável de passo e toque, equações (3.21) e (3.22) respetivamente, mantém-se igual aos casos anteriores devido às variáveis utilizadas pelas equações não serem alteradas.

Analisando a tabela 6.3 verifica-se que os valores da tensão da malha e da tensão de passo são inferiores à tensão de toque e de passo tolerável, respetivamente. Isto permite concluir que a malha está dimensionada com segurança. O processo de otimização utilizado pelo PORT procede ao aumento do espaçamento entre os condutores da malha de terra e a uma diminuição do número de elétrodos, como se pode verificar pela figura 6.3.

A otimização realizada diminui a quantidade de condutor levando ao aumento da resistência da malha de terra e consequentemente do GPR . Como já foi verificado no caso 2, este aumento do espaçamento entre condutores leva ao aumento da tensão da malha e diminuição da tensão de passo. O PORT ao realizar o processo de otimização aproximou a tensão da malha da tensão de toque tolerável, permitindo assim beneficiar de uma malha mais económica, continuando a garantir os critérios de segurança.

Os resultados obtidos mostram coerência com os métodos de cálculo implementados e com as considerações utilizadas pelo algoritmo de otimização. A malha dimensionada por [1]

apresenta valores da tensão da malha e de passo bastante inferiores aos toleráveis, dando a ideia que está sobredimensionada.

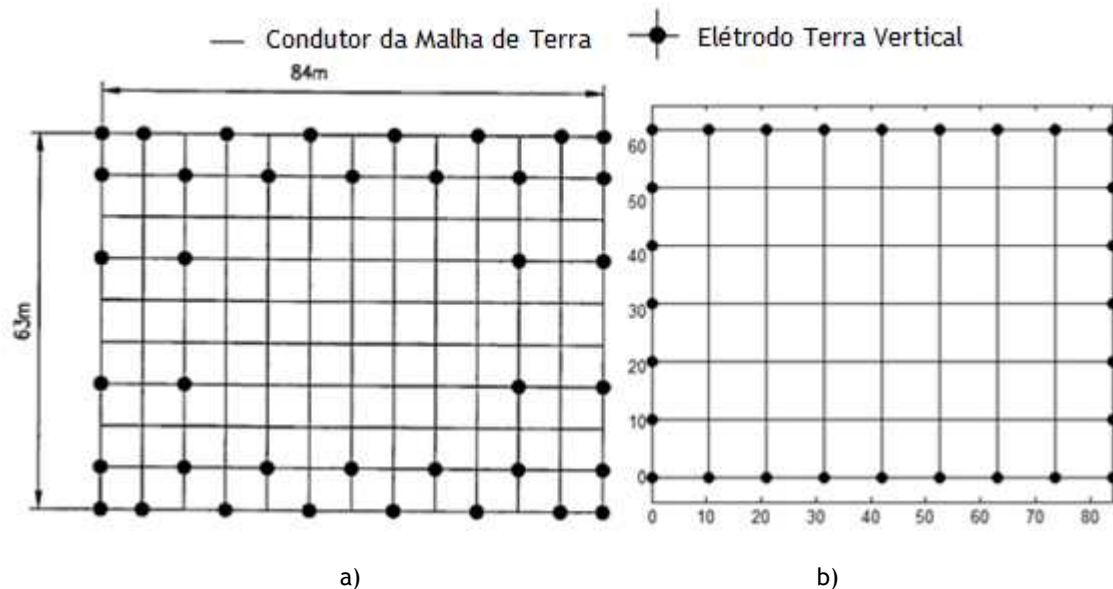


Figura 6.3 - Malha obtida em a) por [1] e em b) pelo PORT, para caso 3.

Comparando na figura 6.3, a) e b) consegue-se verificar facilmente a otimização efetuada pelo PORT no aumento do espaçamento entre os condutores e na diminuição do número de eléttodos.

6.4 Conclusão

Os resultados obtidos em [1] são muito próximos dos obtidos pelo PORT, principalmente na tensão de toque e passo tolerável, porque não dependem da disposição dos condutores na malha de terra. No entanto, foi possível verificar ao longo do capítulo que por vezes existem ligeiras variações nos resultados obtidos entre [1] e o PORT, principalmente quando a estrutura da malha sofre grandes alterações devido ao processo de otimização, mesmo assim os resultados obtidos apresentam coerência com os métodos matemáticos implementados e com as considerações utilizadas.

No caso 1, conseguiu-se através do PORT passar de uma malha de terra insegura para uma malha de terra segura, através do aumento da quantidade de condutor obtido pela diminuição do espaçamento entre os condutores da malha.

No caso 2 e 3 partindo de malhas de terra seguras foi possível com a utilização do PORT obter uma diminuição da quantidade de condutor, através da otimização do espaçamento e dos eléttodos utilizados na malha de terra.

Capítulo 7

Aplicação do Algoritmo

Este capítulo tem como objetivo aplicar o algoritmo desenvolvido no capítulo 5 e analisar os resultados obtidos.

Numa primeira fase é realizado um estudo sobre a influência dos principais fatores utilizados no dimensionamento das malhas de terra na quantidade de condutor necessário para garantir os critérios de segurança e por fim é aplicado em projetos reais da EDP Distribuição.

7.1 Estudo de Sensibilidade

Neste seção pretende-se efetuar um estudo dos principais fatores que influenciam o dimensionamento e otimização de uma malha de terra, considerando como exemplo um projeto de redes de terra de uma subestação.

O estudo a seguir apresentado baseia-se nas seguintes características:

- Comprimento da malha da terra: 72 [m];
- Largura da malha de terra: 134 [m];
- Profundidade da malha de terra: 0,5 [m];
- Seção mínima dos condutores da malha: 95 [mm²];
- Tempo de duração do defeito: 0,5 [s];
- Frequência do sistema elétrico: 50 [Hz];
- Resistividade do solo: 150 [$\Omega \cdot m$];
- Corrente de defeito: 13000 [A];
- Relação X/R : 15;
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície (Gravilha): 2500 [$\Omega \cdot m$];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície: 0,102 [m];
- Comprimento máximo dos eletrodos de terra: 6 [m];
- Tipo condutor utilizado: Cobre Flexível;
- Resistência elétrica: 0,319 [Ω/km];

- Número de apoios (em 1,5 km): 5;
- Número de cabos de guarda: 2;
- Resistência à terra nos apoios: 50 [Ω].

Através da variação dos principais fatores utilizados no dimensionamento, pretende-se analisar e determinar o seu comportamento na otimização das malhas de terra, tendo como objetivo adquirir sensibilidade e compreender o seu comportamento.

Os principais fatores que condicionam o dimensionamento da malha de terra são:

- Corrente de defeito;
- Resistividade do solo;
- Profundidade da malha;
- Resistividade e espessura da camada protetora colocada à superfície;
- Duração do defeito;
- Dimensionamento da malha com ou sem elétrodos verticais.

Todos estes fatores são muito dependentes do local onde se pretende instalar a malha de terra, por isso torna-se fundamental que em cada caso seja devidamente estudado e dimensionado de acordo com as características do local.

O estudo do impacto que cada fator apresenta na quantidade de condutor a usar numa malha de terra é realizado variando individualmente cada um, para que seja possível obter um gráfico que traduza o seu comportamento. Os gráficos são obtidos através dos resultados fornecidos pelo PORT e mostram a influência que cada fator tem no dimensionamento e otimização de uma malha de terra, indicando a quantidade de condutor necessária para garantir os critérios de segurança.

7.1.1 Corrente de Defeito

O gráfico é obtido através da variação da corrente de defeito no PORT, entre os 4 e os 20kA, obtendo-se a seguinte figura 7.1 que representa a relação entre corrente de defeito e a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança da malha de terra.

O aumento da corrente de defeito leva a um aumento praticamente linear da quantidade de condutor. Este fator é extremamente relevante no dimensionamento da malha de terra, pois uma corrente de defeito de 4kA em comparação com 20kA leva uma diferença de 3985m na quantidade de condutor utilizado.

O gráfico da figura 7.1, mostra que é fundamental fazer uma análise realista do pior defeito que o sistema de terra pode estar sujeito. No caso de uma análise mal efetuada, vai levar a obter malhas de terra sobredimensionadas ou com falta de segurança, colocando as pessoas e equipamentos sobre o risco de elevados potenciais.

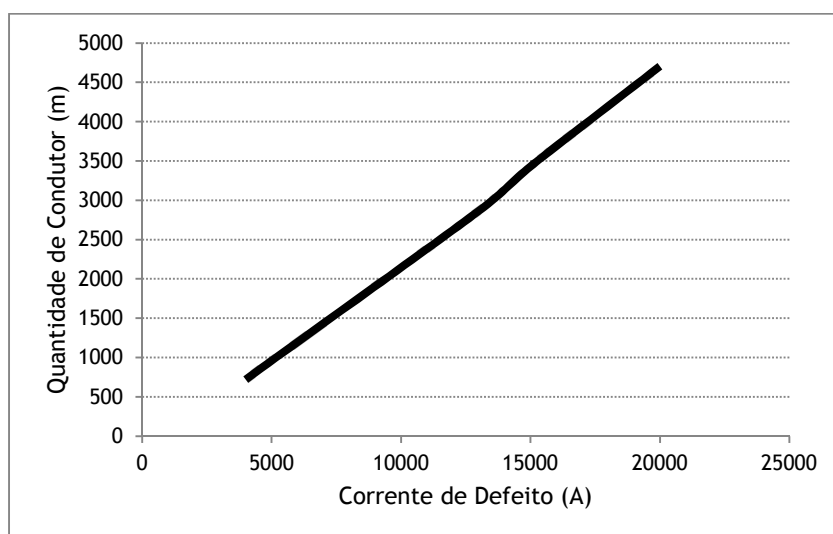


Figura 7.1 - Gráfico que representa a relação entre a corrente de defeito e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

7.1.2 Resistividade do Solo

O gráfico é obtido através da variação da resistividade do solo no PORT, entre os 100 e 500 $\Omega.m$, obtendo-se a figura 7.2 que representa a relação entre resistividade do solo e a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança da malha de terra.

Analisando a figura 7.2, verifica-se que o aumento a resistividade do solo leva ao aumento da quantidade de condutor utilizado na malha. A relação não é perfeitamente linear, porque a resistência da malha de terra aumenta com a resistividade do solo, levando a uma diminuição do fator de divisão de corrente. A corrente que flui pela malha de terra está diretamente relacionada com tensões máximas da malha e de passo, permitindo assim obter uma relação entre resistividade do solo e a quantidade de condutor utilizado na malha.

Entre os 100 e os 200 $\Omega.m$ existe um aumento mais acentuado na quantidade de condutor necessário para malha de terra, a partir dos 200 $\Omega.m$ a quantidade de condutor necessária para satisfazer os critérios de segurança adota um aumento linear com um declive menos acentuado que é influenciado pela diminuição do fator de divisão de corrente.

É importante salientar a diferença na quantidade de condutor utilizado na malha de terra quando se está perante um solo de 100 ou 500 $\Omega.m$, neste caso é de 3154m.

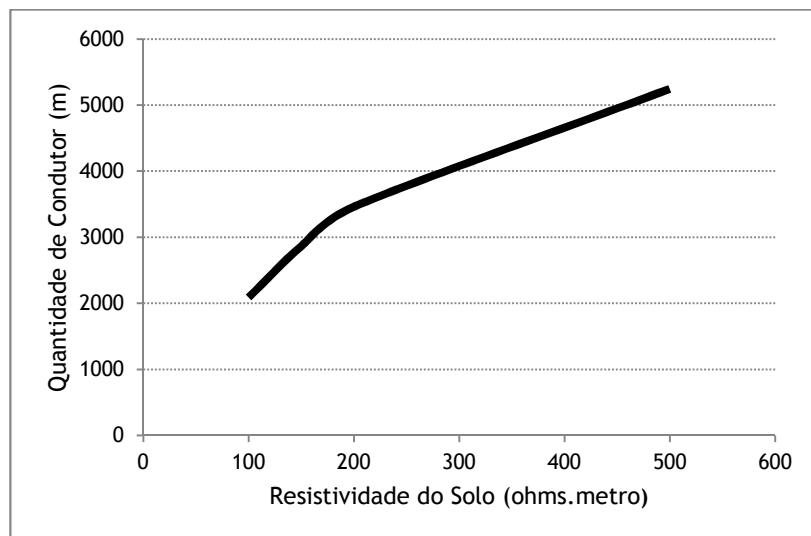


Figura 7.2 - Gráfico que representa a relação entre a resistividade do solo e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

7.1.3 Profundidade da Malha

O gráfico é obtido através da variação da profundidade da malha de terra no PORT, entre 0,5 e 1,5m, obtendo-se a figura 7.3 que representa a relação entre profundidade da malha de terra e a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança.

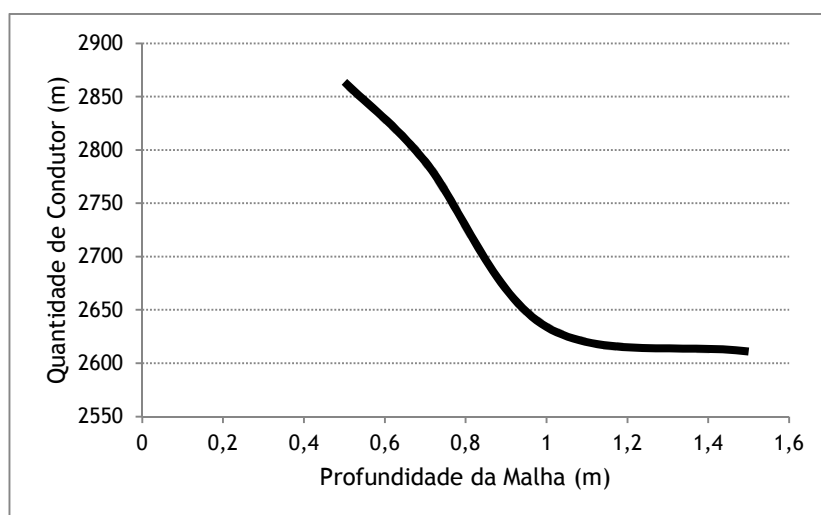


Figura 7.3 - Gráfico que representa a relação entre a profundidade a que é instalada a malha e a quantidade de condutor utilizado.

A figura 7.3 mostra que neste exemplo, a instalação de uma malha até 1 metro de profundidade diminui razoavelmente a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança. No entanto para profundidades superiores a 1 metro a diminuição do

condutor começa a tender para valores muito próximos dando a ideia que não se torna vantajoso colocar malhas de terra a uma profundidade superior.

A profundidade a que é colocada a malha de terra não apresenta um impacto muito elevado em comparação com outros fatores. Neste exemplo verifica-se que entre os 0,5 e 1,5m existe uma diminuição de apenas 253m na quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

7.1.4 Resistividade da Camada Protetora

O gráfico é obtido através variação da resistividade da camada protetora no PORT, entre 1500 e 4500 $\Omega.m$, obtendo-se a figura 7.4 que representa a relação entre a resistividade da camada protetora e a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança.

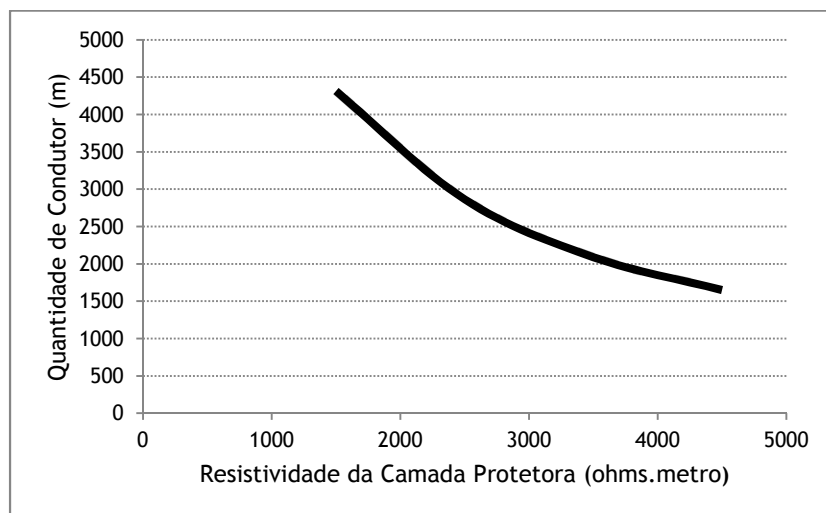


Figura 7.4 - Gráfico que representa a relação entre a resistividade da camada protetora e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

Analisando a figura 7.4, verifica-se que a utilização de uma camada protetora de 4500 $\Omega.m$ em vez de 1500 $\Omega.m$, permite diminuir 2664m na quantidade de condutor.

Analisando os resultados obtidos na figura 7.4, verifica-se que a utilização de materiais com elevada resistividade podem ser extremamente uteis para o processo de otimização das malhas de terra, devido a permitir aumentar as tensões toleráveis e consequentemente diminuir a quantidade de condutor necessário para malha de terra.

7.1.5 Espessura da Camada Protetora

O gráfico é obtido através variação da espessura da camada protetora no PORT, entre 0,05 e 0,2m, obtendo-se a figura 7.5 que representa a relação entre a espessura da camada protetora e a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança.

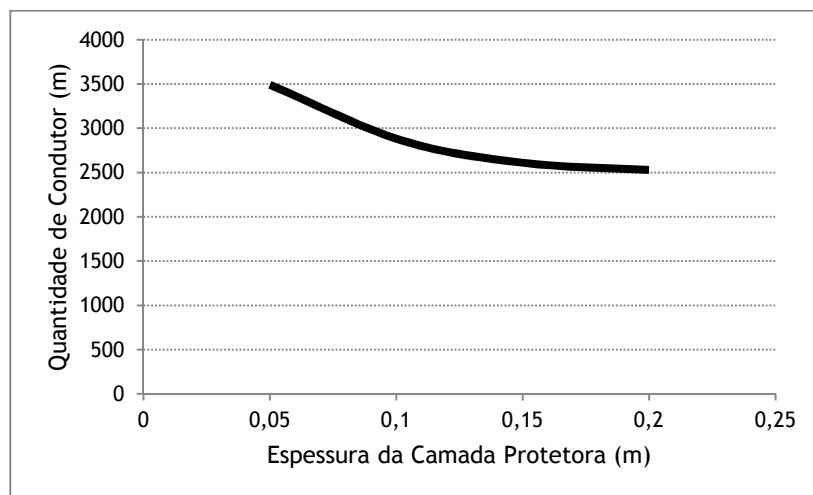


Figura 7.5 - Gráfico que representa a relação entre a espessura da camada protetora e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

A espessura da camada protetora colocada à superfície do solo não tem tanta influência como a resistividade. É possível verificar neste exemplo que existe uma diminuição razoável da quantidade de condutor entre os 0,05 e 0,15m. O aumento da espessura para valores superiores a 0,15m não tem grande impacto na diminuição da quantidade de condutor.

A figura 7.5, mostra que a utilização de uma camada protetora com uma espessura 0,2m em comparação com 0,05m é possível diminuir 964m de condutor.

7.1.6 Tempo de Duração do Defeito

O gráfico é obtido através variação do tempo de duração do defeito no PORT, entre 0,1s e os 3s, obtendo-se a figura 7.6 que representa a relação entre o tempo de duração do defeito e a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança.

Analisando a figura 7.6, facilmente se verifica que a duração do defeito tem uma elevada influência na quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

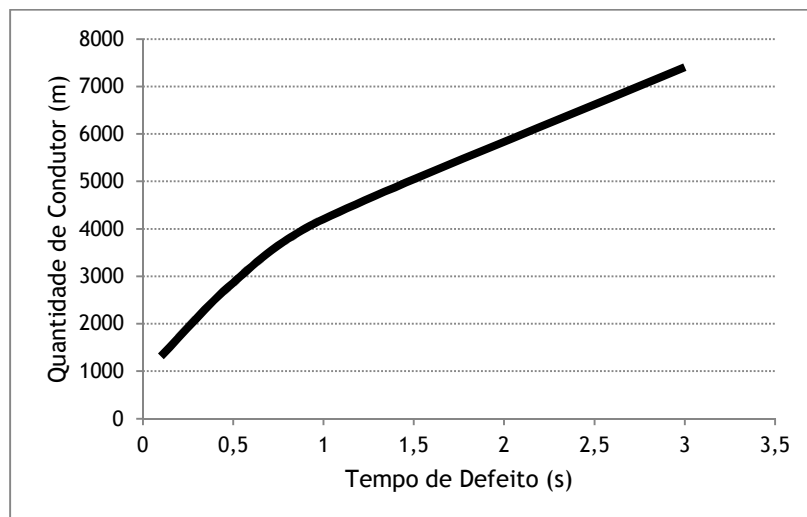


Figura 7.6 - Gráfico que representa a relação entre o tempo de duração do defeito e a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

As tensões toleráveis dadas pelas equações (3.21) e (3.22) são muito influenciadas pela duração do defeito, ou seja tempos de defeitos muito longos levam a tensões toleráveis mais baixas e conseqüentemente limitam o processo de otimização.

O tempo de defeito é dos fatores mais influentes no dimensionamento das malhas de terra e o uso de dispositivos de proteção com tempos de atuação bastante curtos favorece a otimização das malhas de terra. É possível verificar neste estudo a importância de ter proteções que eliminem os defeitos no menor tempo possível, pois um defeito com duração de 0,1s em comparação com um de 3s, leva a que seja necessário um aumento de 6094m de condutor.

7.1.7 Malha Com e Sem Elétrodos Verticais

Utilizando o caso base definido no capítulo 7.1 é feita uma comparação na tabela 7.1 dos resultados obtidos pelo PORT, não considerando a utilização de elétrodos e considerando a utilização de elétrodos com comprimento máximo de 6 metros.

Nas duas hipóteses o algoritmo de otimização garante que o dimensionamento é obtido com segurança. No entanto, quando são introduzidos elétrodos, a quantidade de condutor necessária para garantir os critérios de segurança diminui 1090 metros.

A consideração de um espaçamento constante e de um solo com resistividade uniforme leva a sub-malha do canto a corresponder ao local de potencial mais elevado, como pode ser verificado no estudo realizado por Sverak no anexo A.5. Adicionando elétrodos no perímetro da malha a tensão na sub-malha do canto diminui, tornando-se possível aumentar o espaçamento entre os condutores, como se verifica pela figura 7.7.

Tabela 7.1 – Resultados obtidos pelo PORT para malha de terra com e sem elétrodo.

	Com Elétrodo	Sem Elétrodo
Tensão de Toque Tolerável [V]	815,06	815,06
Tensão de Passo Tolerável [V]	2594,14	2594,14
Resistência da Malha, R_g [Ω]	0,73	0,71
GPR [V]	5945,7	5874,34
Corrente na Malha, I_G [A]	8170,4	8235,6
Tensão da Malha, E_m [V]	806,35	782,78
Tensão de Passo, E_S [V]	558,37	645,86
D_x [m]	8,38	5,15
D_y [m]	8	5,14
Seção [mm^2]	95	95
Número de Elétrodos	50	0
Comprimento dos Elétrodos [m]	6	0
Condutor Utilizado [m]	2864	3954
Estado da Malha	Segura	Segura

O uso de elétrodos mostra-se fundamental para otimizar as malhas de terra, pois a sua utilização ao longo do perímetro da malha permite aumentar o espaçamento dos condutores diminuindo consideravelmente a quantidade de condutor. A utilização de elétrodos nos locais de potencial mais elevado permite equilibrar a distribuição de potencial à superfície do solo, como é possível verificar pelo anexo A.5.

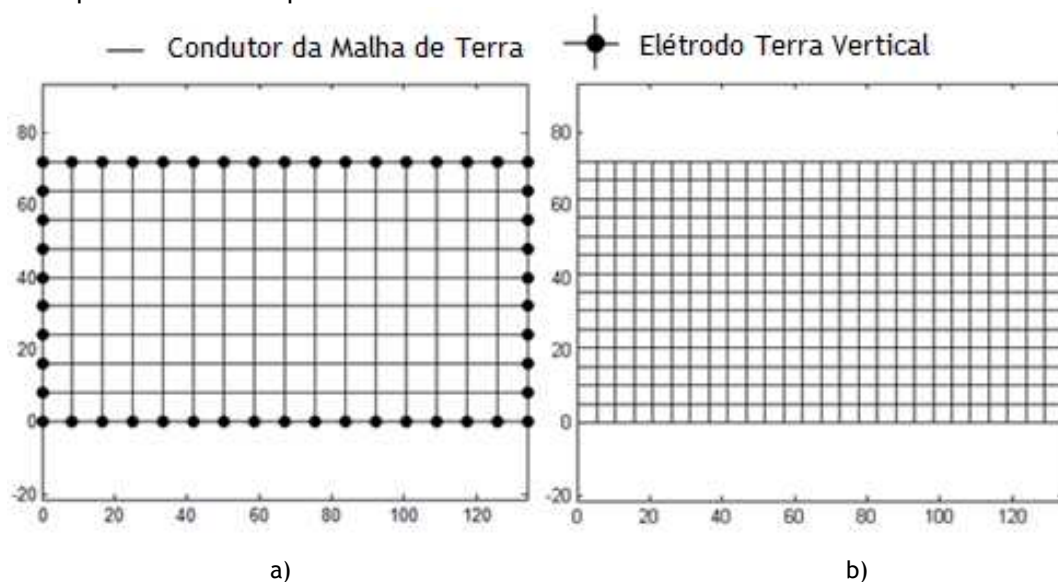


Figura 7.7 - Malha de terra com elétrodos em a) e sem elétrodos em b).

7.1.8 Tipo de Condutor

Partindo do caso base definido no capítulo 7.1, é utilizado o PORT para variar o tipo de condutor a utilizar no dimensionamento da malha de terra e verificar a quantidade de condutor necessário para assegurar os critérios de segurança, como mostra tabela 7.2.

Tabela 7.2 — Variação do material condutor utilizado na malha de terra.

Tipo de Material Utilizado	Seção [mm ²]	Condutor [m]
Cobre, Recozido e Flexível	95	2864
Cobre Rígido	95	2864
Fio Aço revestido a Cobre I	95	2864
Fio Aço revestido a Cobre II	95	2864
Eléctrodo de Aço revestido a Cobre	95	2864
Alumínio de Grau EC	95	2864
Liga de Alumínio 5005	95	2864
Liga de Alumínio 6201	95	2864
Fio Aço revestido Alumínio	95	2864
Aço 1020	95	2864
Eléctrodo de Aço Inoxidável	95	2864
Eléctrodo de Aço revestido a Zinco	135	2789
Aço Inoxidável 304	140	2789

Analisando a tabela 7.2 é possível verificar que a quantidade de condutor necessário para garantir os critérios de segurança é sempre igual com exceção de quando se utiliza Eléctrodo de Aço revestido a Zinco ou Aço Inoxidável 304. Este facto deve-se ao uso de uma seção mínima de 95mm² que é bastante superior ao obtido pela equação (5.1). Esta seção é utilizada pela EDP, devido à necessidade da rede de terra suportar esforços eletrodinâmicos, agressividade do solo e manter as suas propriedades inalteráveis para o período que o dimensionamento foi realizado.

A quantidade de condutor diminui ligeiramente com o aumento da seção, analisando a equação (5.1) e a tabela 5.1, facilmente se verifica que alterando o tipo de material a constante K_f toma outro valor, levando à alteração da seção e consequentemente do diâmetro dos condutores. A equação (5.7) depende do diâmetro dos condutores, logo a equação (5.6) que calcula a tensão da malha é modificada levando o processo de otimização a diminuir a quantidade de condutor necessária para a malha de terra.

É importante salientar, que a nível económico o tipo de material usado tem uma grande influência no custo da rede de terra. O ideal seria usar material condutor barato como é caso

do aço ou do alumínio quando comparado com cobre, mas a baixa condutividade e os problemas que podem surgir devido à agressividade do solo, levam a que seja raramente utilizado. O cobre surge como a opção mais utilizada devido a fiabilidade que garante à rede de terra para um elevado período de anos.

A tabela 7.2 mostra que sempre que for seguro usar materiais como Alumínio ou Aço é preferível, devido ao valor desses materiais no mercado ser mais baixo que o cobre, tornando-se assim benéfico a nível económico.

7.1.9 Conclusão

Analisando de uma forma global os vários fatores apresentados anteriormente e a tabela 7.3 é possível verificar que alguns apresentam maior impacto no dimensionamento e otimização da malha de terra que outros. A corrente de defeito, a resistividade do solo, a resistividade da camada protetora, a duração do defeito e o uso de elétrodos são os fatores que maior impacto impõe no dimensionamento da malha de terra. É fundamental que estes cinco fatores sejam avaliados com elevada precisão, pois a sua influência no dimensionamento é muito elevada.

Na tabela 7.3 é apresentada a quantidade adicional de condutor que é necessária para obter um dimensionamento seguro da malha de terra quando é realizado no PORT um aumento de um determinado fator de x para y .

Tabela 7.3 – Quantidade adicional de condutor no caso do aumento do fator de x para y .

Fator $x - y$	I_f 4 – 20 [kA]	ρ 100 – 500 [$\Omega \cdot m$]	h 0,5 – 1,5 [m]	ρ_s 1500 – 2500 [$\Omega \cdot m$]	h_s 0,05 – 0,2 [m]	t_f 0,1 – 3 [s]	Elétrodos Com – Sem
Condutor [m]	3985	3154	253	2664	964	6094	1090

Existem outros fatores que apesar de não ter um impacto tão elevado é importante ter em consideração no dimensionamento, é o caso da profundidade a que é colocada a malha de terra e a espessura da camada protetora.

Na seção 7.1.8 verificou-se que o material a utilizar não têm uma influência significativa na quantidade de condutor necessário para a malha de terra, no entanto em situações que é viável o uso de materiais alternativos ao cobre, pode tornar-se extremamente vantajoso a nível económico.

A análise anterior não contemplou alguns fatores que também são relevantes, como é o caso da geometria e da área ocupada pela malha de terra. A geometria da malha tem

influência no cálculo da tensão da malha e da tensão passo, enquanto a área está diretamente relacionada com a quantidade de condutor utilizado e com resistência da malha de terra, sendo este um parâmetro importante para determinar a corrente que flui para malha.

O estudo de sensibilidade realizado neste capítulo sobre a influência dos vários fatores no dimensionamento e otimização das malhas de terra, permitiu adquirir maior conhecimento sobre comportamento de cada fator.

7.2 Aplicação do Algoritmo em Projetos da EDP Distribuição

Esta seção tem como objetivo testar no PORT exemplos de projetos reais da EDP Distribuição e analisar os resultados obtidos.

Em cada exemplo são apresentadas as características da rede de terra e a quantidade de condutor usado na sua implementação. Após aplicação dos dados fornecidos pela EDP Distribuição no PORT, é realizada uma análise, com o objetivo de avaliar a segurança das pessoas, o processo de otimização efetuado pelo algoritmo e estabelecer uma comparação entre os resultados obtidos e os utilizados pela EDP.

A aplicação de um caso real no PORT pode levar à necessidade de efetuar uma aproximação de alguns parâmetros como é o caso:

- **Aproximação da forma geométrica da malha** - é necessário aproximar a malha a uma forma admissível pelo algoritmo para que os métodos de cálculo utilizados sejam devidamente aplicados. A aproximação da forma geométrica da malha a um quadrado ou retângulo é realizada tendo em conta a área da malha de terra utilizada pela EDP Distribuição.
- **Comprimento dos elétrodo**s - o algoritmo otimiza o comprimento dos elétrodos mas não considera a hipótese do uso de elétrodos de vários tamanhos. O comprimento máximo dos elétrodos que vai ser aplicado no PORT tem em atenção o comprimento médio dos elétrodos utilizados no projeto da EDP Distribuição.
- **Resistividade média do solo** - o algoritmo está limitado à utilização de um solo uniforme, no entanto no caso de o solo ser não uniforme é possível obter a resistividade média do solo através do método referido no capítulo 4.3.

Os três fatores enunciados anteriormente são ponderados com toda atenção, tendo como objetivo adaptar da forma mais realista possível cada projeto às limitações do algoritmo.

7.2.1 Projeto 1

Neste exemplo é considerado o dimensionamento da rede de terra numa subestação na qual são ligados dois cabos de guarda à malha de terra.

O exemplo é retirado de [2], onde é considerado que fator de decaimento é 1, ou seja a corrente que flui para malha de terra depende apenas do fator de divisão de corrente.

O método utilizado pela EDP Distribuição no cálculo da tensão tolerável é obtido através CENELEC (HD 637 S1:1999), que refere expressamente que os valores toleráveis para a tensão de passo são muito inferiores aos valores toleráveis para a tensão de contacto, e assim, se uma rede verificar os requisitos relativamente à tensão de contacto, então poder-se-á considerar que não haverá tensões de passo perigosas [2].

O cálculo da tensão tolerável pelo método do CENELEC não considera a possibilidade da utilização de uma camada protetora colocada à superfície do solo. Ao aplicar este exemplo no PORT utilizou-se a resistividade e espessura da camada protetora para aproximar o valor da tensão de toque tolerável do PORT com o utilizado pela EDP, com esta aproximação pretende-se utilizar mesma tensão tolerável e analisar a otimização efetuada.

As características da rede de terra da EDP Distribuição são enunciadas de seguida:

- Comprimento da malha da terra: 62,5 [m];
- Largura da malha de terra: 39 [m];
- Profundidade da malha de terra: 1 [m];
- Seção mínima dos condutores da malha: 95 [mm²];
- Tempo de duração de defeito: 0,5 [s];
- Frequência do sistema elétrico: 50 [Hz];
- Resistividade do solo: 130 [$\Omega \cdot m$];
- Corrente de defeito: 10450 [A];
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície: 1000 [$\Omega \cdot m$];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície: 0,069 [m];
- Comprimento máximo dos elétrodos de terra: 6 [m];
- Tipo condutor utilizado: Cobre Flexível;
- Resistência elétrica: 0,292 [Ω/km];
- Número de apoios (em 1,5 km): 11;
- Número de cabos de guarda: 2;
- Resistência à terra nos apoios: 50 [Ω].

Neste exemplo não é necessário ajustar a forma da malha, pois a EDP considera uma malha retangular, o que a torna perfeitamente admissível pelo algoritmo de otimização.

A figura 7.8 representa a malha de terra implementada pela EDP Distribuição.

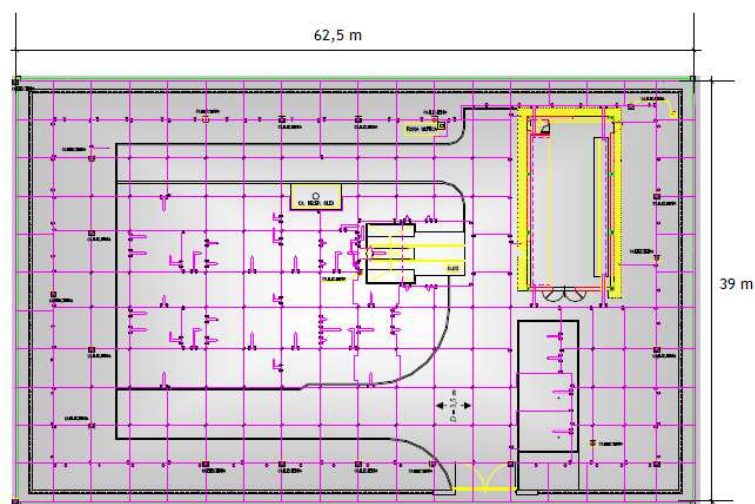


Figura 7.8 - Malha de terra implementada pela EDP Distribuição no projeto1.

Na tabela 7.4 estão apresentados os valores obtidos pelo PORT e pela EDP Distribuição no dimensionamento deste projeto. O cálculo da tensão de passo não é efetuado, devido aos critérios de segurança utilizados pela EDP considerarem que apenas é necessário obter uma tensão malha inferior à tensão de toque tolerável.

Tabela 7.4 – Resultados obtidos pelo PORT e pela EDP Distribuição no projeto 1.

	PORT	EDP
Tensão de Toque Tolerável [V]	440,7	440
Tensão de Passo Tolerável [V]	1096,7	-
Resistência da Malha, R_g [Ω]	1,21	1,204
GPR [V]	4661,7	4642,6
Corrente na Malha, I_G [A]	3842,34	3856
Tensão da Malha, E_m [V]	433,1	430,9
Tensão de Passo, E_s [V]	307,69	-
D_x [m]	4,17	3,5
D_y [m]	4,33	3,5
Seção [mm^2]	95	95
Número de Elétrodos	48	22
Comprimento dos Elétrodos [m]	6	6
Condutor Utilizado [m]	1537	1623
Estado da Malha	Segura	Segura

O dimensionamento realizado pelo PORT não leva a uma diminuição muito elevada na quantidade de condutor a utilizar na malha de terra. Na tabela 7.4 é possível verificar que

tensão da malha está muito próxima da tensão de toque tolerável, sendo ainda assim possível diminuir 86m no condutor utilizado, devido à colocação de elétrodos no perímetro da malha que possibilita o aumento do espaçamento entre condutores.

A comparação dos valores da tabela 7.4, permite facilmente verificar que existe uma grande proximidade nos resultados, pois o método usado pela EDP Distribuição neste exemplo para o cálculo da tensão da malha é o mesmo que foi utilizado no PORT. As principais diferenças são justificadas pela otimização realizada pelo PORT, ao diminuir a quantidade de condutor a utilizar ocorre um aumento da resistência da malha de terra e do *GPR*, resultando na diminuição da corrente que flui para malha de terra.

O dimensionamento efetuado pela EDP Distribuição neste exemplo é confirmado pelo programa informático CDEGS que utiliza o método dos elementos finitos. Esta confirmação leva a concluir que o método de cálculo implementado no PORT também é confirmado, pois os resultados obtidos são muito próximos.

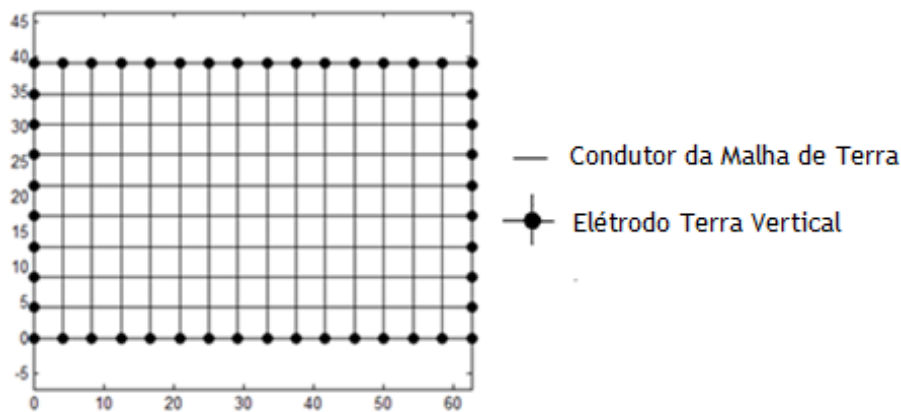


Figura 7.9 - Malha de terra otimizada pelo PORT para projeto1.

A figura 7.9 mostra a estrutura da malha otimizada pelo PORT, na qual se pode verificar a colocação dos elétrodos no perímetro da malha e o aumento do espaçamento entre dos condutores.

7.2.2 Projeto 2

Neste exemplo é considerada uma subestação na qual são ligados dois cabos de guarda à malha de terra. As características da rede de terra são enunciadas de seguida:

- Comprimento da malha da terra: 80 [m];
- Largura da malha de terra: 63 [m];
- Profundidade da malha de terra: 1 [m];
- Seção mínima dos condutores da malha: 95 [mm²];
- Tempo de duração de defeito: 2 [s];
- Frequência do sistema elétrico: 50 [Hz];

- Resistividade do solo: 860 [$\Omega \cdot m$];
- Corrente de defeito: 6428 [A];
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície (Gravilha): 2500 [$\Omega \cdot m$];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície: 0,12 [m];
- Comprimento máximo dos elétrodos de terra: 22,5 [m];
- Tipo condutor utilizado: Cobre Flexível;
- Resistência elétrica: 0,292 [Ω/km];
- Número de apoios (em 1,5 km): 5;
- Número de cabos de guarda: 2;
- Resistência à terra nos apoios: 50 [Ω].

A malha de terra implementada pela EDP Distribuição é apresentada na figura 7.10.

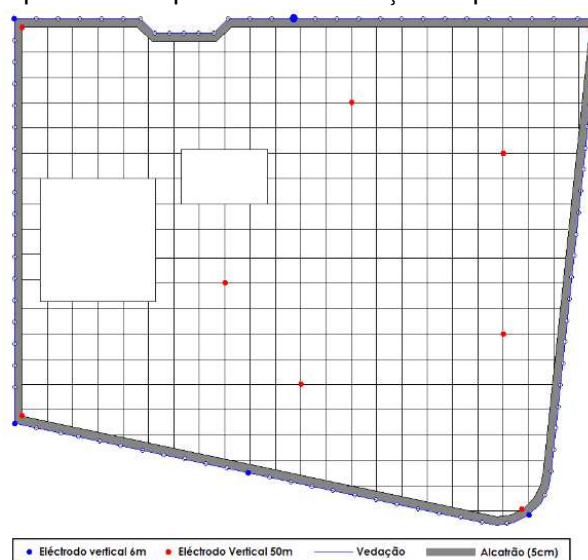


Figura 7.10 - Malha implementada pela EDP Distribuição no projeto 2.

A relação X/R não é considerada, pois nos dados fornecidos pela EDP Distribuição o fator de decaimento já se encontra contabilizado na corrente de defeito, apenas é considerado o fator de divisão da corrente para determinar a corrente que flui para malha de terra.

A rede de terra implementada nesta subestação utilizou uma quantidade de 3481m de condutor. A malha apresentada na figura 7.10 teve de ser aproximada à forma de uma malha retangular para ser aplicada no PORT. A adaptação da forma da malha é efetuada tendo em consideração a área que a malha de terra ocupa, ficando ainda assim sujeita a um determinado erro na quantidade real de condutor a utilizar.

A introdução dos dados referidos anteriormente no PORT levou a obter uma malha de terra com as características apresentadas na tabela 7.5, analisando os resultados obtidos verifica-se que o PORT consegue obter uma malha segura com menos 1025m de condutor que a malha implementada na figura 7.10.

Tabela 7.5 – Resultados obtidos pelo PORT na aplicação do projeto 2.

	PORT
Tensão de Toque Tolerável [V]	452,84
Tensão de Passo Tolerável [V]	1478,33
Resistência da Malha, R_g [Ω]	5,61
GPR [V]	5668,5
Corrente na Malha, I_G [A]	1010,95
Tensão da Malha, E_m [V]	449,35
Tensão de Passo, E_S [V]	245,43
D_x [m]	7,27
D_y [m]	7
Seção [mm^2]	95
Número de Eléttodos	40
Comprimento dos Eléttodos [m]	22,5
Condutor Utilizado [m]	2456
Estado da Malha	Segura

Analisando a figura 7.11 e a tabela 7.5, verifica-se que o processo de otimização consistiu em introduzir eléttodos ao longo do perímetro da malha, permitindo aumentar o espaçamento entre os condutores.

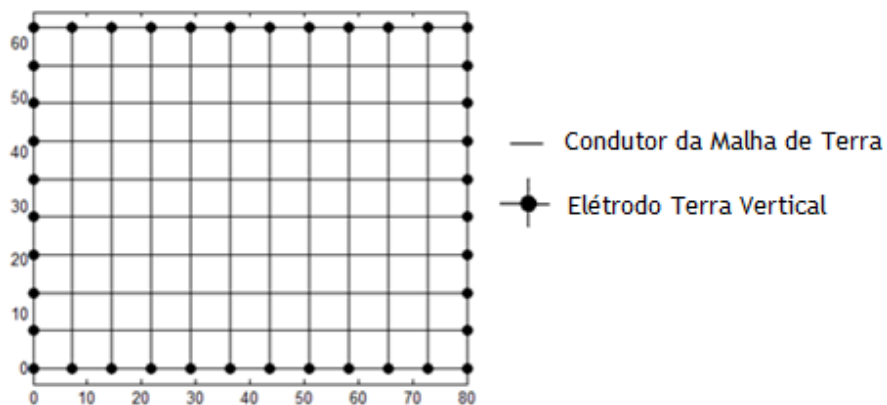


Figura 7.11 - Malha de terra otimizada pelo PORT para projeto 2.

É importante salientar que o dimensionamento efetuado pela EDP Distribuição recorre neste exemplo a um programa informático CDEGS, que utiliza o método dos elementos finitos, enquanto o PORT baseia-se na fórmula expandida de Sverak para cálculo da resistência da malha de terra. Os resultados obtidos pelos dois métodos podem ser

ligeiramente diferentes quando aplicada uma malha com mesmas características, devido aos métodos matemáticos utilizados serem diferentes [2].

7.2.3 Projeto 3

Neste exemplo fornecido pela EDP Distribuição a malha de terra é considerada isolada de qualquer ligação a cabos de guarda, bainhas ou neutros.

As características utilizadas para o seu dimensionamento são apresentadas de seguida:

- Comprimento da malha da terra: 60 [m];
- Largura da malha de terra: 38 [m];
- Profundidade da malha de terra: 1 [m];
- Seção mínima dos condutores da malha: 95 [mm²];
- Tempo de duração de defeito: 0,1 [s];
- Frequência sistema elétrico: 50 [Hz];
- Resistividade do solo: 400 [$\Omega \cdot m$];
- Corrente de defeito: 6890 [A];
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície (Gravilha): 2500 [$\Omega \cdot m$];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície: 0,12 [m];
- Comprimento máximo dos elétrodos de terra: 18 [m];
- Tipo condutor utilizado: Cobre Flexível.

A corrente de defeito fornecida pela EDP Distribuição já considera o efeito de X/R , por isso neste caso a corrente de defeito é igual à corrente que flui pela malha de terra.

A figura 7.12 apresenta a malha de terra implementada pela EDP Distribuição.

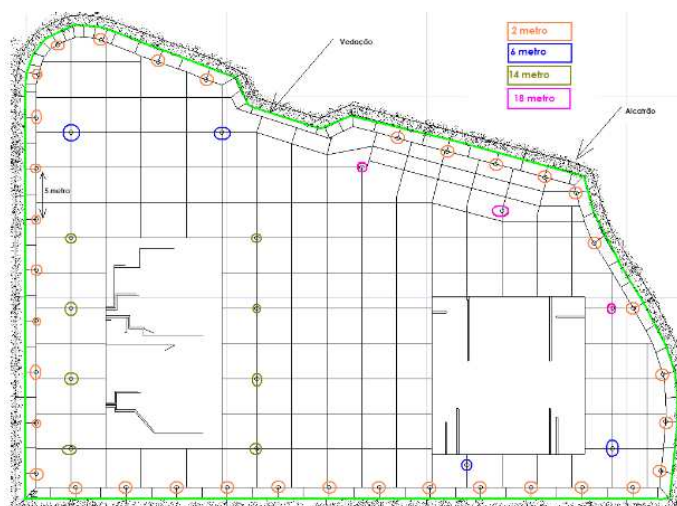


Figura 7.12 - Malha de terra implementada pela EDP Distribuição no projeto 3.

A malha implementada pela EDP Distribuição nesta subestação contém 1863m de condutor.

Aplicação do projeto 3 no PORT, levou à necessidade de ajustar a sua forma geométrica a um retângulo, mantendo a sua área. Na tabela 7.6 estão apresentados os resultados obtidos pelo PORT.

Tabela 7.6 — Resultados obtidos pelo PORT na aplicação do projeto 3.

	PORT
Tensão de Toque Tolerável [V]	1931,75
Tensão de Passo Tolerável [V]	6237,56
Resistência da Malha, R_g [Ω]	3,85
GPR [V]	26532,2
Corrente na Malha, I_G [A]	6890
Tensão da Malha, E_m [V]	1921,9
Tensão de Passo, E_S [V]	1198,86
D_x [m]	6
D_y [m]	5,42
Seção [mm^2]	95
Número de Eléttodos	34
Comprimento dos Eléttodos [m]	18
Condutor Utilizado [m]	1510
Estado da Malha	Segura

Na tabela 7.6 é possível verificar que a corrente que flui para a malha de terra é de 6890A, ou seja toda a corrente de defeito porque não existe caminhos alternativos. A otimização desta malha é fortemente influenciada pelo curto tempo de duração do defeito, que permite ter tensões toleráveis muito elevadas e pela utilização de eléctrodos com comprimento de 18m ao longo do perímetro que permitiu aumentar o espaçamento entre os condutores e desta forma diminuir a quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

Analisando a tabela 7.6, verifica-se que o PORT diminui em 353m a quantidade de condutor utilizado na malha de terra, assim como o número de eléctrodos em comparação com malha da figura 7.12.

É importante salientar que o dimensionamento efetuado pela EDP Distribuição recorre ao programa informático CDEGS. Os resultados obtidos pelo CDEGS e pelo PORT para malhas de terra com as mesmas características podem ser ligeiramente diferentes, devido aos métodos de cálculo utilizados serem diferentes.

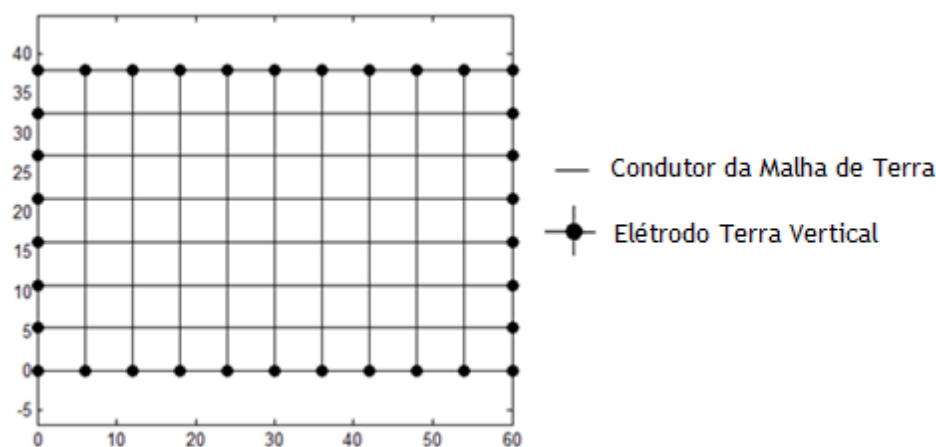


Figura 7.13 - Malha de terra otimizada pelo PORT para projeto 3.

7.2.4 Conclusão

A aplicação do PORT em projetos reais da EDP Distribuição permitiu verificar que é possível otimizar a quantidade de condutor utilizado nas malhas de terra.

O projeto 1 é um exemplo fornecido pela EDP que foi calculado com um método semelhante ao utilizado no PORT e é caracterizado por ter uma geometria retangular, a resistividade do solo ser muito baixa e estar dimensionado com tensões máximas muito próximas das toleráveis. A aplicação do PORT permitiu verificar que é possível diminuir a quantidade de condutor em 86m.

O projeto 2 é fornecido pela EDP Distribuição e é dimensionado recorrendo ao programa CDEGS. As principais características deste exemplo são a sua forma geométrica aproximada a um retângulo, a resistividade do solo elevada, tempo de defeito elevado, uso de elétrodos verticais com elevado comprimento e ter cabos de guarda ligados à malha de terra. A aplicação deste exemplo no PORT permitiu obter uma diminuição de 1025m na quantidade de condutor a utilizar na malha de terra. Este resultado dá a entender que a malha de terra dimensionada pela EDP Distribuição está ligeiramente sobredimensionada.

O projeto 3 é também fornecido pela EDP Distribuição e dimensionado recorrendo ao programa CDEGS. As suas principais características são a utilização de uma malha de terra isolada, a forma geométrica aproximada a um retângulo, o tempo de duração do defeito muito curto, área da malha de terra pequena e uso de elétrodos verticais com elevado comprimento. Inserindo este exemplo no PORT obteve-se uma diminuição de 353m na quantidade de condutor utilizado na malha de terra.

Nos três projetos utilizados, é possível otimizar a quantidade de condutor, mas é importante salientar que otimização é feita mediante as considerações utilizadas pelo algoritmo. O PORT apresenta resultados bastante interessantes no dimensionamento das malhas de terra, apesar de poder ser melhorado quando aplicado em solos pouco uniformes, recorrendo a outros métodos de cálculo mais precisos e complexos.

Capítulo 8

Conclusão e Trabalhos Futuros

A realização desta dissertação foi estruturada essencialmente em três fases, que consistiram no estudo dos métodos de dimensionamento das redes de terra para subestações, com especial atenção ao proposto pelo IEEE Std 80, elaboração do algoritmo de otimização e a sua aplicação.

Na primeira fase é realizado um estudo detalhado dos sistemas de terra onde se verifica que o objetivo principal é limitar as tensões perigosas que possam ser aplicadas a uma pessoa e favorecer a intervenção dos dispositivos de proteção.

Em seguida procedeu-se a uma análise dos defeitos a que o sistema de terra pode estar sujeito e verificou-se que no dimensionamento deve ser considerado o defeito que irá resultar na pior situação de fluxo de corrente entre a malha de terra e as terras circundantes.

Os critérios de segurança usados para o dimensionamento das redes de terra são estabelecidos pela tensão de toque e passo tolerável pelo corpo humano e verifica-se que dependem diretamente da resistividade do solo, da resistência do corpo humano, da intensidade e da duração da corrente e da possibilidade de usar uma camada protetora à superfície do solo.

Em seguida foi feita uma análise sobre a caracterização do solo e verificou-se que existem vários fatores que influenciam a resistividade do solo, dos quais se destacam a humidade, a temperatura, a composição química, a granulometria e a compactação. A elevada gama de valores que a resistividade do solo pode atingir, afeta significativamente o desempenho do sistema de terra, por isso torna-se fundamental estudar detalhadamente cada local.

Quando é considerada a utilização de uma camada de material protetor à superfície do solo verificou-se que deve-se levar em conta o uso de uma resistividade bastante superior à do solo subjacente, para que as correntes tenham tendência a permanecer nesta camada, permitindo assim aumentar a tensão tolerável pelo corpo humano. Além desta vantagem, também pode ser bastante útil para retardar a evaporação da humidade e limitar assim a secagem das camadas superficiais do solo durante períodos prolongados de tempo seco.

O algoritmo de otimização desenvolvido tem como base os métodos de cálculo propostos pelo IEEE Std 80 que são considerados simples e com medidas conservadoras que permitem obter resultados bastante favoráveis. O processo de otimização implementado é baseado no estudo desenvolvido por Sverak, apresentado no anexo A.5. O algoritmo considera que os condutores estão igualmente espaçados e que a tensão da malha aumenta do centro para o canto da rede, verificou-se que a taxa desse aumento dependerá: número e localização dos elétrodos, do espaçamento entre condutores, da geometria da malha, da área ocupada pela malha de terra, do diâmetro e profundidade dos condutores e da resistividade do solo.

A utilização do processo de otimização leva a malha de terra a diminuir a quantidade de condutor a utilizar, mas em contrapartida aproxima as tensões máximas das tensões toleráveis, por isso foi fundamental realizar a validação do algoritmo a partir dos exemplos do IEEE Std 80 que utilizam os mesmos métodos de cálculo. A validação foi efetuada recorrendo a três casos, cada um explorando variáveis diferentes e foi possível confirmar a veracidade dos resultados obtidos pelo PORT através da análise detalhada do processo de otimização.

Após a validação do algoritmo foi realizado um estudo de sensibilidade dos principais fatores que influenciam no dimensionamento e otimização das malhas de terra e verificou-se que a corrente de defeito, a resistividade do solo, resistividade da camada protetora, a duração do defeito e o uso de elétrodos verticais são os fatores que maior impacto impõem no dimensionamento da malha de terra. Neste estudo realizado através do PORT, pretende-se salientar que é fundamental determinar cada variável com muito cuidado e precisão, devido à influência que apresentam na quantidade de condutor a utilizar na malha de terra.

É verificado que o tipo de material condutor a utilizar no dimensionamento da rede de terra não apresenta uma influência significativa na quantidade de condutor necessário para garantir os critérios de segurança. No entanto, nas situações em que agressividade do solo na deterioração dos materiais não é um problema, verifica-se que o uso de materiais alternativos ao cobre pode ser viável, obtendo-se assim um dimensionamento extremamente vantajoso a nível económico.

É importante referir que a ligação de cabos de guarda, neutros e bainhas à malha de terra permite diminuir a quantidade de condutor a utilizar na malha de terra devido à divisão da corrente por toda a rede de terra e diminui também o *GPR* na área da subestação.

A aplicação do PORT em projetos reais da EDP Distribuição foi realizado recorrendo a três projetos com características distintas e verificou-se que é possível otimizar a quantidade de condutor utilizado nas malhas de terra.

É possível verificar ao longo das várias aplicações realizadas no PORT que a tensão da malha é a que necessita de mais atenção quando se está a realizar a otimização das malhas de terra, pois é o critério de segurança mais difícil de cumprir. Normalmente a tensão de passo apresenta uma grande margem de segurança, dando razão ao considerado pela

CENELEC, que os valores toleráveis para a tensão de passo são muito superiores aos valores toleráveis para tensão de contato, e assim, se uma rede verificar os requisitos relativamente à tensão de contato, então poder-se-á considerar que não haverá tensões de passo perigosas [2].

Nos dimensionamentos efetuados pelo PORT verificou-se que quando se considerava a possibilidade de utilizar elétrodos nos cantos ou ao longo do perímetro da malha de terra, é possível diminuir substancialmente a quantidade de condutor necessário para garantir os critérios de segurança, isto acontece devido ao processo de otimização aumentar a quantidade de condutor nos locais de maior potencial, nomeadamente no perímetro e cantos da malha, possibilitando o aumento do espaçamento entre os condutores.

Ao longo do trabalho verificou-se que o PORT apresenta bons resultados, quando é considerada a sua aplicação em solos uniformes ou com pequenas variações de resistividade. É de salientar que este trabalho permitiu verificar que é muito importante estudar detalhadamente a rede elétrica e o local onde vai ser instalada a rede de terra, pois algumas das variáveis utilizadas no dimensionamento tem um impacto muito grande nos potenciais obtidos à superfície do solo. Em caso de uma análise mal realizada podem colocar em perigo a segurança das pessoas e equipamentos ou levar ao sobredimensionamento da malha de terra.

8.1 Trabalhos Futuros

Tendo como base o trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação é possível definir algumas propostas de trabalho que possibilitam um melhoramento do algoritmo de otimização.

O algoritmo pode ficar mais preciso para situações mais extremas se forem aplicados métodos mais complexos que permitam a modelização do solo em duas camadas, a corrente seja considerada variável ao longo da malha, possibilidade de considerar malhas com formas irregulares e a utilização de um espaçamento variável entre os condutores.

Nesta dissertação não está contemplada aplicação de projetos reais da REN no PORT, por isso seria importante em trabalhos futuros realizar esta aplicação e analisar os resultados obtidos.

A abordagem de outros guias de dimensionamento de redes de terra como por exemplo os da CENELEC, podem acrescentar novas perspetivas de otimização.

Referências

- [1] IEEE, *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Std. 80-2000, Agosto 2000.
- [2] EDP, *Instalações AT e MT. Subestações de Distribuição - Recomendações de Projecto*, EDP DRP-C13-530/N, Fevereiro 2007.
- [3] John D. McDonald, *Electric Power Substations Engineering*, CRC Press, 2007.
- [4] <http://paginas.fe.up.pt/~arminio/cie/apontamentos.html>, Concepção de Instalações Elétricas - Sistemas de Terra, acedido em Fevereiro 2012.
- [5] Carlos Moreira, "Análise de Curto-Circuitos Simétricos", conteúdos da unidade curricular RESEE 2009/2010, acedido em Fevereiro 2012.
- [6] Dalziel, C. F., and Massogilia, F.P., "Let-go currents and voltages," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 75, part II, pp. 49-56, 1956.
- [7] Loucks, W.W, "A new approach to substation grounding," *Electrical News and Engineering*, 15 de Maio, 1954.
- [8] Dalziel, C. F., and Mansfield, T.H., "Effect of frequency on perception currents," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.62, pp. 745-750 and 1000, Dezembro 1943.
- [9] Dalziel, C. F., Ogden, E., and Abbott, C.E., "Effect of frequency on let-go currents," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.62, pp.745-750 and 1000, Dezembro 1943.
- [10] Dalziel, C. F., "Dangerous electric currents," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.65, pp.579-585, 1123-1124, 1946.
- [11] Dalziel, C. F., and Lee, R.W., "Reevaluation of lethal electric current," *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, vol. IGA-4, no.5, pp.467-476, Outubro 1968.
- [12] Laurent, P. G., "Les Bases Generales de la Technique des Mises a la Terre dans les Installations Electriques," *Bulletin de la societe Francaise des Electriciens*, vol.1 ser.7, pp. 368-402, Julho 1951.

- [13] Decreto Nº42895, publicado em “Diário da Republica nº75 - I Série”, - Regulamento de Segurança de Subestações e Postos de Transformação e de Seccionamento, de 31 Março 1960.
- [14] Thapar, B., Gerez, V., Balakrishnan, A., and Blank, D., “Simplified equations for mesh and step voltages in AC substation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 601-607, Abril 1991.
- [15] Sverak, J. G., “Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid - Part I How good is the presente IEEE method?” *IEEE Transactions Power Apparatus and systems*, Vol. PAS-103, No.1 Janeiro 1984.
- [16] EDP, *Instalações AT e MT. Subestações de Distribuição - Regras de Execução*, EDP DRP-C13-530/N, Fevereiro 2007.
- [17] Ollendorff, F., *Erdstrome (Ground currents)*, Stuttgart, Germany: Springer-Verlag, 1928; Burkhauser-Verlag-Baselund, 1969.
- [18] Thapar, B., Gerez, V., and Emmanuel, P., “Ground resistance of the foot in substation yards,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 1, pp. 1-6, Janeiro 1993.
- [19] Thapar, B., Gerez, V., and Kejriwal, H., “Reduction factor for the ground resistance of the foot in substation yards,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 360-368, Janeiro 1994.

Anexos

A.1. Método de Wenner

O método de Wenner, é método mais usado na medição da resistividade do solo. Consiste na colocação de quatro elétrodos em linha e equidistantes. É injetada corrente contínua nos dois elétrodos exteriores e é medida a diferença de potencial entre os dois elétrodos interiores.

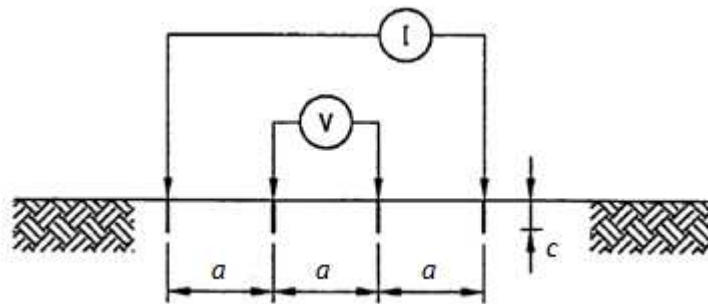


Figura A.1 - Método de Wenner, retirado [1].

A resistência R , é obtida pela razão entre a diferença de potencial medida nos elétrodos internos e a corrente nos elétrodos externos. O valor obtido pela resistência depende fundamentalmente da distância entre elétrodos e da resistividade do solo.

O estudo da resistividade de um determinado local deve ser efetuado através de diversas medições, especialmente em locais pouco homogêneos. A variação da distância entre elétrodos a , permite obter a resistividade do terreno para camadas mais superficiais ou mais profundas, caso se diminua ou aumente respectivamente. Nos vários testes efetuados é possível obter-se o valor da resistividade para cada ensaio através da seguinte equação:

$$\rho_a = \frac{4 \times \pi \times a \times R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4c^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}}} \quad (A.1)$$

Onde,

ρ_a é a resistividade aparente do solo [$\Omega \cdot m$];

R é a resistência medida $[\Omega]$;

a é a distância entre elétrodo adjacentes $[m]$;

c é a profundidade dos elétrodo $[m]$.

Se a profundidade dos elétrodo é pequena em comparação com a distância entre elétrodo adjacentes, a equação (A.1) pode ser reduzida para:

$$\rho_a = 4 \times \pi \times a \times R \quad (A.2)$$

Aplicando este método através da deslocação dos elétrodo pelo terreno, facilmente se obtém uma simples caracterização do solo.

A.2. Fator de Decaimento

No dimensionamento de uma rede de terra deve considerar-se o efeito da corrente assimétrica, o qual é traduzido por um fator D_f , que é obtido pela demonstração que é efetuada em seguida.

Considerando que a corrente de defeito assimétrica pode ser expressa por:

$$I_f(t) = \sqrt{2} \times E \times Y_{ac} \left[\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-\frac{t}{T_a}} \times \sin(\alpha - \theta) \right] \quad (A.3)$$

Onde,

$I_f(t)$ é a corrente de defeito assimétrica [A], para qualquer instante t [s];

E é a tensão simples eficaz pré-defeito fase-neutro [V];

ω é a frequência do sistema [radianos/s];

α é o ângulo da tensão inicial [radianos];

θ é o ângulo de fase do circuito [radianos];

Y_{ac} é a admitância equivalente do sistema [m/Ω];

T_a é uma constante de tempo continua de offset [s].

$$T_a = \frac{X}{(\omega \times R)} = \frac{X}{(2\pi \times f \times R)} \quad (A.4)$$

Considerando a hipótese de contacto na condição mais severa, que é quando $t_s = t_f$ e assumindo que o máximo da componente continua de offset estará presente no momento do defeito em que $(\alpha - \theta) = -\pi/2$.

A equação (A.3) fica:

$$I_f(t) = \sqrt{2}E \times Y_{ac} \left[e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos(\omega t) \right] \quad (A.5)$$

Integrando a equação (A.5) ao quadrado durante todo o período de tempo t_f , obtêm-se o valor eficaz da corrente de defeito assimétrica aproximada para toda a duração do defeito.

$$I_F = \sqrt{\frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} \quad (A.6)$$

Onde,

I_F é o valor eficaz da corrente de defeito assimétrica aproximada para toda a duração do defeito [A];

t_f é o tempo de duração do defeito [s];

t é o instante de tempo após início do efeito [s].

Desenvolvendo o integral (A.6), obtêm-se o seguinte:

$$I_F = I_f \times \sqrt{\frac{2}{t_f} \int_0^{t_f} [i_f(t)]^2 dt} = E \times Y_{ac} \sqrt{\frac{2}{t_f} \int_0^{t_f} e^{-\frac{t}{T_a}} \times \cos(wt) dt} \quad (A.7)$$

Considerando que:

$$I_f = E \times Y_{ac} \quad (A.8)$$

O fator de decaimento é dado por:

$$D_f = \frac{I_F}{I_f} \quad (A.9)$$

Ficando:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{\left(\frac{-2t_f}{T_a} \right)} \right)} \quad (A.10)$$

A.3. Simplificação da Formula da Corrente Homopolar

Os defeitos considerados para dimensionamento das redes de terra são os curto-circuitos assimétricos, mais precisamente os que estabelecem ligação à terra, como é caso do defeito Fase-Terra e Fase-Fase-Terra, como já tinha sido referido no capítulo 2.

No caso de um defeito Fase-Fase-Terra, a corrente homopolar à terra é obtida pela seguinte equação:

$$I_0 = \frac{E \times (R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) \times [R_0 + R_2 + 3R_f + j(X_0 + X_2)] + (R_2 + jX_2) \times (R_0 + 3R_f + jX_0)} \quad (A.11)$$

No caso de um defeito Fase-Terra:

$$I_0 = \frac{E}{3R_f + R_1 + R_2 + R_0 + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (A.12)$$

Onde,

I_0 é valor simétrico eficaz da componente homopolar da corrente de defeito [A];

E é a tensão entre a fase e o neutro [V];

R_f , é a resistência prevista do defeito em [$\Omega/fase$] (normalmente é assumida $R_f = 0$);

R_1 é a resistência da componente direta [$\Omega/fase$];

R_2 é a resistência da componente inversa [$\Omega/fase$];

R_0 é a resistência da componente homopolar [$\Omega/fase$];

X_1 é reactância da componente direta [$\Omega/fase$];

X_2 é a reactância da componente inversa [$\Omega/fase$];

X_0 é a reactância da componente homopolar [$\Omega/fase$].

Os valores de R_1, R_2, R_0, X_1, X_2 e X_0 são calculados olhando para o sistema a partir do ponto de defeito, mas segundo [1] o efeito das resistências pode ser desprezado tornando as equações (A.11) e (A.12) simplificadas e suficientemente precisas.

A equação da corrente homopolar Fase-Fase-Terra fica:

$$I_0 = \frac{E \times X_2}{X_1 \times (X_0 + X_2) + (X_2 \times X_0)} \quad (A.13)$$

No caso da corrente homopolar Fase-Terra fica:

$$I_0 = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (A.14)$$

A.4. Demonstração do Cálculo do Fator de Divisão de Corrente

No dimensionamento das redes de terra é necessário ter em consideração o fator de divisão de corrente S_f , que tem como finalidade traduzir a corrente de defeito que flui para a malha de terra. Este fator permite evitar um elevado sobredimensionamento e levar em consideração a ligação de cabos de guarda à malha de terra da subestação.

O ideal para calcular o valor de S_f , seria através do conhecimento aprofundado do sistema de terra recorrer a um programa computacional capaz de efetuar o cálculo da divisão de corrente. No entanto, em situações mais simples é possível adotar uma forma simplificada para realizar o cálculo, recorrendo ao método proposto por [2].

Nesta simplificação é considerado que o cabo de guarda é ligado à terra em múltiplos pontos, comporta-se como um condutor que tem uma determinada impedância longitudinal Z_1 , e uma condutância transversal $1/R_2$. Se o cabo tiver um grande comprimento, o cálculo mostra que a impedância equivalente é aproximadamente $Z = \sqrt{Z_1 \times R_2}$. Se várias linhas ligadas a uma subestação estiverem munidas de cabos de guarda ligados à rede de terra da subestação, a condutância resultante das diversas linhas será aproximadamente igual à adição aritmética das indutâncias.

A impedância equivalente do cabo de guarda será da ordem da impedância longitudinal correspondente a 1500 metros de cabo, isto põe em evidência o facto de as correntes não se propagarem a grandes distâncias nestes cabos, escoando-se rapidamente para a terra.

O cálculo de S_f pela forma simplificada vai ser exemplificado considerando que a malha de terra da subestação é alimentada por duas linhas de AT a 60kV, com 1500 metros cada uma, em alumínio-aço 325 mm², sendo o cabo de guarda em condutor OPGW de 145 mm² de seção.

O cálculo da impedância longitudinal é obtido multiplicando a resistência elétrica do cabo de guarda pela distância até onde se prevê que as correntes de defeito se podem propagar.

$$Z_1 = 0,292\Omega/km \times 1,5km \quad (A.15)$$

Numa distância de 1,5km é considerado que cada cabo de guarda está ligado à terra através dos apoios 11 vezes e que a resistência à terra nos apoios é de 50 ohms.

$$R_2 = \frac{\text{Resistência à terra em cada apoio}}{\text{Numero total de apoios}} = \frac{50}{11} = 4,55\Omega \quad (A.16)$$

A impedância do cabo de guarda é dada por:

$$Z_{cg} = \sqrt{Z_1 \times R_2} = 1,412\Omega \quad (A.17)$$

É necessário obter a impedância equivalente para a ligação de dois cabos de guarda na malha de terra, logo:

$$Z_{eq} = \frac{1,412}{2} = 0,706\Omega \quad (A.18)$$

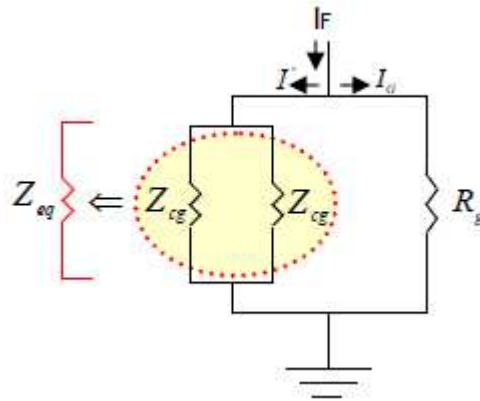


Figura A.2 - Esquema equivalente da ligação de dois cabos de guarda à malha de terra, retirado [2].

Através da figura A.2, facilmente se obtêm o fator de divisão de corrente:

$$S_f = \frac{Z_{eq}}{Z_{eq} + R_g} = \frac{0,706}{0,706 + 1,41} \cong 0,335 \quad (A.19)$$

A.5. Efeito dos Eléttodos Verticais nas Malhas de Terra

As malhas de terra colocadas nas subestações idealmente deveriam ter a forma de um prato metálico, pois a resistência da malha seria menor e a dissipação da corrente de defeito também ficaria mais facilitada. No entanto, esta hipótese é praticamente inconcebível devido ao elevado custo que tal medida implicava.

No dimensionamento das redes de terra pretende-se evitar o sobredimensionamento e desenvolver malhas de terra devidamente fiáveis e económicas. A malha de terra utiliza tipicamente um espaçamento constante entre os dois e os quinze metros. Os condutores nunca deverão ter uma seção inferior a 67mm^2 , para garantir a fiabilidade dos condutores, resistir aos esforços eletrodinâmicos a que a malha é sujeita durante os defeitos e à agressividade do solo. Enquanto a profundidade varia tipicamente entre 0,5 e 1,5m. A resistividade do terreno e a área que a malha ocupa são também fatores de extrema importância para dimensionamento da malha de terra.

Em seguida é apresentado um estudo realizado por Sverak que permite mostrar o impacto da colocação de eléctrodos nas malhas de terra.

Neste estudo Sverak colocou eléctrodos na malha de terra em vários locais e distribuídos de diferentes formas e analisou a distribuição de potencial e a resistência da malha de terra.

No estudo são utilizadas três malhas caracterizadas pelo seguinte:

- Comprimento e largura da malha: 40 [m];
- Profundidade de instalação da malha: de 0,5 [m];
- Comprimento do condutor utilizado na malha: 400 [m];
- Resistividade do solo: 100 [$\Omega \cdot m$];
- Os eléctrodos verticais utilizados têm um comprimento: 4,1 [m];
- Diâmetro dos eléctrodos e dos condutores: 0,02 [m].

No estudo são utilizadas três malhas de terra, diferenciadas pela seguinte estrutura adotada no dimensionamento:

- Na malha 1 não são utilizados eléctrodos;
- Na malha 2 são considerados 24 eléctrodos distribuídos uniformemente pela área da malha;
- Na malha 3 são considerados 24 eléctrodos distribuídos pelo perímetro da malha.

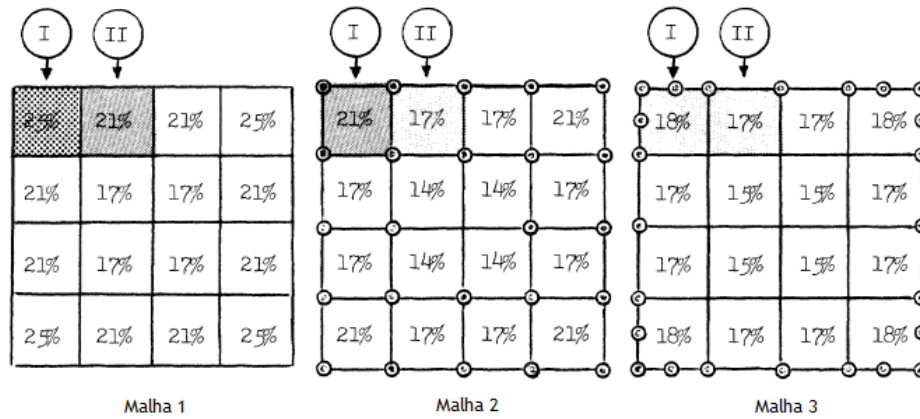


Figura A.3 - Malhas utilizadas no estudo desenvolvido por Sverak, retirado [15].

Na figura A.3, a percentagem dentro de cada sub-malha representa o valor do potencial elétrico à superfície do solo no centro de cada sub-malha em relação ao potencial da malha.

Na tabela A.1, são apresentados os resultados obtidos por Sverak para cada uma das malhas.

Tabela A.1 – Valores que caracterizam os estudos efetuados em cada malha, retirado [15].

	Malha 1	Malha 2	Malha 3
$I_G (A)$	1,000	1,000	1,000
$R_g (\Omega)$	1,210	1,119	1,100
$E_{mI} (V)$	303,8	234,2	201,5
$E_{mII} (V)$	251,4	192,9	191,7
$GPR (V)$	1,210	1,119	1,100

Analisando as figuras A.3 e A.4 e a tabela A.1 é possível retirar as seguintes conclusões [15]:

- Se os eléctrodos são colocados exclusivamente ao longo do perímetro da malha, existe uma diferença muito pequena entre os potenciais á superfície das sub-malhas do canto e os potenciais das outras sub-malhas;
- Se os eléctrodos estão distribuídos uniformemente sobre a área da malha, ou se não são utilizados, a diferença de potencial é substancial. No primeiro caso o aumento global do potencial é inferior, devido ao aumento do condutor enterrado;
- A concentração de eléctrodos nos cantos da malha, não tem efeitos adversos sobre a resistência da malha. É possível verificar que a resistência da malha 3 é um pouco menor que a da malha 2.

Este estudo efetuado por Sverak, permite verificar que a introdução de eléctrodos verticais na malha de terra, principalmente nos cantos e ao longo do perímetro são de grande

importância para o processo de otimização das malhas de terra em subestações. Uma boa distribuição dos elétrodos permite diminuir o potencial das sub-malhas, equilibrar a distribuição de potencial à superfície do solo, diminuir a resistência da malha e consequentemente o *GPR*.

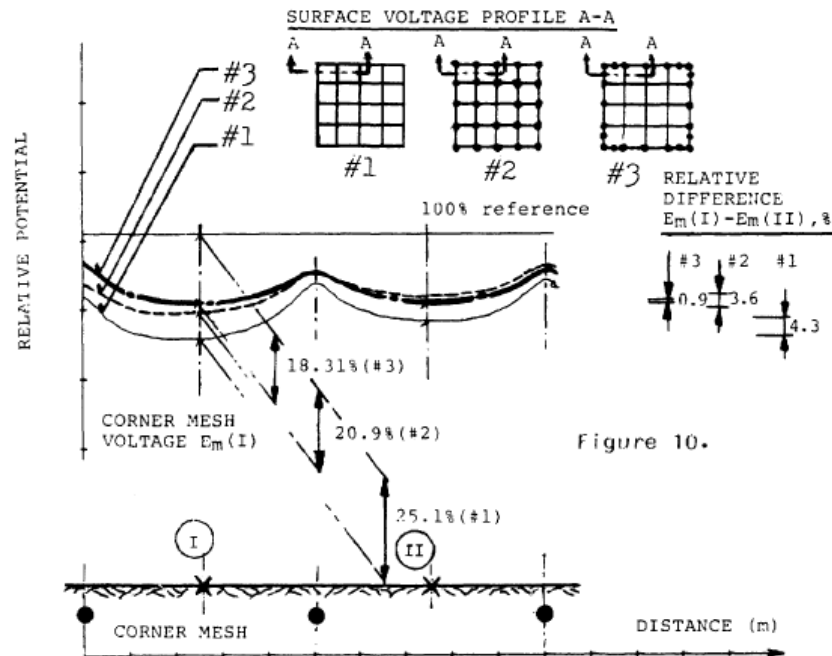


Figura A.4 - Perfil da distribuição de potencial à superfície, retirado [15].

A.6. Descrição da Utilização do PORT

Este anexo tem como objetivo fazer uma descrição de como se utiliza a interface gráfica do PORT para realizar o dimensionamento das redes de terra para subestações AT/MT. Esta descrição pretende funcionar como um guia que permita a qualquer pessoa utilizar devidamente o programa desenvolvido.

A utilização da interface gráfica necessita do programa MATLAB para correr o algoritmo de otimização desenvolvido ao longo desta dissertação.

Os passos apresentados a seguir pretendem informar como é aberta a interface gráfica:

- 1) Correr o CD e abrir a pasta “Programa de Otimização de Redes de Terra”;
- 2) Carregar com o botão direito do rato no ficheiro “PORT” do tipo MATLAB Code;
- 3) Selecionar a opção Run.

Após executados estes três passos, em breves segundos vai aparecer a interface gráfica com o seguinte aspeto:

PORT - Programa de Otimização de Redes de Terra

Características do Defeito

Corrente de Defeito A

Tempo de duração do Defeito s

Frequência Hz

X/R

Fator de Divisão de Corrente

Resistência Elétrica Ohms/Km

Resistência à Terra nos apoios Ohms

Características do Solo

Resistividade Solo Ohms Metro

Profundidade da Malha Metros

Resistividade da camada protetora do Solo Ohms Metro

Espessura da Camada Protetora Metros

Características da Rede de Terra

Largura Metros

Comprimento Metros

Comprimento Máximo dos Elétrodos Metro

Seção Mínima dos Condutores 67 mm²

Tipo Condutor Cobre, Recozido e Flexível

Condutividade (%)

Temperatura Fusão °C

Resultados

Tensão Toque Tolerável V

Tensão da Malha (Em) V

OPR V

Tensão Passo Tolerável V

Tensão de Passo (Es) V

Rg Ohms

Dx Metros

Número de Elétrodos

Seção mm²

Dy Metros

Comprimento dos elétrodos Metros

Corrente na Malha A

Comprimento dos Condutores Usados Metros

Figura A.5 - Interface gráfica do PORT.

A figura A.5 mostra a interface gráfica que foi desenvolvida com objetivo de facilitar ao utilizador o dimensionamento das redes de terra, apresentar os resultados de forma organizada, manipular facilmente várias variáveis e tirar partido de uma única janela para inserir dados e obter resultados.

A interface está dividida em duas partes distintas, a parte superior para inserir os dados e parte inferior para apresentar os resultados.

Os dados a inserir são os seguintes:

- Comprimento da malha de terra [m];
- Largura da malha de terra [m];
- Corrente de defeito [A];
- Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$];
- Profundidade da malha [m];
- Espessura da camada protetora colocada à superfície [m];
- Resistividade da camada protetora colocada à superfície [$\Omega \cdot m$];
- Tempo de duração do defeito [s];
- Razão entre a reactância e a resistência da rede para montante, X/R ;
- Escolha do tipo de material condutor a utilizar na malha de terra;
- Escolha da seção mínima dos condutores [mm^2];
- Frequência do sistema elétrico [Hz];
- Resistência elétrica do cabo guarda [Ω/km];
- Número de apoios com ligação à terra, numa distância máxima de 1500 metros;
- Resistência à terra nos apoios onde é ligado cabo de guarda à terra [Ω];
- Número de cabos de guarda que são ligados à malha de terra;
- Comprimento máximo dos elétrodos de terra [m].

A escolha do tipo de material condutor a utilizar e da seção mínima a considerar na malha de terra é realizada recorrendo a um Pop-up Menu, como mostra a figura seguinte:

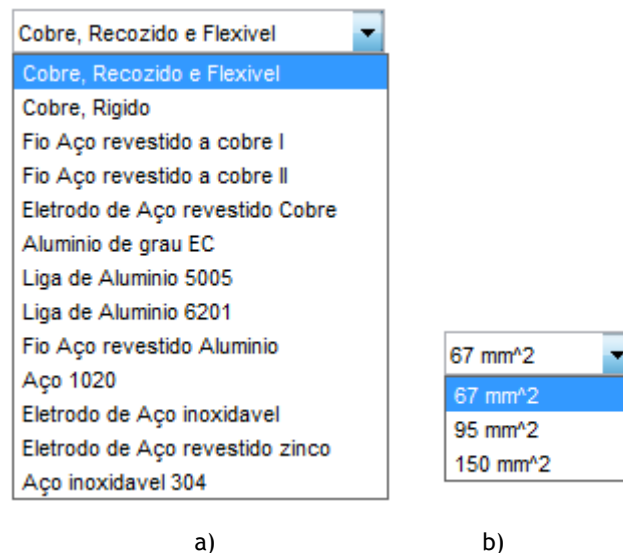


Figura A.6 - Pop-up Menu para seleccionar a) tipo de material condutor, em b) a seção mínima dos condutores.

Após o preenchimento dos dados referidos anteriormente é necessário carregar no botão “Efetuar dimensionamento”, e é executado o processo de dimensionamento.

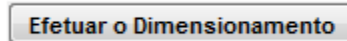


Figura A.7 - Botão que executa o processo de dimensionamento e otimização.

No caso de algum dos dados referidos anteriormente não for inserido na interface gráfica ou se a informação inserida não for válida é apresentada uma mensagem de erro avisar que é necessário introduzir um determinado dado.



Figura A.8 - Exemplo da mensagem de erro apresentada pelo PORT.

No entanto, alguns dos dados anteriormente referidos quando não forem necessários para executar o dimensionamento da rede de terra é permitido deixar a caixa de edição de texto por preencher, os dados que podem ficar por preencher são:

- X/R , quando não é preenchido está-se a considerar que a corrente de defeito já contempla a razão entre a reatância e a resistência para montante;
- Comprimento máximo dos eletrodos, é considerado que a malha de terra não utiliza eletrodos verticais;
- Resistividade e espessura da camada protetora, é considerado que não é utilizada uma camada protetora à superfície.

No caso de ser necessário dimensionar uma malha de terra isolada de qualquer ligação a cabos de guarda é necessário preencher os elementos que compõe o cálculo do fator de divisão de corrente com zero. Os elementos são:

- Resistência elétrica do cabo guarda;
- Número de apoios com ligação à terra a uma distância máxima de 1500 metros;
- Resistência à terra nos apoios onde é ligado cabo de guarda à terra;
- Número de cabos de guarda ligados à malha de terra da subestação.

Após a introdução de todos os dados que traduzem as características do pior defeito, as características do fator de divisão de corrente, as características do solo e as características da estrutura da malha é executado o algoritmo de otimização através do botão representado na figura A.7.

No caso dos dados inseridos levarem a um dimensionamento inválido, que ocorre devido às limitações técnicas de instalação dos condutores da malha de terra para um espaçamento inferior a 2 metros, é apresentada uma mensagem a sugerir para alterar os dados inicialmente introduzidos.



Figura A.9 - Mensagem informativa fornecida pelo PORT quando os dados inseridos levam a um dimensionamento inválido.

Quando não aparecer qualquer mensagem, quer dizer que os resultados obtidos são válidos e que todos os critérios de segurança e de instalação da malha estão assegurados.

Após o dimensionamento e otimização, estar concluído o PORT apresenta os seguintes resultados:

- Tensão toque tolerável [V];
- Tensão passo tolerável [V];
- Tensão da malha [V];
- Tensão de passo [V];
- Resistência da malha de terra [Ω];
- GPR [V];
- Corrente na malha de terra [A];
- Espaçamento dos condutores segundo eixo do "x" e do "y", D_x e D_y respetivamente [m];
- Número de elétrodos utilizado;
- Comprimento de cada elétrodo [m];
- Seção dos condutores [mm^2];
- Comprimento total dos condutores [m].

Além dos resultados, é apresentada uma representação gráfica da estrutura da malha de terra e da localização dos elétrodos verticais. A figura A.10, mostra um exemplo do aspeto da interface gráfica após efetuado o dimensionamento e otimização de uma malha de terra.

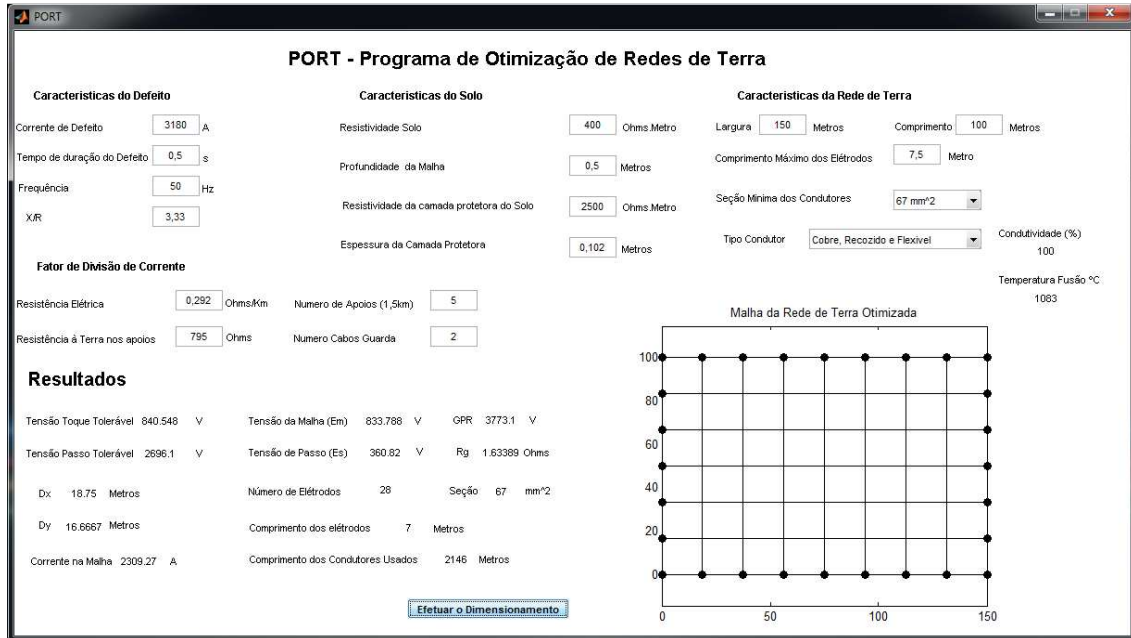


Figura A.10 - Exemplo da Interface gráfica, após realização do dimensionamento.

Quando o utilizador pretender sair da interface gráfica, pode o fazer recorrendo ao X apresentado no canto superior direito, que lançará uma mensagem a perguntar se pretende sair do programa, como mostra a figura A.11. Após a confirmação a interface é fechada.

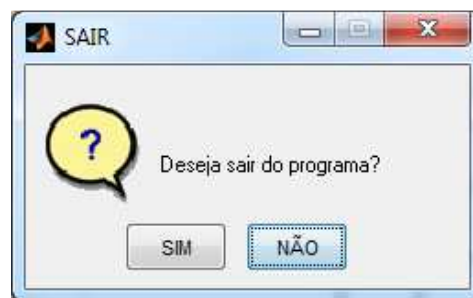


Figura A.11 - Mensagem para confirmar o desejo de saída da interface gráfica.

A.7. Influência da Profundidade e Espaçamento dos Condutores na Tensão da Malha e de Passo

Este anexo tem como objetivo apresentar um estudo realizado sobre a influência da profundidade e do espaçamento entre condutores na tensão da malha e de passo, utilizando os métodos de cálculo apresentados pelo IEEE Std 80.

O estudo é realizado partindo do exemplo B.1 do anexo B do IEEE Std 80 [1], que considera as seguintes características:

- Comprimento da malha: 70 [m];
- Largura da malha: 70 [m];
- Não é utilizado elétrodos verticais.
- Corrente de defeito: 3180 [A];
- Seção do material condutor utilizado: 67 [mm²];
- Tipo de material utilizado: Cobre Rígido;
- Resistividade do solo: 400 [$\Omega \cdot m$];
- Fator de divisão de corrente: 0,6.

O fator de divisão de corrente foi adaptado para utilização da equação (A.19), obtendo-se um $Z_{eq} = 4,17\Omega$. Esta adaptação permite que o fator de divisão de corrente varie com a resistência da malha de terra.

Estas características da malha de terra vão se manter constantes durante a realização do estudo.

É importante salientar que o cálculo da tensão da malha e de passo é obtido considerando que a corrente é uniforme e que no canto da malha de terra é local mais desfavorável, devido a ser considerada uma resistividade uniforme no solo e um espaçamento constante entre os condutores.

Utilizando os dados apresentados anteriormente e considerando que durante a variação da profundidade de instalação da malha de terra o espaçamento entre os condutores mantém-se constante, calculou-se a máxima tensão da malha, que permitiu obter os gráficos apresentados na figura A.12.

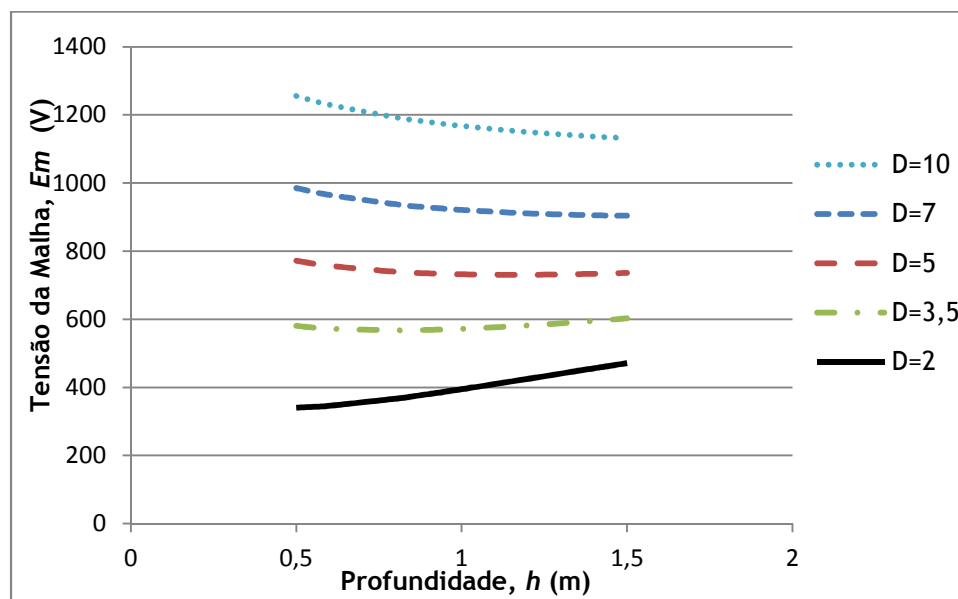


Figura A.12 - Variação da tensão da malha com a profundidade e com o espaçamento.

Analisando o gráfico da figura A.12, é possível verificar que para espaçamentos entre condutores elevados a tensão da malha diminui com o aumento da profundidade. No entanto, quando a malha tem o espaçamento mais pequeno entre os condutores a tensão da malha aumenta com a profundidade da sua instalação.

Esta variação da tensão da malha é justificada pela sensibilidade que o fator geométrico da malha (K_m), apresenta quando se manipula o espaçamento e a profundidade da malha de terra, como se pode verificar nas tabelas A.2 à A.6. Analisando a equação (5.7), verifica-se que apresenta uma forte dependência de D (espaçamento entre condutores) e h (profundidade da malha). Quando D toma valores baixos, o valor de K_m tem tendência a aumentar com a profundidade de instalação da malha de terra, pois o numerador começa superiorizar-se ao denominador levando a um aumento da tensão da malha. No entanto acontece o oposto quando a malha está com um espaçamento elevado, o aumento da profundidade leva K_m a diminuir, levando a uma diminuição da tensão da malha.

No dimensionamento verifica-se que o aumento da tensão da malha implica um aumento da quantidade de condutor a utilizar na malha de terra, logo o aumento do seu custo. Este estudo mostra que o dimensionamento das redes de terra é um processo pouco linear e que cada situação deve ser dimensionada individualmente. Facilmente se verifica que a manipulação das várias variáveis permite obter várias soluções para o dimensionamento da malha de terra, este estudo sugere que em cada uma delas se avaliem as vantagens económicas e técnicas para cada situação.

Utilizando o mesmo dados referidos anteriormente, foi determinado o comportamento da tensão máxima de passo para um espaçamento constante entre os condutores e variando a profundidade de instalação da malha de terra.

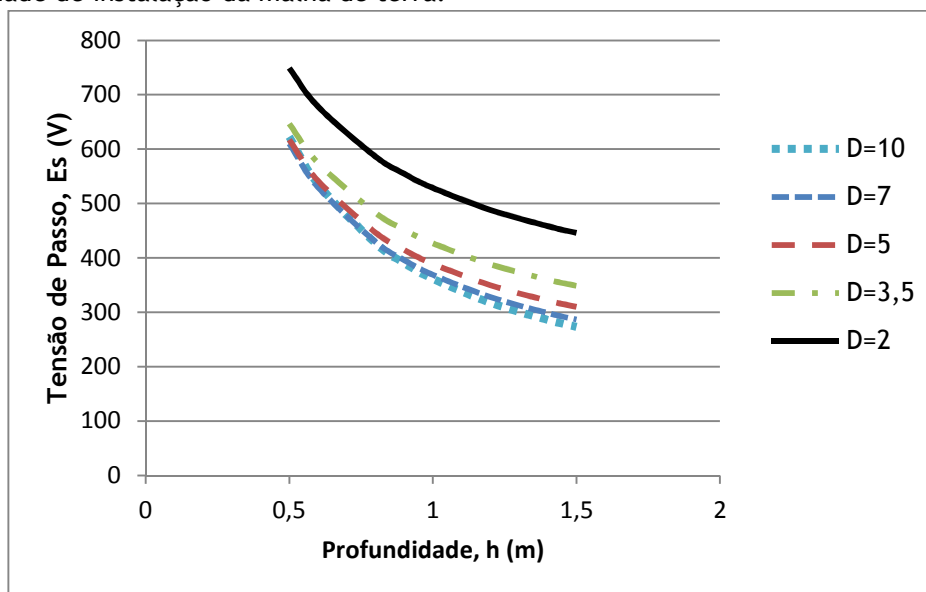


Figura A.13 - Variação da tensão de passo com a profundidade e com o espaçamento.

A figura A.13, mostra que a tensão de passo diminui com a profundidade e aumenta com diminuição do espaçamento entre condutores. O seu comportamento mostra-se mais previsível que o da tensão da malha.

Foi verificado ao longo da dissertação que a tensão de passo normalmente não introduz qualquer problema para o dimensionamento das redes de terra.

Nas tabelas seguintes são apresentados os valores que permitiram obter os gráficos apresentados na figura A.12 e A.13.

Tabela A.2 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 10m.

D (m)	h (m)	K_h	L_P (m)	L_C (m)	n	K_{ii}	K_i	K_m	R_g (Ω)	S_f	E_m (V)	K_S	E_S (V)
10	0,5	1,22	280	1120	8	0,5	1,83	1,021	2,8731	0,592	1255,5	0,38	622,8
10	0,6	1,26	280	1120	8	0,5	1,83	0,999	2,8655	0,593	1230,03	0,327	536
10	0,8	1,34	280	1120	8	0,5	1,83	0,967	2,8505	0,594	1193,1	0,26	427,1
10	0,9	1,38	280	1120	8	0,5	1,83	0,955	2,8432	0,595	1179,33	0,237	390,7
10	1	1,41	280	1120	8	0,5	1,83	0,945	2,8359	0,595	1167,78	0,219	361,6
10	1,2	1,48	280	1120	8	0,5	1,83	0,928	2,8217	0,596	1149,74	0,192	317,7
10	1,4	1,55	280	1120	8	0,5	1,83	0,916	2,8077	0,598	1136,73	0,173	286,1
10	1,5	1,58	280	1120	8	0,5	1,83	0,911	2,8009	0,598	1131,68	0,165	273,4

Tabela A.3 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 7m.

D (m)	h (m)	K_h	L_P (m)	L_C (m)	n	K_{ii}	K_i	K_m	R_g (Ω)	S_f	E_m (V)	K_S	E_S (V)
7	0,5	1,22	280	1540	11	0,57	2,27	0,874	2,7757	0,6	985,268	0,406	610,2
7	0,6	1,26	280	1540	11	0,57	2,27	0,856	2,7681	0,601	965,221	0,353	530,2
7	0,8	1,34	280	1540	11	0,57	2,27	0,83	2,7531	0,602	937,851	0,285	429,8
7	0,9	1,38	280	1540	11	0,57	2,27	0,82	2,7458	0,603	928,439	0,263	396,1
7	1	1,41	280	1540	11	0,57	2,27	0,813	2,7385	0,604	921,057	0,244	369,1
7	1,2	1,48	280	1540	11	0,57	2,27	0,802	2,7243	0,605	910,93	0,217	328,2
7	1,4	1,55	280	1540	11	0,57	2,27	0,796	2,7103	0,606	905,408	0,197	298,7
7	1,5	1,58	280	1540	11	0,57	2,27	0,794	2,7035	0,607	903,971	0,189	286,8

Tabela A.4 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 5m.

D (m)	h (m)	K_h	L_P (m)	L_C (m)	n	K_{ii}	K_i	K_m	R_g (Ω)	S_f	E_m (V)	K_S	E_S (V)
5	0,5	1,22	280	2100	15	0,64	2,86	0,734	2,7064	0,606	771,747	0,44	617
5	0,6	1,26	280	2100	15	0,64	2,86	0,719	2,6988	0,607	757,067	0,386	541,7
5	0,8	1,34	280	2100	15	0,64	2,86	0,701	2,6839	0,608	739,602	0,317	446,8
5	0,9	1,38	280	2100	15	0,64	2,86	0,695	2,6765	0,609	734,874	0,294	414,9
5	1	1,41	280	2100	15	0,64	2,86	0,692	2,6693	0,61	732,047	0,276	389,1
5	1,2	1,48	280	2100	15	0,64	2,86	0,689	2,655	0,611	730,713	0,248	350
5	1,4	1,55	280	2100	15	0,64	2,86	0,691	2,6411	0,612	733,607	0,227	321,6
5	1,5	1,58	280	2100	15	0,64	2,86	0,692	2,6342	0,613	736,239	0,219	310,1

Tabela A.5 – Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de 3,5m.

D (m)	h (m)	K_h	L_P (m)	L_C (m)	n	K_{ii}	K_i	K_m	R_g (Ω)	S_f	E_m (V)	K_S	E_S (V)
3,5	0,5	1,22	280	2940	21	0,7	3,75	0,585	2,652	0,611	580,653	0,489	646,8
3,5	0,6	1,26	280	2940	21	0,7	3,75	0,576	2,6444	0,612	572,495	0,434	574,7
3,5	0,8	1,34	280	2940	21	0,7	3,75	0,57	2,6294	0,613	567,518	0,364	483,1
3,5	0,9	1,38	280	2940	21	0,7	3,75	0,571	2,6221	0,614	568,809	0,34	452
3,5	1	1,41	280	2940	21	0,7	3,75	0,573	2,6148	0,615	571,853	0,321	426,8
3,5	1,2	1,48	280	2940	21	0,7	3,75	0,582	2,6006	0,616	581,773	0,291	388,4
3,5	1,4	1,55	280	2940	21	0,7	3,75	0,594	2,5867	0,617	595,189	0,27	360,2
3,5	1,5	1,58	280	2940	21	0,7	3,75	0,601	2,5798	0,618	602,781	0,261	348,7

Tabela A.6 — Variação da tensão da malha e de passo com a profundidade para um espaçamento de $2m$.

D (m)	h (m)	K_h	L_P (m)	L_C (m)	n	K_{ii}	K_i	K_m	R_g (Ω)	S_f	E_m (V)	K_S	E_S (V)
2	0,5	1,22	280	5040	36	0,79	5,97	0,366	2,5953	0,616	340,511	0,605	749,2
2	0,6	1,26	280	5040	36	0,79	5,97	0,372	2,5877	0,617	346,016	0,547	678,2
2	0,8	1,34	280	5040	36	0,79	5,97	0,394	2,5727	0,619	366,956	0,472	586,4
2	0,9	1,38	280	5040	36	0,79	5,97	0,407	2,5654	0,619	380,291	0,446	554,7
2	1	1,41	280	5040	36	0,79	5,97	0,422	2,5581	0,62	394,672	0,424	528,7
2	1,2	1,48	280	5040	36	0,79	5,97	0,454	2,5439	0,621	425,042	0,391	488,4
2	1,4	1,55	280	5040	36	0,79	5,97	0,486	2,53	0,622	455,993	0,366	458,4
2	1,5	1,58	280	5040	36	0,79	5,97	0,502	2,5231	0,623	471,334	0,356	446