



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



OPTIMIZAÇÃO DE TERRAS EM SUBESTAÇÕES

NUNO JORGE LOPES FILIPE

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

Júri

Presidente: Prof Paulo José da Costa Branco

Orientadores: Prof^a Maria Teresa Nunes Padilha Castro Correia de Barros

Prof^a Maria Eduarda de Sampaio Pinto de Almeida Pedro

Vogais: Prof António Carlos Sepúlveda Machado e Moura

Outubro, 2011

RESUMO

A optimização de malhas de terra em subestações é uma problemática que tem vindo a assumir uma importância cada vez maior, uma vez que se procura reduzir a quantidade de material condutor enterrado, ao mesmo tempo que se tem de garantir um escoamento eficaz e seguro da corrente em caso de defeito à terra.

No âmbito deste trabalho desenvolveu-se um programa que, partindo do projecto de uma malha de terra, aplica um método de optimização capaz de reduzir o material condutor utilizado, tendo sempre presente a questão da segurança na subestação. O método combina duas técnicas: técnica de espaçamento variável desenvolvida por Sverak, que está bem consolidada e que apresenta provas dadas no que respeita a resultados; e colocação de estacas, temática esta pouco explorada mas que vai neste trabalho ser estudada em detalhe, sendo comprovada a sua eficácia.

A optimização apoia-se numa metodologia de análise, baseada no trabalho de Dawalibi e Mukhedkar, capaz de inferir sobre a segurança da malha de terra, através do cálculo das tensões de passo e toque. Este método de análise, também desenvolvido neste trabalho, tem em conta a distribuição não uniforme da corrente, a estratificação do solo (2 camadas) e a consideração de estacas (embora limitadas à primeira camada de solo). Todas estas potencialidades serão exploradas através de vários estudos a partir dos quais se retiram informações muito relevantes para a temática em que se insere este trabalho.

ABSTRACT

The optimization of the design of substation grounding grids is an issue that has assumed an increasing importance, since it seeks to reduce the amount of conductive material buried at the same time it must ensure an effective and safe flow of the ground fault current through the soil.

In this work it has been developed a program that, starting from a standard grounding grid project, apply an optimization method that has the potential to reduce the conductive material used, while keeping the security at the substation. The method combines two techniques: variable spacing technique developed by Sverak, which is well established and has proven results, and placement of grounding rods, a technique that has been little explored in the literature but will be studied in detail in this work and its effectiveness will be proven.

The optimization is supported by an analysis methodology, based on the work done by Dawalibi and Mukhedkar, and has the potentiality to infer about the grounding grid safety, by calculating the step and touch voltages. The analysis method, also developed in this work, takes into account the non-uniform current distribution, the soil stratification (2 layers) and the consideration of grounding rods (although limited to the soil's first layer). All these possibilities will be explored through several studies, from which will be extracted very relevant information to the theme in which this work fits.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. ENQUADRAMENTO	3
2.1 Papel do sistema de terra de uma subestação	3
2.2 Visão geral sobre metodologias de cálculo de potencial	6
2.3 Visão geral sobre métodos de optimização	8
3. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DA MALHA DE TERRA	10
3.1 Programa de cálculo dos potenciais à superfície – Escoamento uniforme da corrente	10
3.2 Programa de cálculo dos potenciais à superfície – Escoamento não uniforme da corrente	17
3.3 Cálculo da resistência de malha – Método <i>Multistep</i>	18
3.4 Validação dos resultados	20
3.5 Comparação dos métodos: distribuição de corrente uniforme vs distribuição de corrente não uniforme	25
4. APLICAÇÕES DO MÉTODO DE CÁLCULO DO POTENCIAL	31
4.1 Estudo da influência da profundidade de enterramento nos resultados	32
4.2 Estudo da influência da resistividade da segunda camada nos resultados	33
5. METODOLOGIAS DE OPTIMIZAÇÃO	39
5.1 Método de Sverak (técnica de espaçamento variável)	39
5.1.1 Descrição do método	39
5.1.2 Aplicação do método (caso de estudo)	41
5.2 Colocação de estacas verticais	45
5.2.1 Descrição da técnica	45
5.2.2 Aplicação da técnica (caso de estudo)	47
5.2.2.1 Diferentes configurações de colocação de estacas	47
5.2.2.2 Diferentes comprimentos de estacas	50
5.3 Método de optimização desenvolvido	52
5.3.1 Fluxograma e descrição do método	52
5.3.2 Exemplo de aplicação	54
5.4 Comparação entre o método desenvolvido e as técnicas que o constituem	60
6. ESTUDOS DE OPTIMIZAÇÃO	61
6.1 Caso base	61
6.2 Influência das características do solo nos resultados	64
6.3 Influência da profundidade de enterramento nos resultados	67
6.4 Influência da geometria da malha nos resultados	71
6.5 Influência do valor da corrente injectada nos resultados	74
6.6 Influência do espaçamento entre condutores nos resultados	77
7. CONCLUSÃO	79

7.1 Direcções de trabalho futuro	80
ANEXO 1 – Manual do Programa	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Correspondência entre os sistemas de coordenadas utilizados	13
Tabela 3.2 - Configurações testadas	22
Tabela 3.3 - Dados da malha de terra destinada ao estudo da não uniformidade do escoamento da corrente pela malha.....	25
Tabela 3.4 - Factor de não uniformidade da corrente para diferentes espaçamentos entre condutores	29
Tabela 4.1 - Dados da malha de terra 11x11.....	31
Tabela 4.2 - Influência da variação da profundidade de enterramento nos resultados	32
Tabela 4.3 - Influência da variação de ρ_2 nos resultados	33
Tabela 4.4 - Resultados da malha para diferentes valores de ρ_2 e de h	36
Tabela 5.1 - Dados da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável	41
Tabela 5.2 - Resultados da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável	41
Tabela 5.3 - Resultados da malha de estudo otimizada segundo Sverak.....	43
Tabela 5.4 - Resistência de malha e Tensão de Toque para várias configurações de malha (retirado de [6]).....	45
Tabela 5.5 - Dados para a malha da figura 5.8.....	46
Tabela 5.6 - Resultados das malhas com diferentes configurações de estacas	49
Tabela 5.7 - Resultados obtidos para a malha com estacas de diferentes tamanhos	50
Tabela 5.8 - Dados da malha de estudo do método de optimização desenvolvido	54
Tabela 5.9 - Resultados da malha de estudo do método de optimização desenvolvido	54
Tabela 5.10 - Resultados da malha de estudo otimizada em termos de espaçamento	55
Tabela 5.11 - Configurações testadas e resultados obtidos para $I=3500$ A	55
Tabela 5.12 - Resultados para a malha de estudo otimizada em espaçamento e considerando $I=2500$ A	56
Tabela 5.13 - Configurações testadas e resultados obtidos para $I=2500$ A	57
Tabela 5.14 - Resultados para a malha de estudo otimizada em espaçamento e considerando $I=4500$ A	58
Tabela 5.15 - Configurações testadas e resultados obtidos para $I=4500$ A	58
Tabela 5.16 - Configurações tipo testadas no método de optimização desenvolvido	59
Tabela 6.1 - Dados da malha do caso base	61
Tabela 6.2 - Resultados da optimização da malha 0 (geometria)	63
Tabela 6.3 - Resultados da optimização da malha 0 (grandezas eléctricas)	63
Tabela 6.4 - Influência das características do solo nos resultados da optimização (geometria) 64	
Tabela 6.5 - Influência das características do solo nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)	64
Tabela 6.6 - Influência da profundidade de enterramento nos resultados da optimização (geometria).....	67

Tabela 6.7 - Influência da profundidade de enterramento nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)	67
Tabela 6.8 - Resultados da malha 7 sub-optimizada (geometria)	70
Tabela 6.9 - Resultados da malha 7 sub-optimizada (grandezas eléctricas)	70
Tabela 6.10 - Influência da geometria nos resultados da optimização (geometria)	71
Tabela 6.11 - Influência da geometria nos resultados da optimização (grandezas eléctricas) ..	71
Tabela 6.12 - Influência do valor de corrente injectada nos resultados da optimização (geometria)	74
Tabela 6.13 - Influência do valor de corrente injectada nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)	74
Tabela 6.14 - Influência do espaçamento entre condutores nos resultados da optimização (geometria)	77
Tabela 6.15 - Influência do espaçamento entre condutores nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação dos conceitos de tensão de toque (1) e de tensão de passo (2)	4
Figura 2.2 - Esquema equivalente para a determinação da tensão de toque	4
Figura 2.3 - Esquema equivalente para a determinação da tensão de passo	6
Figura 2.4 - (a) Malha de Terra igualmente espaçada; (b) Malha de Terra com a aplicação da taxa de não uniformidade de espaçamento entre condutores	8
Figura 3.1 – Referenciais xoy à superfície da terra e uo'w à profundidade do condutor	10
Figura 3.2 - Método das Imagens	11
Figura 3.3 - Coordenadas do eléctrodo j e do ponto M	11
Figura 3.4 - Condutor Horizontal (visão de topo)	12
Figura 3.5 - Método Integral – condutor horizontal	14
Figura 3.6 - Método Integral – Condutor Horizontal	14
Figura 3.7 - Método Integral – Condutor não Horizontal	16
Figura 3.8 - Exemplo de uma Malha de Terra	17
Figura 3.9 - Escolha do coeficiente δ para o pressuposto B	21
Figura 3.10 - Eléctrodo I – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos	22
Figura 3.11 - Eléctrodo II – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos	23
Figura 3.12 - Eléctrodo III – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos	23
Figura 3.13 - Eléctrodo IV – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos	23
Figura 3.14 - Eléctrodo I – Potencial à superfície	24
Figura 3.15 - Eléctrodo II – Potencial à superfície	24
Figura 3.16 - Eléctrodo III – Potencial à superfície	24
Figura 3.17 - Eléctrodo IV – Potencial à superfície	24
Figura 3.18 - Malha de terra destinada ao estudo da distribuição de corrente na malha	25
Figura 3.19 - Factores de distribuição de densidade de corrente, considerando distribuição de corrente não uniforme - malha base	26
Figura 3.20 - Perfil segundo x ($y=-20$), distribuição de corrente uniforme	26
Figura 3.21 - Perfil segundo x ($y=-20$), distribuição de corrente não uniforme	26
Figura 3.22 - Factores de distribuição de densidade de corrente - malha não igualmente espaçada	27
Figura 3.23 - Factores de distribuição de densidade de corrente - malha rectangular	28
Figura 3.24 - Resultados da tabela 3.4 sob a forma de gráfico	29
Figura 4.1 - Malha de terra 11x11 - caso de estudo	31
Figura 4.2 – Perfis de potencial segundo x ($y=-10m$) para diferentes profundidades de enterramento	32

Figura 4.3 - Perfis de potencial segundo x ($y=-10\text{m}$) para diferentes valores de ρ_2	34
Figura 4.4 - Tensão de toque em função de ρ_2	34
Figura 4.5 - Tensão de passo em função de ρ_2	34
Figura 4.6 - Resistência de terra em função de ρ_2	34
Figura 4.7 - Resistência de terra normalizada em função de ρ_2 , para diferentes espessuras da primeira camada	37
Figura 4.8 - Tensão de passo normalizada em função de ρ_2 , para diferentes espessuras da primeira camada	37
Figura 4.9 - Tensão de toque normalizada em função de ρ_2 , para diferentes espessuras da primeira camada	37
Figura 5.1 - Malha de estudo para a técnica de espaçamento variável	41
Figura 5.2 - Plot 3D da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável	41
Figura 5.3 – (a) – Perfil de potencial segundo x da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável; (b) – Perfil de potencial segundo y da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável	42
Figura 5.4 - Malha de estudo otimizada em espaçamento	42
Figura 5.5 - Plot 3D da malha de estudo otimizada em espaçamento	43
Figura 5.6 - (a) – Perfil de tensão para a malha otimizada segundo x; (b) – Perfil de tensão para a malha otimizada segundo y	44
Figura 5.7 - Malha de terra com eléctrodos adicionais no perímetro (retirado de [1]).....	45
Figura 5.8 - Malha de terra com valores relativos da densidade de corrente nos segmentos da malha e nas estacas	46
Figura 5.9 - Malha com estacas na periferia Configuração 1	47
Figura 5.10 - Malha com estacas em toda a área Configuração 2	47
Figura 5.11 - Malha com estacas na periferia, cada intersecção + meios Configuração 3	48
Figura 5.12 - Malha com estacas na periferia + 8 condutores Configuração 4	48
Figura 5.13 - Malha com estacas no canto e meios Configuração 5	48
Figura 5.14 - Representação gráfica dos resultados da tabela 5.7	50
Figura 5.15 - Fluxograma do método de optimização desenvolvido	52
Figura 5.16 - Malha de estudo do método de optimização desenvolvido	54
Figura 5.17 - Malha resultante do processo de optimização – resultado 1	56
Figura 5.18 - Malha resultante do processo de optimização – resultado 2	57
Figura 5.19 - Malha resultante do processo de optimização – resultado 3	59
Figura 6.1 - Caso base da malha de terra	61
Figura 6.2 - Malha 0 optimizada (caso base)	62
Figura 6.3 - Malha 1 optimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $h=5\text{m}$)	65
Figura 6.4 - Malha 2 optimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $h=10\text{m}$)	65
Figura 6.5 - Malha 3 optimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $h=15\text{m}$)	65
Figura 6.6 - Malha 4 optimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $h=5\text{m}$)	65
Figura 6.7 - Malha 5 optimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $h=10\text{m}$)	65

Figura 6.8 - Malha 6 otimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $h=15m$)	65
Figura 6.9 - Malha 7 otimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=0.5m$)	68
Figura 6.10 - Malha 8 otimizada ($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $e=0.5m$)	68
Figura 6.11 - Malha 9 otimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $e=0.5m$)	68
Figura 6.12 - Malha 10 otimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=1m$)	68
Figura 6.13 - Malha 0 otimizada ($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $e=1m$).....	68
Figura 6.14 - Malha 11 otimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $e=1m$)	68
Figura 6.15 - Malha 12 otimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=1.5m$)	68
Figura 6.16 - Malha 13 otimizada ($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $e=1.5m$)	68
Figura 6.17 - Malha 14 otimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $e=1.5m$)	68
Figura 6.18 - Malha 7 sub-otimizada (limitação a 8 estacas) ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=0.5m$) ..	70
Figura 6.19 - Malha 15 otimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $l=70m$)	72
Figura 6.20 - Malha 0 otimizada ($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $l=70m$).....	72
Figura 6.21 - Malha 16 otimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $l=70m$).....	72
Figura 6.22 - Malha 17 otimizada ($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $l=91m$)	72
Figura 6.23 - Malha 18 otimizada ($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $l=91m$).....	72
Figura 6.24 - Malha 19 otimizada ($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $l=91m$).....	72
Figura 6.25 - Malha 20 otimizada ($I=1.6kA$).....	75
Figura 6.26 - Malha 0 otimizada ($I=1.8kA$).....	75
Figura 6.27 - Malha 21 otimizada ($I=2.0kA$).....	75

LISTA DE ABREVIações

I é a corrente injectada na malha [A]

ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo [$\Omega \cdot m$]

ρ_2 é a resistividade da primeira camada do solo [$\Omega \cdot m$]

h é a espessura da primeira camada do solo [m]

e é a profundidade de enterramento da malha de terra [m]

c é o comprimento da malha de terra [m]

l é a largura da malha de terra [m]

D é o espaçamento entre condutores da malha de terra [m]

d é o diâmetro dos condutores da malha de terra [m]

L é o comprimento total de material condutor da malha de terra [m]

C_s é um factor correctivo para calcular a resistência de pé efectiva na presença de uma camada finita de material à superfície do solo [$\Omega \cdot m$]

ρ_s é a espessura da camada de material à superfície [m]

t_s é a duração da corrente de defeito [s]

R_f é a resistência pé-solo [Ω]

R_B é a resistência do corpo humano [Ω]

I_b é a corrente tolerável por um ser humano [A]

N_{c_x} número de condutores segundo a direcção x (comprimento)

N_{c_y} número de condutores segundo a direcção y (largura)

U_P tensão de passo [V]

$U_{P_{tol}}$ tensão de passo tolerável [V]

$U_{P_{Max}}$ tensão de passo máxima [V]

U_T tensão de toque [V]

$U_{T_{tol}}$ tensão de toque tolerável [V]

$U_{T_{Max}}$ tensão de toque máxima [V]

V_{malha} potencial de malha [V]

1. INTRODUÇÃO

As subestações de energia são pontos de concentração de energia eléctrica, centros de comando determinantes para assegurar o fornecimento e continuidade de serviço. São locais onde se encontram equipamentos dispendiosos e de grande importância na rede eléctrica e cenário de constantes operações de manutenção levadas a cabo por seres humanos. Por todas estas razões é fundamental uma correcta ligação à terra que se fará por meio de um sistema denominado malha de terra. Esta é responsável pelo escoamento de correntes indesejáveis, quer estas tenham origem interna ao sistema de energia (curto-circuitos, alteração da topologia da rede, etc.) quer sejam originadas por factores externos (descargas atmosféricas); controla a distribuição do potencial eléctrico à superfície da terra, que se origina devido à presença de corrente na terra; e recebe as ligações das massas metálicas de todos os equipamentos da subestação. Destas funções destaca-se o controlo da distribuição de potencial à superfície por estar intimamente ligado à segurança das pessoas, pois o escoamento far-se-á de forma segura se os potenciais criados à superfície conduzirem a tensões de passo e toque inferiores aos valores máximos toleráveis pelo corpo humano. Por tudo isto, é fundamental o correcto dimensionamento da malha de terra, de forma a garantir-se a segurança de pessoas e equipamentos.

Ao longo dos anos tem havido uma preocupação crescente com a questão da optimização das malhas de terra. A optimização de um sistema de terra pode ter dois objectivos distintos: a malha não sendo segura, o objectivo será fazer com que ela cumpra os valores toleráveis para as tensões de passo e toque; se a malha já for segura o objectivo será tentar reduzir a quantidade de material condutor enterrado, de forma a reduzir os custos de construção do sistema de terra, sem comprometer a segurança. Esta última questão tem assumido uma real importância nos tempos que correm, devido à situação de dificuldade económica em que o país se encontra.

No âmbito deste trabalho foi produzido um *software* capaz de analisar e optimizar malhas de terra. O programa foi realizado em *Matlab* e recebeu o nome de OPTIMA. Permite analisar malhas de terra já construídas, em termos de distribuição de potencial à superfície e obtenção das tensões de passo e toque o que permite inferir sobre a sua segurança ou não. O método utilizado para a análise dos perfis de potencial considera a situação de distribuição de densidade de corrente não uniforme ao longo da malha. Os métodos apresentados na maioria da literatura fazem a aproximação de que a corrente de defeito se distribui uniformemente pela malha. Mas essa situação não representa com exactidão a realidade, uma vez que a distribuição da corrente de defeito pelos vários condutores constituintes do sistema varia dependentemente da proximidade entre condutores paralelos, do cruzamento de condutores bem como do ângulo entre condutores. Para além disso o método de análise permite considerar solo uniforme ou estratificado em duas camadas e também a colocação de estacas

verticais em várias configurações distintas, sendo que se considera apenas a sua colocação na primeira camada.

O método de optimização utilizado e que constitui a mais-valia deste trabalho utiliza duas técnicas distintas. Por um lado, usa a técnica de espaçamento variável desenvolvida por Sverak, com umas ligeiras modificações, por outro usa a colocação de estacas verticais, o que constitui outro método importante de optimização. A técnica de espaçamento variável modifica o espaçamento entre condutores, levando o material condutor do centro para a periferia, onde se verificam as maiores densidades de corrente. A colocação de estacas permite um escoamento mais eficaz da corrente em profundidade. Estas duas técnicas são assim combinadas num método de optimização que tem como objectivo encontrar a malha que use o mínimo material condutor possível e que ao mesmo tempo respeite os valores limite para as tensões de passo e toque.

Este trabalho apresenta um conjunto de estudos do comportamento das malhas de terra, para várias configurações das mesmas e para diferentes estruturas de solo. Para além disso explora várias de técnicas de optimização, que são usadas em situações reais de projecto, oferecendo uma análise detalhada dos resultados ao mesmo tempo que procura explicar fisicamente os fenómenos. No capítulo 2 faz-se um enquadramento ao tema da segurança em subestações, aos métodos de análise de potencial criado à superfície e aos métodos de optimização existentes. No capítulo 3 explica-se o procedimento de análise de malhas de terra, descreve-se dois dos métodos utilizados, sendo que o primeiro considera corrente uniforme ao longo da malha e o segundo considera que a corrente é variável de segmento para segmento. De seguida faz-se um estudo comparativo dos dois métodos e explica-se as razões que levaram à escolha do segundo como método de análise implementado. No capítulo 4 utiliza-se o método de análise de malhas para estudar a influência que certos parâmetros têm no comportamento das mesmas. No capítulo 5 introduz-se o tema da optimização, começando por descrever as técnicas que constituem o método desenvolvido. De seguida explica-se esse método e apresenta-se um exemplo da sua aplicação. No capítulo 6 usa-se o método de optimização para fazer vários estudos em que se verifica e analisa a influência que a variação de certos parâmetros tem sobre os resultados do método. Finalmente, no capítulo 7 é apresentada a conclusão do trabalho, em que se faz uma análise crítica de todos os estudos efectuados e do método desenvolvido, terminando com um conjunto de sugestões sobre como melhorar o algoritmo que se desenvolveu.

2. ENQUADRAMENTO

2.1 Papel do sistema de terra de uma subestação

O correcto dimensionamento do sistema de terra em subestações é necessário para que haja um escoamento eficaz de correntes para a terra em condições normais de funcionamento ou de defeito sem prejudicar a qualidade do serviço, assegurando-se também que uma pessoa na vizinhança das instalações não seja exposta ao perigo de choque eléctrico crítico.

Frequentemente é assumido que qualquer objecto ligado à terra, pode ser tocado em segurança, mas isso não é necessariamente garantido. Uma baixa resistência de malha não é garantia de segurança, pois uma subestação com baixa resistência de terra pode ser mais perigosa do que outra com uma resistência de terra superior, pelo que neste campo é necessário ter em conta a distribuição de potencial criada à superfície da terra. Assim sendo, se a geometria do eléctrodo, a sua localização, os parâmetros do solo ou outros factores contribuírem para um gradiente de potencial excessivo à superfície da terra, então o sistema de terra é inadequado para o pretendido.

A passagem de corrente através das partes vitais do corpo humano provoca efeitos variados conforme a duração, intensidade e frequência da corrente, sendo que a consequência mais perigosa é um fenómeno chamado fibrilação ventricular, que provoca a imediata paragem de circulação sanguínea. Este conceito é muito importante pois irá estabelecer o limite de corrente tolerável pelo corpo, ou seja, a intensidade e duração da corrente que a 50Hz ou 60Hz atravessa o corpo e que deve ser menor que o valor que causa o fenómeno.

Para uma pessoa com um peso de 50 kg a corrente tolerável é dada por (2.1).

$$I_b = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.1)$$

Em (2.1):

I_b é a máxima corrente suportada pelo corpo humano [A].

t_s é o tempo de duração da corrente que atravessa o corpo [s].

Se a pessoa possuir um peso de 70 kg a corrente tolerável é dada por (2.2).

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.2)$$

Estas duas equações, retiradas da referência [1], baseiam-se em testes limitados a um período de 0.03 s a 3.0 s, não sendo válidas para fenómenos de longa duração.

Os choques eléctricos mais nocivos são aqueles em que a circulação de corrente se faz entre uma mão e um pé (atravessando o coração), ou entre os dois pés, sendo que esta última situação é menos perigosa que a anterior. Tendo isto em mente define-se os conceitos de tensão de passo e de toque.

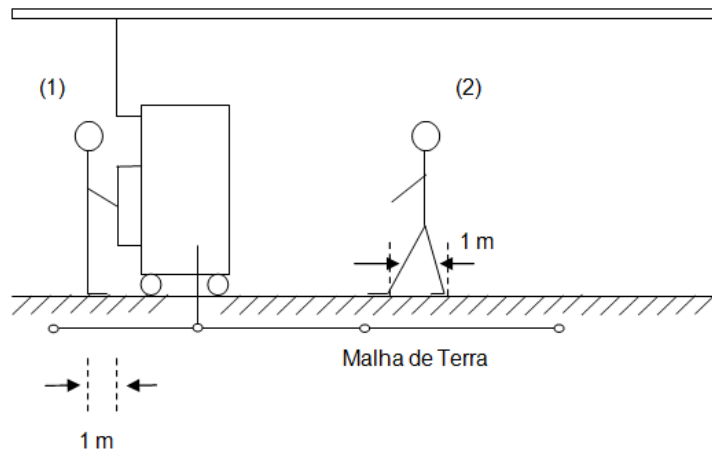


Figura 2.1 Representação dos conceitos de tensão de toque (1) e de tensão de passo (2)

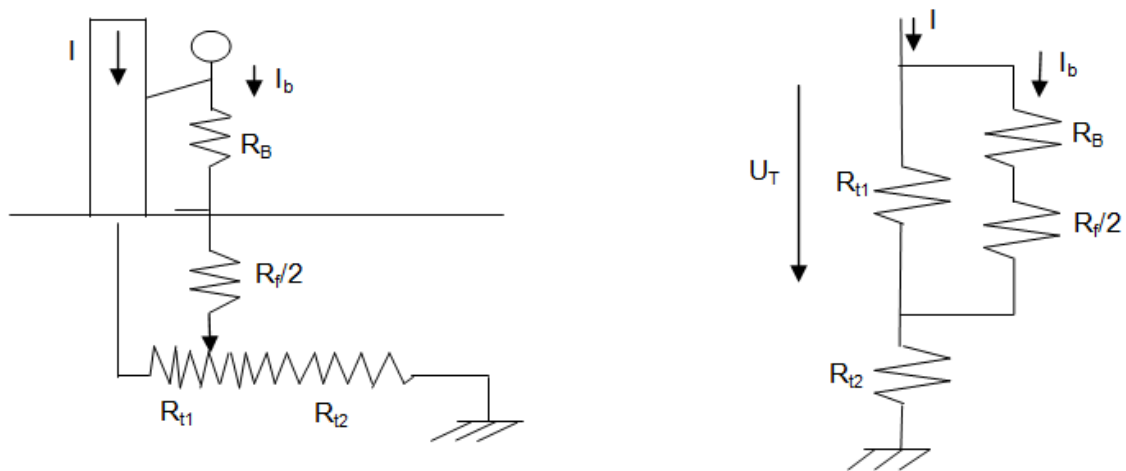


Figura 2.2 Esquema equivalente para a determinação da tensão de toque

A tensão de toque define-se como sendo a diferença entre o potencial a que o sistema de terra (malha) se encontra durante um defeito e o potencial do solo no local em que a pessoa se encontra, estando esta a tocar com a mão no equipamento que se encontre ligado ao sistema de terra.

$$U_T = V_{\text{malha}} - V_{\text{psolo}} \quad (2.3)$$

Onde

U_T é a tensão de toque [V].

V_{malha} é o potencial do sistema de terra (malha) [V].

V_{psolo} é o potencial à superfície do solo no ponto onde a pessoa se encontra [V].

$$V_{\text{malha}} = R \cdot I \quad (2.4)$$

Onde

R é a resistência do sistema de terra [Ω].

I é a corrente de defeito [A].

Estas são expressões genéricas, pelo que para o cálculo pretendido será necessário usar o esquema equivalente acima apresentado (figura 2.2). Este fenómeno pode ser assim representado por um circuito eléctrico, sendo que o corpo humano é tido como uma resistência R_B , sendo que se pode considerar o valor de $R_B = 1000 \Omega$, para efeitos de cálculo. Ao estabelecer-se a diferença de potencial, associada a este conceito, ir-se-á observar a passagem de corrente através do corpo, corrente essa que não deve passar um determinado valor limite, tal como foi referido em cima, pelo que o conceito de tensão de toque tolerável é dado por (2.5).

$$U_{Tol} = \left(R_B + \frac{R_f}{2} \right) * I_b \quad (2.5)$$

Onde R_f é a resistência pé-solo que é dada por (2.6).

$$R_f = 3 * C_s * \rho_s \quad (2.6)$$

C_s é um factor correctivo para calcular a resistência de pé efectiva na presença de uma camada finita de material à superfície do solo.

ρ_s é a resistividade da camada de material à superfície [$\Omega.m$].

É necessário introduzir o factor C_s pois frequentemente é colocada à superfície do solo, uma camada de material de alta resistividade, como gravilha, com o objectivo de aumentar a resistência de contacto entre o solo e os pés de uma pessoa que esteja na subestação.

C_s é dado por (2.7).

$$C_s = 1 - \frac{0.09(1 - \frac{\rho}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} \quad (2.7)$$

ρ é a resistividade do solo onde se encontra o eléctrodo de terra [$\Omega.m$].

h_s é a espessura da camada de material à superfície [m].

Se não existir camada superficial então $C_s = 1$ e $\rho_s = \rho$.

A tensão de passo é definida como sendo a diferença de potencial, na superfície do solo, entre os pés de uma pessoa, assumindo 1 metro de distância entre estes.

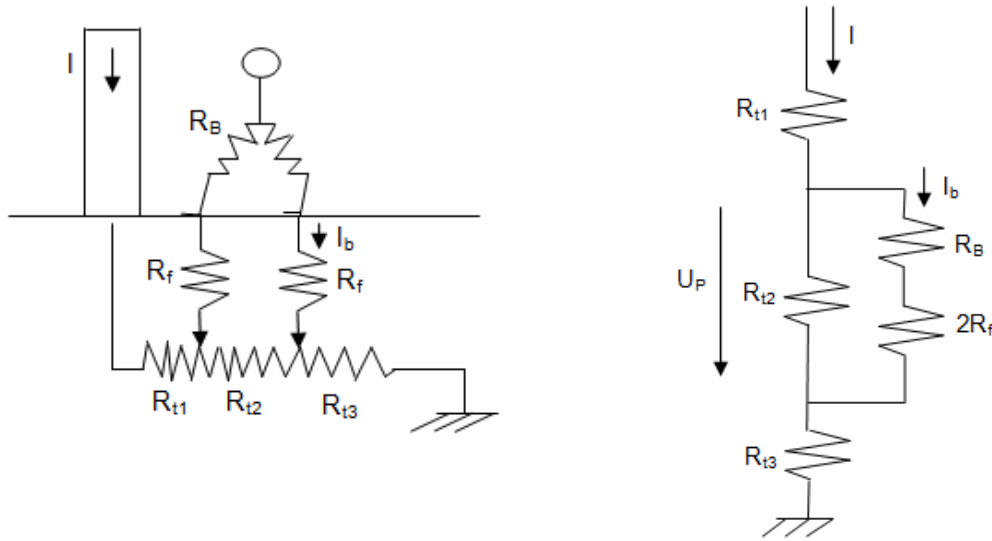


Figura 2.3 Esquema equivalente para a determinação da tensão de passo

Utilizando uma metodologia semelhante à usada para o cálculo da tensão de toque obtêm-se a expressão (2.8) para a tensão de passo tolerável.

$$U_{Ptol} = (R_b + 2R_f) \cdot I_b \quad (2.8)$$

Sendo assim para uma pessoa de 70 kg as expressões para as tensões de passo e toque toleráveis são dadas por (2.9).

$$U_{Ptol} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.9)$$

$$U_{Ttol} = (1000 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

Em (2.9) as tensões têm a unidade [V], ρ_s a unidade [$\Omega \cdot m$] e t_s [s], tal como referido anteriormente.

2.2 Visão geral sobre metodologias de cálculo de potencial

A análise das malhas de terra é uma das maiores preocupações dos engenheiros desde a construção das primeiras subestações de alta tensão. Do ponto de vista histórico a análise das malhas de terra começou como sendo uma análise experimental e/ou teórica, a partir da qual vários autores apresentaram expressões aproximadas. Essas expressões derivaram de investigações experimentais e teóricas feitas em eléctrodos horizontais singulares ou estacas verticais. Com o conhecimento retirado dessas investigações, vários autores propuseram expressões analíticas aproximadas para as malhas de terra. As expressões analíticas propostas possuem vários constrangimentos no que toca às dimensões e geometria da malha de terra, tornando-se evidente que apresentavam grandes desvantagens no que toca

à análise das complexas malhas de terra. O dimensionamento clássico de malha de terra, método IEEE [1], baseia-se nessas mesmas expressões e introduz factores correctivos para esses mesmos constrangimentos. Este método não necessita de recursos computacionais, sendo por isso de fácil utilização. Mas como tal, também apresenta várias limitações, pois não permite a análise dos potenciais à superfície da terra e só é válido para grelhas de igual espaçamento em cada sub-malha. Por estas razões, o método descrito não serve quando se pretende uma análise mais cuidada da malha de terra.

Com o aparecimento e desenvolvimento dos computadores, apareceram vários métodos que permitiam realizar uma análise mais cuidada e precisa da segurança associada à malha de terra. Sverak apresentou um método (referência [6]) que já apresentava várias vantagens em relação ao método de referência (método IEEE), pois exibia um grau de precisão satisfatório na análise de perfis de potencial na região de fronteira das malhas de terra (região crítica em termos de tensões de passo e toque). Permitia assim realizar estudos de comportamento de malhas de terra que até aí não eram possíveis, sendo que era válido para malhas com qualquer espaçamento entre sub-malhas. Apesar de tudo isto apresentava importantes limitações ao considerar densidade de corrente uniforme em toda a malha, para além de solo uniforme.

Surgiram depois outros métodos, também baseados em expressões analíticas, que possuíam várias melhorias em relação ao método de Sverak, e que se apresentavam como soluções eficazes para o dimensionamento de malhas de terra à frequência industrial (50Hz). Entre eles destaca-se o método de Heppe (referência [10]), o chamado método das correntes variáveis (MCV). É um método simples, linear e fácil de programar. Baseia-se num método matricial e permite determinar a corrente em cada um dos segmentos da malha, ou seja, não considera distribuição de corrente uniforme. Heppe desenvolve o seu método para solo uniforme, mas no final do artigo (referência [10]), refere que é possível utilizá-lo para solo de duas camadas e descreve que modificações efectuar. O facto de considerar corrente variável ao longo da malha e solo estratificado (duas camadas), o método representa um grande avanço em relação aos métodos anteriormente descritos. Outro dos autores proeminentes nesta área é Dawalibi. Este autor publicou inúmeros artigos, juntamente com outros, nomeadamente Mukhedkar, nos quais realiza vários estudos sobre eléctrodos de terra, malhas, estacas verticais (referências [2-5,7,11]). Para além disso desenvolveu um programa chamado "MALT", que permite determinar o desempenho de um sistema de terra em solo uniforme ou de duas camadas. O uso deste programa para análise de várias configurações de malha e de solo de duas camadas é observável em [11]. Este programa baseia-se em vários artigos publicados pelo autor, nos quais ele desenvolve um método que permite determinar os potenciais à superfície, considerando corrente não uniforme ao longo da malha, solo uniforme ou de duas camadas e o uso de estacas verticais (o que Heppe não considerava). O método para determinação de potenciais desenvolvido neste trabalho foi baseado nuns artigos deste mesmo autor (referências [2-5]).

Posteriormente e com o desenvolvimento dos recursos computacionais, os investigadores procuraram desenvolver métodos mais complexos e com menos simplificações. Estes derivam directamente das equações de Maxwell, isto é, são baseados em modelos electromagnéticos e resolvidos por métodos numéricos. Nesta área ganharam real importância o chamado *método dos momentos*, *MoM*, o *método dos elementos finitos*, *FEM* e o *boundary element method*, *BEM*, que constitui uma evolução do *FEM*. São métodos que envolvem uma complexidade matemática elevada e que, como tal, têm a vantagem de conduzir a resultados mais precisos.

Para a análise de malhas de terra à frequência industrial, os métodos baseados em expressões analíticas, nomeadamente o método de Heppe ou o de Dawalibi, constituem soluções práticas e precisas. Quando se pretende uma análise mais complexa, nomeadamente o estudo de transitórios, é necessário recorrer a métodos numéricos como os referidos anteriormente.

2.3 Visão geral sobre métodos de optimização

A optimização de malhas de terra tem sido o alvo de estudo de investigadores ao longo dos anos, que procuram reduzir a quantidade de cobre usado na construção do sistema de terra, isto sem comprometer a segurança das pessoas. Em [2], os autores introduziram o conceito do desenho óptimo de uma malha de terra num solo de duas camadas. Eles verificaram um novo método analítico de modelação do solo comparando previsões com medições reais do campo eléctrico. O método consistiu em analisar várias malhas com a mesma configuração geométrica, mas diferente número de condutores. Isto permitiu aos autores estabelecer uma correlação entre o aumento de potencial de malha, tensão de passo e toque e o número de condutores, o que lhes permitiu investigar como diferentes taxas de não uniformidade de espaçamento entrecondutores afectam esses parâmetros. A taxa de não uniformidade apenas modifica o espaçamento entre condutores e apenas isso.

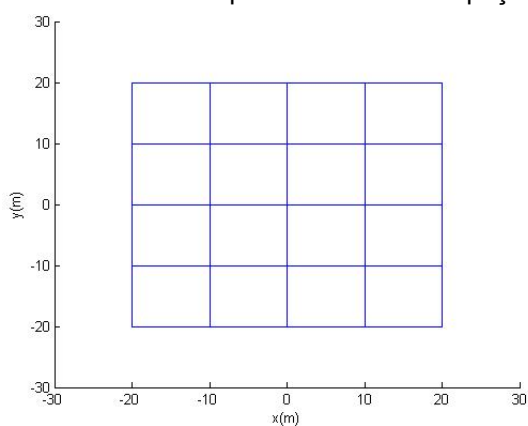


Figura 2.4 (a) Malha de Terra igualmente espaçada

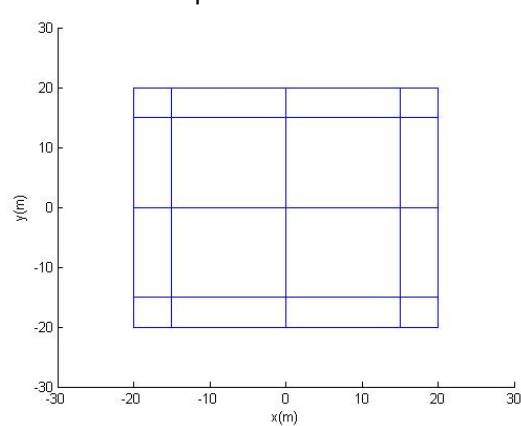


Figura 2.4 (b) Malha de Terra com a aplicação da taxa de não uniformidade de espaçamento entre condutores

A figura 2.4 (a) ilustra uma malha igualmente espaçada com 4 sub-malhas segundo cada direcção. A figura 2.4 (b) ilustra a malha anterior depois de sofrer o processo de não

uniformidade de espaçamento [3,4]. Os autores verificaram que era na periferia da malha que existiam as tensões de passo e toque mais elevadas, e com esse processo de compressão era-lhes possível reduzir as tensões de passo e toque para valores seguros.

Depois surgiu o método desenvolvido por Sverak (referência[6]), a chamada técnica de espaçamento variável, que usou os resultados de [2-4] para melhorar o procedimento anteriormente descrito, obtendo-se melhores resultados. Esta técnica será usada neste trabalho, ainda que sofrendo algumas alterações.

Uns anos mais tarde apareceu um método muito interessante (referência [12]), que usava fórmulas baseadas em resultados práticos e que dada uma malha igualmente espaçada permitia construir uma malha nova com menos condutores e que continuava a respeitar os valores de segurança. A esta malha final seria aplicada um processo de não uniformidade de espaçamento que fora desenvolvido pelos autores. Apesar de este método ser inovador, apresentava a desvantagem de apenas poder ser aplicado a malhas com um elevado número de condutores.

Posteriormente foram aparecendo novas técnicas de otimização usando algoritmos genéticos mas continuando a usar a técnica de não uniformidade de espaçamento como base do processo de otimização.

Em relação à introdução de estacas como processo de otimização, poucos foram os autores que estudaram o tema, destacando-se Dawalibi (referência[7]). A norma do IEEE refere a utilização de estacas, mas apenas para tentar reduzir as tensões de passo e toque nas zonas mais críticas, de forma a tornar esses valores seguros.

O método desenvolvido neste trabalho utiliza estas duas formas de otimização, aplicação da taxa de não uniformidade e introdução de estacas, de forma a tentar reduzir ao máximo a quantidade de cobre utilizado, reduzindo assim os custos e continuando a respeitar os valores toleráveis para as tensões de passo e toque, mantendo assim a segurança na subestação.

3. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DA MALHA DE TERRA

O método utilizado para cálculo do potencial criado à superfície pelo escoamento de uma corrente para a malha de terra baseia-se em artigos de Dawalibi e Mukhedkar, referências [2-5]. O método possui a capacidade de calcular o potencial à superfície provocado por uma malha com configuração quadrada ou rectangular, com condutores igualmente espaçados ou não, considerando distribuição de corrente não uniforme ao longo da malha. O modelo de solo utilizado encontra-se estratificado em duas camadas.

O método divide-se em duas partes:

1. Determinar os factores de distribuição da densidade de corrente, no qual será utilizado o método matricial, descrito em [5];
2. Usar esses factores para obter o potencial em qualquer ponto à superfície do solo, fórmulas do potencial descritas em [2].

Quando se refere densidade de corrente, é o fluxo de corrente que se escoar para a terra por unidade de comprimento de condutor do eléctrodo.

Para a primeira parte será necessário calcular os potenciais nos condutores devido às correntes que se escoam nos outros, sendo que as fórmulas utilizadas serão as mesmas da segunda parte, pois estas permitem determinar o potencial provocado por um condutor em qualquer ponto. Pelo que se começará a explicar a metodologia usada para obter essas fórmulas, referência [2].

3.1 – Programa de cálculo dos potenciais à superfície – Escoamento uniforme da corrente

Potencial criado por um eléctrodo fonte

Considere-se um eléctrodo infinitesimal j (eléctrodo fonte) cujas coordenadas com respeito ao referencial x, y, z são x_j, y_j, z_j . O eléctrodo j está localizado no eixo u do sistema de coordenadas uvw (figura 3.1).

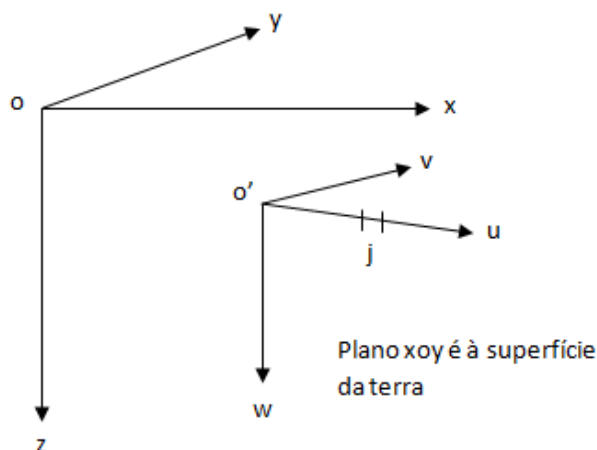


Figura 3.1 – Referenciais xoy à superfície da terra e $u'vw$ à profundidade do condutor.

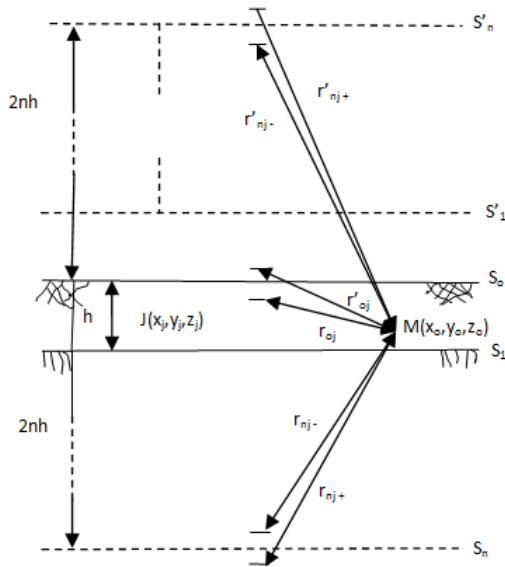


Figura 3.2 - Método das Imagens

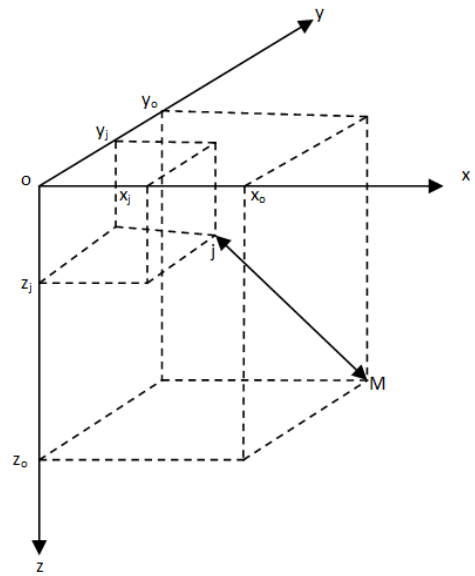


Figura 3.3 - Coordenadas do eléctrodo j e do ponto M

O eléctrodo está a injectar a corrente I_j no solo. Se o comprimento do eléctrodo for du obtêm-se a expressão (3.1).

$$I_j = i_j du \quad (3.1)$$

i_j é a corrente do eléctrodo por unidade de comprimento [A/m].

O potencial no ponto M cujas coordenadas são x_0, y_0, z_0 (ou u_0, v_0, w_0) podem ser calculadas pelo método das imagens que consiste no seguinte: o potencial num determinado ponto resulta da contribuição da fonte pontual e da sua imagem, mas no caso de duas camadas ter-se-á um número infinito de imagens, sendo que cada uma delas contribui para o potencial nesse ponto, como se vê pela figura 3.2. Desta forma, pode-se mostrar que o potencial num qualquer ponto na camada superior de um solo de duas camadas é dado pela (figura 3.2 e 3.3) expressão (3.2).

$$dV_j = \frac{\rho_1 i_j du}{4\pi} \left[\frac{1}{r_{oj}} + \frac{1}{r'_{oj}} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{r_{nj-}} + \frac{1}{r'_{nj-}} + \frac{1}{r_{nj+}} + \frac{1}{r'_{nj+}} \right) \right] \quad (3.2)$$

ρ_1 é a resistividade da primeira camada [$\Omega \cdot m$].

$k = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ é o coeficiente de reflexão.

ρ_2 é a resistividade da segunda camada [$\Omega \cdot m$].

As expressões de (3.3) explicitam o significado dos termos da expressão (3.2).

$$\begin{aligned}
r_o &= [(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + (z_j - z_o)^2]^{\frac{1}{2}} \\
r'_o &= [(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + (z_j + z_o)^2]^{\frac{1}{2}} \\
r_{nj+} &= [(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh + (z_j - z_o)]^2]^{\frac{1}{2}} \\
r'_{nj+} &= [(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh + (z_j + z_o)]^2]^{\frac{1}{2}} \\
r_{nj-} &= [(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh - (z_j + z_o)]^2]^{\frac{1}{2}} \\
r'_{nj-} &= [(x_j - x_o)^2 + (y_j - y_o)^2 + [2nh - (z_j - z_o)]^2]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Potencial criado por uma malha (Método Integral)

Generalizando agora para o caso de uma malha de terra ir-se-á utilizar o método integral para o cálculo do potencial, o qual permite determinar a contribuição de cada elemento infinitesimal do condutor para o potencial. Nos cálculos que serão apresentados de seguida considera-se:

- O eléctrodo (malha) é constituído por condutores lineares ligados entre si;
- É assumida densidade de corrente uniforme em cada condutor.

Condutor Horizontal

Considere-se um condutor horizontal (figura 3.4) enterrado a uma certa profundidade na camada superior de terra. Este condutor está localizado no eixo u do sistema de coordenadas uvw. As coordenadas do condutor são dadas na tabela 3.1.

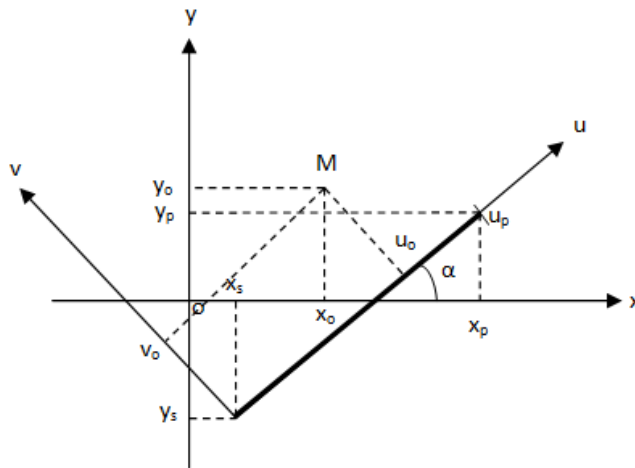


Figura 3.4 - Condutor Horizontal (visão de topo)

Tabela 3.1 - Correspondência entre os sistemas de coordenadas utilizados

Sistema x y z	Sistema u v w	Descrição
(x_s, y_s, z_s)	(u_s, v_s, w_s)	Origem do condutor
(x_p, y_p, z_p)	(u_p, v_p, w_p)	Extremidade do condutor

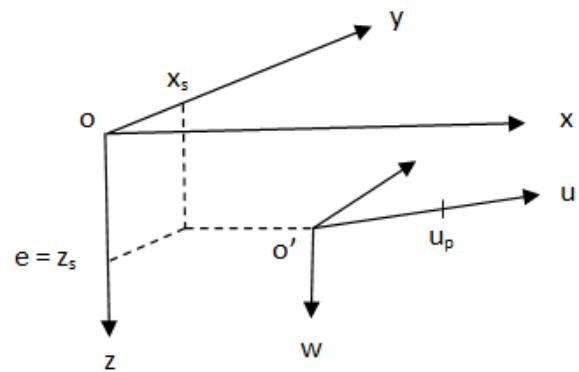
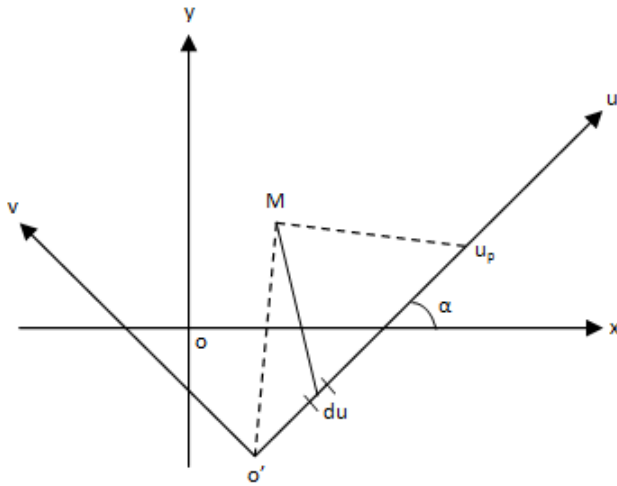
Na figura 3.4 o condutor encontra-se a negrito, não se representando o eixo z nem o eixo w. Tal como se refere na tabela 3.1 a origem do condutor é (x_s, y_s, z_s) no sistema de eixos xyz e (u_s, v_s, w_s) no sistema de eixos uvw. A extremidade será (x_p, y_p, z_p) no sistema xyz e (u_p, v_p, w_p) no sistema uvw. Como se pode observar pela figura 3.4 $u_s = v_s = v_p = 0$. Como o condutor está na horizontal ter-se-á $z_s = z_p = e$ (profundidade de enterramento [m]) e $w_s = w_p = 0$. Os eixos uvw serão sempre escolhidos de forma a $u_s = 0$.

O potencial em M (u_o, v_o, w_o) devido a uma parte infinitesimal do condutor (figura 3.5) é dado pela equação (3.2). De forma a levar a cabo a integração, os termos “r” da equação (3.3) têm de ser expressos como função de u,v,w. Isto é feito através de uma transformação de coordenadas envolvendo uma translação e uma rotação. É fácil de estabelecer que as coordenadas x, y, z estão relacionadas com as coordenadas u, v, w através das relações (figura 3.5 e 3.6) apresentadas em (3.4).

$$\begin{aligned}
 x &= u \cos \alpha - v \sin \alpha + x_s \\
 y &= u \sin \alpha + v \cos \alpha + y_s \\
 z &= w + z_s \\
 z_s &= z_p = e
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Substituindo na equação (3.3) x_o, y_o, z_o, x, y, z pelos seus valores dados pela equação (3.4) (x_j é o equivalente de x...) e sabendo que $v=0, w=0$, obtêm-se as expressões representadas em (3.5).

$$\begin{aligned}
 r_o &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + w_o^2]^{\frac{1}{2}} \\
 r'_o &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (w_o + 2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\
 r_{nj+} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh + w_o)^2]^{\frac{1}{2}} \\
 r'_{nj+} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh + w_o + 2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\
 r_{nj-} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh - w_o - 2z_s)^2]^{\frac{1}{2}} \\
 r'_{nj-} &= [(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh - w_o)^2]^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$



Repare-se que a equação (3.2) pode ser escrita da forma representada em (3.6).

Figura 3.6 - Método Integral – Condutor Horizontal

Repare-se que a equação (3.2) pode ser escrita da forma representada em (3.6).

$$dV_j = \theta_j(w_o) + \theta_j(w_o + 2z_s) \quad (3.6)$$

Em (3.7) representa-se o significado dos termos de (3.6).

$$\theta_j(w_o) = \frac{\rho_1 i_j du}{4\pi} \left[\frac{1}{\sqrt{(u-u_o)^2 + v_o^2 + w_o^2}} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \left(\frac{1}{\sqrt{(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh+w_o)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(u-u_o)^2 + v_o^2 + (2nh-w_o)^2}} \right) \right] \quad (3.7)$$

O potencial total no ponto M devido ao condutor é dado por (3.8).

$$V_j = \int_{u_s=0}^{u_p} \theta_j(w_o) \cdot du + \int_{u_s=0}^{u_p} \theta_j(w_o + 2z_s) \cdot du \quad (3.8)$$

Assim ter-se-á (3.9).

$$\int_0^{u_p} \theta_j(w_o) = \frac{\rho_{1j}}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{u_p - u_o + \sqrt{(u_p - u_o)^2 + v_o^2 + w_o^2}}{-u_o + \sqrt{u_o^2 + v_o^2 + w_o^2}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left(\frac{(u_p - u_o) + \sqrt{(u_p - u_o)^2 + v_o^2 + (2nh + w_o)^2}}{-u_o + \sqrt{u_o^2 + v_o^2 + (2nh + w_o)^2}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} k^n \ln \left(\frac{(u_p - u_o) + \sqrt{(u_p - u_o)^2 + v_o^2 + (2nh - w_o)^2}}{-u_o + \sqrt{u_o^2 + v_o^2 + (2nh - w_o)^2}} \right) \right] \quad (3.9)$$

$\int_0^{u_p} \theta_j(w_o+2z_s)$ pode ser obtido substituindo na equação (3.9) w_o por w_o+2z_s .

Desta forma o potencial V_j , de (3.8), pode ser escrito na forma simbólica, representada em (3.10).

$$V_j = \frac{\rho_1 l_j}{4\pi L_j} \mathbb{Y}_j[u_p, u_o, v_o, w_o] + \mathbb{Y}_j[u_p, u_o, v_o, (w_o+2z_s)] \quad (3.10)$$

$\mathbb{Y}_j[u_p, u_o, v_o, w_o]$ irá representar o integral de (3.9) para o condutor j.

$\mathbb{Y}_j[u_p, u_o, v_o, w_o]$ irá representar o integral de (3.9) substituindo w_o por w_o+2z_s , para o condutor j.

L_j é o comprimento do condutor j [m].

l_j é a corrente que se escoia pelo condutor j [A].

Sendo que u_p , u_o , v_o , w_o estão relacionados com as coordenadas xyz através das relações explicitadas em (3.11).

$$\begin{aligned} u_p &= (x_p - x_s) \cos \alpha + (y_p - y_s) \sin \alpha \\ u_o &= (x_o - x_s) \cos \alpha + (y_o - y_s) \sin \alpha \\ v_o &= (y_o - y_s) \cos \alpha - (x_o - x_s) \sin \alpha \\ w_o &= z_o - z_s \end{aligned} \quad (3.11)$$

Quando ρ_1 , k , l_j , L_j , x_p , x_s , y_p , y_s , z_s , z_p e α são conhecidos (dados da terra e malha) a equação (3.10) fornece o potencial V em cada ponto $M(x_o, y_o, z_o)$.

Condutor não Horizontal

Este caso é exemplificado na figura 3.7. O sistema de coordenadas uvw é escolhido de maneira a que o condutor esteja no plano $u'o'v'$. Sendo o ponto x_s , y_s , z_o (ponto M no plano $u'o'v'$) a origem das coordenadas uvw, ter-se-á:

$$\begin{aligned} u_s &= v_s = 0 \\ v_p &= 0 \\ w_s &= z_s - z_o \\ w_p &= z_p - z_o \end{aligned} \quad (3.10)$$

O potencial criado por este condutor no ponto $M(u_o, v_o, 0)$ é idêntico ao criado por um condutor horizontal nos eixos $o'u$ no ponto $M'(u'_o, v'_o, 0)$ de forma que o novo condutor horizontal equivalente terá as características expressas por (3.13).

$$\begin{aligned} u'_s &= v'_s = w'_s = 0 \\ v'_p &= w'_p = 0 \\ u'_p &= \sqrt{u_p^2 + (w_p - w_s)^2} \end{aligned} \quad (3.13)$$

E as coordenadas do novo ponto M' são dadas por (3.14).

$$\begin{aligned} u'_o &= [u_p u_o + w_s (w_s - w_p)] / u'_p \\ v'_o &= [u_o^2 + v_o^2 + w_s^2 - u_o'^2]^{\frac{1}{2}} \\ w'_o &= w_o = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

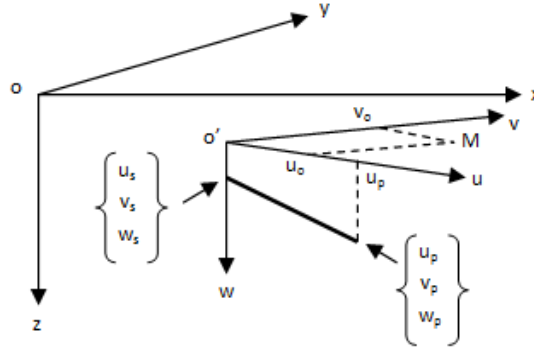


Figura 3.7 - Método Integral – Condutor não Horizontal

Malha de Terra

O potencial no ponto M (x_o, y_o, z_o) na camada superior será a soma dos potenciais criados por cada um dos condutores lineares como calculados pela equação (3.10). Sendo um condutor indicado pela letra j então o potencial total pode ser descrito por (3.15).

$$V = \frac{\rho_1 I}{4\pi L} \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{r_{j1}} + \frac{1}{r_{j2}} \right] \quad (3.15)$$

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

m é o número total de condutores lineares.

I é a corrente total escoada pela malha [A].

u_p, u_o, v_o, w_o dados pela equação (3.11) para condutores horizontais e pelas equações (3.13) e (3.14) para condutores não horizontais. Assim a equação final será uma função dos seguintes parâmetros:

$$\rho_1, k, l, L, x_s, y_s, z_s, x_p, y_p, z_p, x_o, y_o, z_o, \alpha$$

que são características da terra e do eléctrodo.

De salientar que a origem do sistema de coordenadas xyz encontra-se no centro da malha e tem a disposição ilustrada na figura 3.6, com o eixo x paralelo ao comprimento da malha, o eixo y paralelo à largura e o z positivo na profundidade.

Com as expressões descritas é possível calcular o potencial à superfície provocado pelo escoamento de corrente por parte da malha. Sendo que neste método se considera distribuição de densidade de corrente uniforme ao longo da malha, ou seja, todos os segmentos escoam a mesma corrente. Na secção seguinte, 3.2, será descrito um método que utilizará estas expressões para calcular o potencial provocado por uns segmentos nos outros, considerando-se assim distribuição de densidade de corrente não uniforme ao longo da malha.

3.2 – Programa de cálculo dos potenciais à superfície – Escoamento não uniforme da corrente

A corrente que percorre um certo segmento da malha não é igual à corrente noutro segmento, pois existem efeitos de variação da densidade da corrente de defeito da malha de terra, causados por: assimetria da malha, pela proximidade de condutores paralelos, perpendiculares e também pelos chamados efeitos terminais, isto é, a intensidade da corrente nos segmentos da malha tende a aumentar do centro para a periferia. Por todas estas razões é necessário calcular os factores de distribuição da densidade de corrente ao longo da malha.

O método utilizado designa-se método matricial, é de fácil compreensão e foi proposto em [5].

Método Matricial

Nesta secção o potencial criado por um condutor num solo de duas camadas será apenas designado pela letra V . A expressão de V é dada pelas expressões apresentadas em [2] e explicadas anteriormente neste texto (secção 3.1), sendo que o ponto M referido passa a ser um ponto à superfície de um condutor (considerou-se o meio do condutor). Observe-se a figura 3.8.

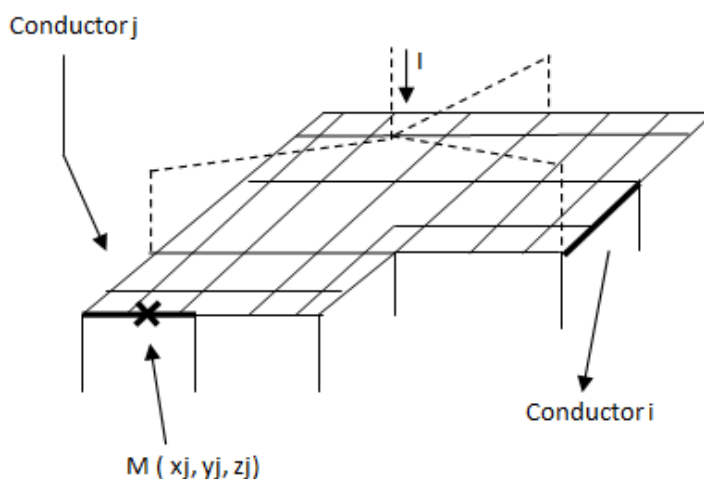


Figura 3.8 – Exemplo de uma Malha de Terra

Considere-se a malha de terra acima representada, composta por n condutores j ($j=1, n$) e enterrada num solo de duas camadas. Para o estudo pretendido os elementos j são condutores e o seu tamanho é pequeno comparado com o comprimento total da malha ($l_j < L$).

Sendo x_j, y_j, z_j as coordenadas do centro de cada condutor j e V_{ij} o potencial provocado pelo condutor i no ponto x_j, y_j, z_j (este ponto está à superfície de um condutor). Considerando i_i a densidade de corrente linear do condutor i e I a corrente total injectada pela malha na terra. S_i será o factor de distribuição da densidade de corrente e é definido por (3.16).

$$S_i \frac{I}{L} = i_i \quad (3.16)$$

Negligenciando a queda de tensão na malha de terra pode-se escrever as expressões de (3.17).

$$\begin{aligned} S_1 V_{11} + S_2 V_{21} + \dots + S_i V_{i1} + \dots + S_n V_{n1} &= V_{\text{malha}} \\ S_1 V_{12} + S_2 V_{22} + \dots + S_i V_{i2} + \dots + S_n V_{n2} &= V_{\text{malha}} \\ S_1 V_{1j} + S_2 V_{2j} + \dots + S_i V_{ij} + \dots + S_n V_{nj} &= V_{\text{malha}} \\ S_1 V_{1n} + S_2 V_{2n} + \dots + S_i V_{in} + \dots + S_n V_{nn} &= V_{\text{malha}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Em (3.17), V_{malha} é a tensão de malha e pode ser calculada sabendo a resistência de malha e a corrente injectada, como à frente será mostrado. Têm-se então um sistema de n equações simultâneas de n incógnitas, que pode ser escrito da seguinte forma matricial:

$$(V_{ij})(S_j) = V(1) \quad (3.18)$$

Cuja solução é dada por (3.19).

$$(S_j) = V(V_{ij})^{-1}(1) \quad (3.19)$$

Este método permite de forma simples e eficaz determinar a distribuição de corrente ao longo do eléctrodo e consiste na primeira parte do método utilizado. Conhecendo os valores destes factores poder-se-á de seguida utilizá-los para calcular os perfis de potencial pretendidos (segunda parte do método), o que é feito multiplicando a contribuição de cada segmento para o potencial (expressão (3.10)) pelo seu factor de distribuição da densidade de corrente.

3.3 – Cálculo da resistência de malha - Método *Multistep*

Na referência [5] os autores desenvolvem um método designado *multistep* que permite calcular os factores de distribuição de densidade de corrente (S_i 's) bem como a resistência da malha. Este método procurava ser uma alternativa ao método matricial pois exigiria menos

tempo computacional, dado que não inclui a inversão da matriz dos potenciais. Esta era uma preocupação para a altura (1976) visto que os recursos computacionais eram escassos, o que não se verifica actualmente.

Em vez de subdividirmos a malha em n elementos num único passo, vai-se dividir a malha num pequeno número de elementos em cada passo, num processo de n passos. Por exemplo é sempre possível subdividir, em cada passo a malha em duas secções:

- O condutor próximo do ponto onde o potencial é calculado (ponto 1);
- O restante eléctrodo (r).

Consequentemente pode-se escrever (3.20).

$$S_1 I_1 + (L - I_1) S_r I_r = L \quad (3.20)$$

1 designa o centro do condutor (à superfície do eléctrodo), onde o potencial é calculado (x_1, y_1, z_1), e r o resto da malha subdividida em relação a 1.

Também se pode escrever (3.21).

$$S_1 V_{11} + S_r V_{r1} = V = RI \quad (3.21)$$

Em (3.21), R é a resistência do condutor.

De (3.20) e (3.21) obtêm-se:

$$S_1 = \left(\frac{\alpha_1 V - V_{r1}}{\beta_1 V_{11} - V_{r1}} \right) \gamma_1 \quad (3.22)$$

Onde:

$$\alpha_1 = \frac{L - I_1}{L}; \beta_1 = \frac{L - I_1}{I_1}; \gamma_1 = \frac{L}{I_1}; V_{r1} = \sum_{j=1}^n V_{j1} - V_{11}$$

Repetindo o mesmo procedimento para diferentes pontos ($i=1, \dots, n$) no centro dos eléctrodos, obtêm-se (3.23).

$$S_i = \gamma_i \left(\frac{\alpha_i V + V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) \quad (3.23)$$

Desta forma é assim possível determinar os factores de distribuição de corrente S_i assumindo $R=1$ e ajustando depois S_i de acordo com:

$$\sum_{i=1}^n S_i L_i = L \quad (3.24)$$

Utilizando os valores de S_i na expressão acima, obtêm-se após simplificação (3.25) e (3.26).

$$R = \frac{1 - n + \sum_{i=1}^n (\beta_i V_{ii} / (\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}))}{I \sum_{i=1}^n (\alpha_i / (\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}))} \quad (3.25)$$

$$S_i = \gamma_i \left(1 + \frac{\alpha_i V - \beta_i V_{ii}}{\gamma_i V_{ii} - \sum_{j=1}^n V_{ji}} \right) \quad (3.26)$$

Sendo que apenas nos interessa a expressão da resistência pois os factores S_i são calculados pelo método matricial.

Sabendo a resistência de malha é possível calcular a tensão de malha por (3.27), tal como referido anteriormente.

$$V_{\text{malha}} = R \cdot I \quad (3.27)$$

I é a corrente injectada na malha.

3.4 – Validação dos resultados

De forma a verificar a validade do método usado ir-se-á comparar os resultados obtidos com os que são apresentados em artigos publicados. Primeiramente ir-se-á verificar se as expressões para o cálculo do potencial se encontram bem aplicadas e posteriormente ir-se-á verificar se o método completo (cálculo dos factores de distribuição de corrente e sua aplicação no cálculo do potencial) produz resultados concordantes com casos de estudo.

Verificação da validade das expressões do potencial

Para a realização do pretendido ir-se-á utilizar a referência [3], na qual são analisados os perfis de potencial de quatro configurações de malhas distintas, sendo que os autores comparam resultados experimentais (usando um modelo à escala de um solo de duas camadas) com os resultados analíticos obtidos pelas expressões de [2] para o cálculo do potencial, que foram também apresentadas neste documento (secção 3.1). Para os resultados analíticos os autores assumem três casos distintos, que serão descritos mais à frente. Assim para cada caso teremos 4 curvas apresentadas pelos autores:

E: Curva experimental

A: Curva teórica baseada no pressuposto A

B: Curva teórica baseada no pressuposto B

C: Curva teórica baseada no pressuposto C

O pressuposto A considera que a corrente se distribui de forma uniforme ao longo da malha. O pressuposto B considera que a corrente não se distribui de forma uniforme ao longo

da malha, de forma que a contribuição de cada segmento para o potencial total num ponto à superfície, vem multiplicada por um factor delta que é encontrado da seguinte forma:

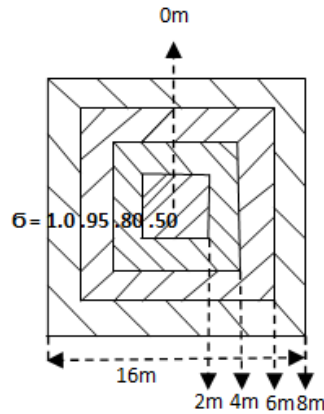


Figura 3.9 - Escolha do coeficiente δ para o pressuposto B

O pressuposto C considera corrente não uniforme ao longo da malha, sendo que o coeficiente δ varia de forma linear, começando do 0, no centro do eléctrodo, e atingindo o valor máximo na parte exterior da malha. A expressão matemática de δ está expressa em (3.28).

$$\delta = a \cdot d_{cj} \quad (3.28)$$

a é uma constante numérica escolhida de acordo com o valor de corrente total que se escoou através da malha para a terra.

d_{cj} é a distância entre um ponto da malha (escolhe-se o centro de cada segmento) e o centro da área coberta pela malha.


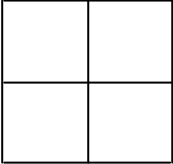
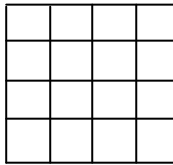
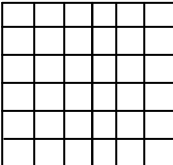
A constante a é determinada sabendo que:

$$\sum_1^m \delta_j = m \quad (3.29)$$

Onde, m é o número total de segmentos em que se subdividiu a malha. Este factor δ será achado individualmente para cada segmento e multiplicado pela sua contribuição para o potencial total.

As malhas estudadas são apresentadas na tabela 3.2. São malhas quadradas 16m x 16m, feitas de condutores de 0.01m de diâmetro e enterradas a uma profundidade de 0.6m. A primeira camada tem 4m de espessura e resistividade de 200 $\Omega \cdot m$ e a segunda de 800 $\Omega \cdot m$. O coeficiente de reflexão será então de 0.6. A corrente injectada em todos eles é de 100 A.

Tabela 3.2 - Configurações testadas

Malha No.	Configuração Geométrica	Número de submalhas
I		1
II		4
III		16
IV		36

Como já foi dito anteriormente considera-se a origem do sistema de eixos xyz o centro geométrico da malha, com o eixo x paralelo ao comprimento e o y à largura, sendo que o eixo z é positivo em profundidade.

Os resultados obtidos neste documento apenas consideram os pressupostos A e C, pois não foi considerado que o resultado B seria relevante. Para os três primeiros eléctrodos será traçado o perfil segundo Y com X=-6 (direcção 1). Para o último eléctrodo será traçado o perfil segundo a direcção Y com X=-4 (direcção 2). Nas figuras 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 serão apresentados os resultados obtidos pelos autores em comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

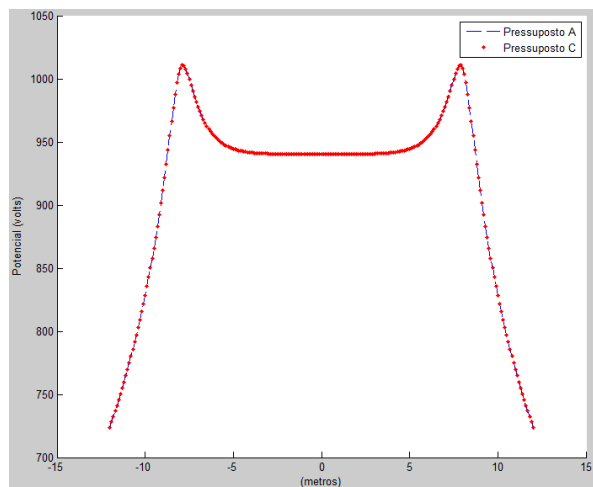
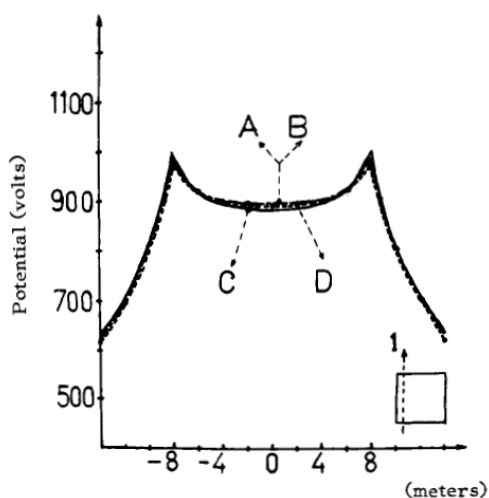


Figura 3.10 - Eléctrodo I – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos

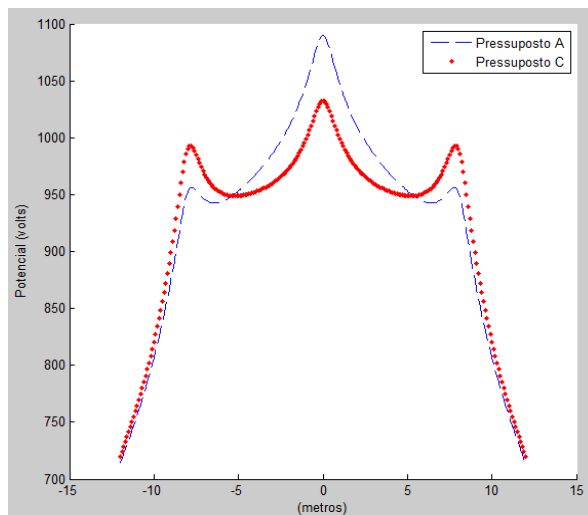
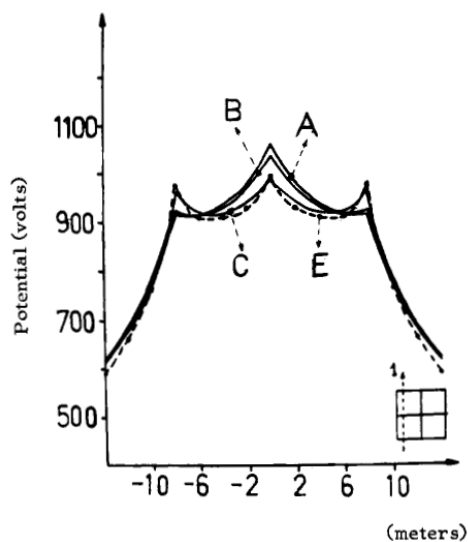


Figura 3.11 - Eléctrodo II – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos

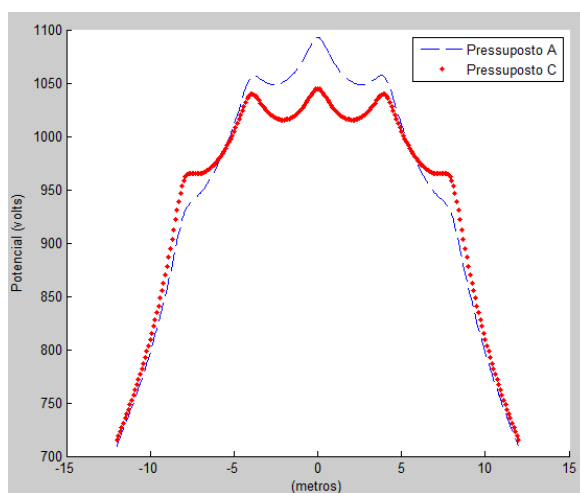
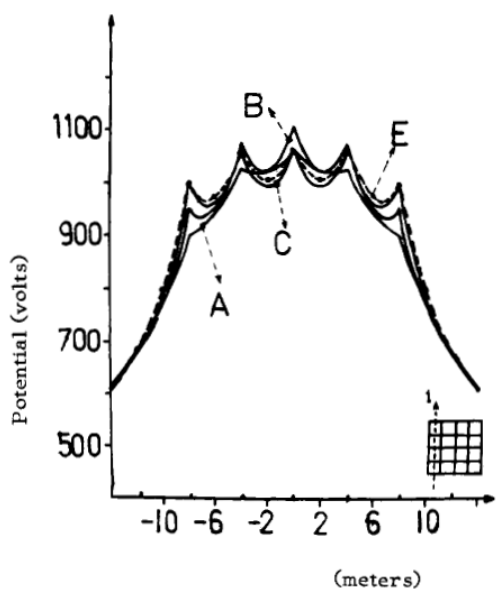


Figura 3.12 - Eléctrodo III – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos

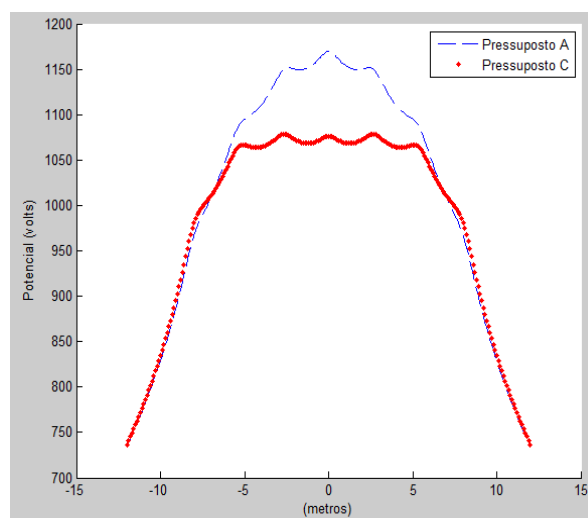
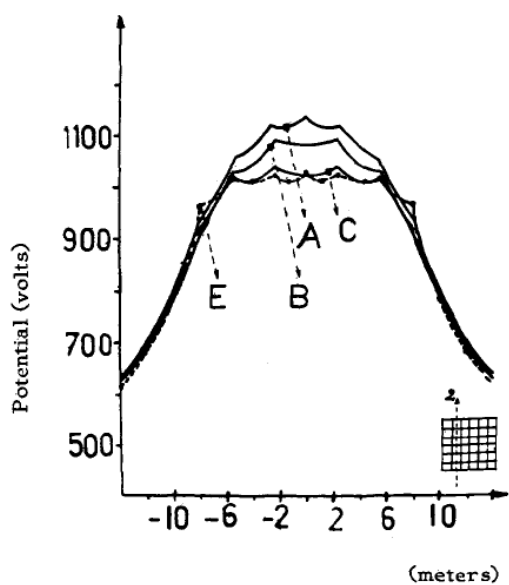


Figura 3.13 - Eléctrodo IV – Potencial à superfície. À esquerda resultados de [2] parte II, e à direita resultados obtidos

As curvas foram retiradas do artigo, sendo que existe uma incorrecção na figura do eléctrodo III, as curvas A e B estão trocadas.

Como se pode ver pela comparação das várias figuras existe uma concordância entre os resultados retirados da referência e os resultados obtidos neste trabalho, apenas se verifica que no eléctrodo IV os resultados obtidos com o programa estão um pouco superiores ao do artigo. Verifica-se assim a validação das expressões para o cálculo dos potenciais. Apesar do pressuposto C produzir resultados concordantes com os resultados experimentais, este não tem por detrás uma base física, pois resultou apenas da verificação da hipótese de a corrente se concentrar maioritariamente na periferia da malha.

Verificação da validade do método completo

Verificada a validade das expressões para o cálculo do potencial, passa-se agora para a validação do método completo. A validação anterior, mostrou-se crucial pois essas mesmas expressões serão usadas tanto para o cálculo dos factores de distribuição de corrente, como também para o cálculo dos perfis de potencial sabendo esses mesmos factores, como anteriormente foi explicado. Foram obtidos os resultados para a mesma situação descrita anteriormente e para os mesmos eléctrodos. Os resultados obtidos estão representados nas figuras 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17.

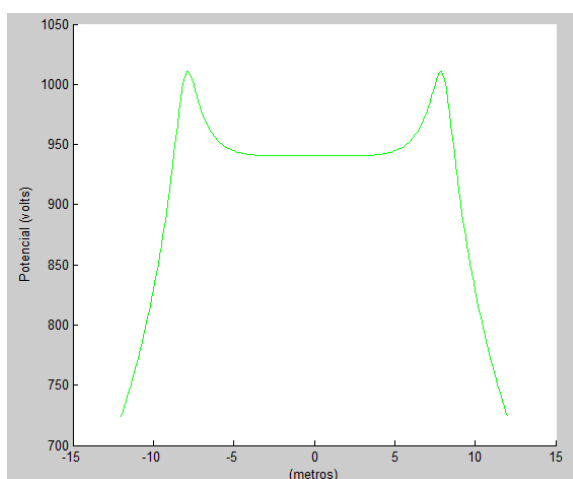


Figura 3.14 - Eléctrodo I – Potencial à superfície.

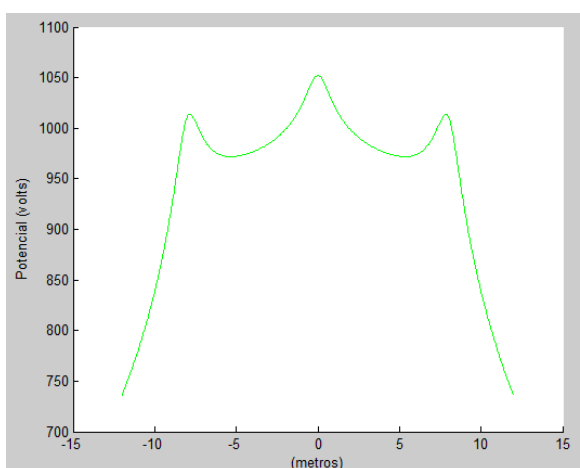


Figura 3.15 - Eléctrodo II – Potencial à superfície.

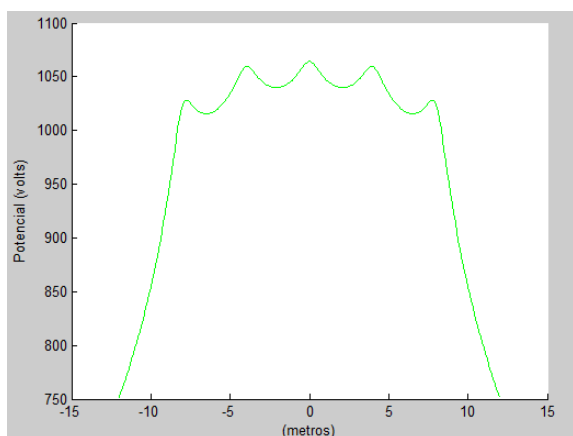


Figura 3.16 - Eléctrodo III – Potencial à superfície.

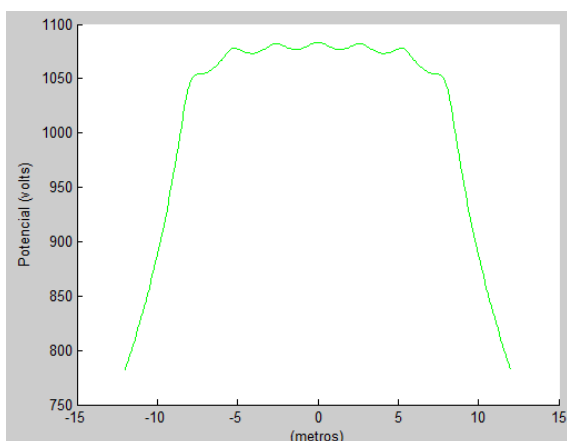


Figura 3.17 - Eléctrodo IV – Potencial à superfície.

Como se pode constatar pela comparação dos resultados obtidos com os resultados do artigo ([2] parte II), que se encontram também representados nas figuras de 3.10 - 3.13 (curvas experimentais, E), o método desenvolvido encontra-se validado. De salientar que o método desenvolvido tem uma base física a sustentá-lo, pois considera-se o potencial provocado por uns condutores nos outros.

3.5 – Comparação dos métodos: distribuição de corrente uniforme vs distribuição de corrente não uniforme

Ir-se-á de seguida realizar um estudo que permitirá verificar as vantagens de se considerar distribuição de densidade de corrente não uniforme ao longo da malha. Os resultados para a distribuição de densidade de corrente uniforme foram obtidos a partir do método constituído apenas pelas expressões descritas na secção 3.1, sendo que para obter os resultados considerando distribuição de densidade de corrente não uniforme utilizou-se o método descrito na secção 3.2, método este que será usado nos capítulos seguintes para análise das malhas de terra. Considere-se então o seguinte exemplo:

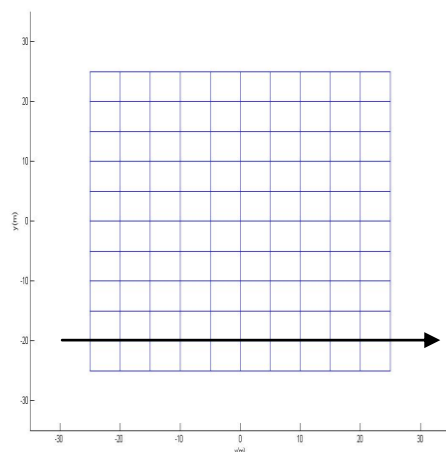


Figura 3.18 – Malha de terra destinada ao estudo da distribuição de corrente na malha

Tabela 3.3 - Dados da malha de terra destinada ao estudo da não uniformidade do escoamento da corrente pela malha

I [A]	ρ_1	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	e [m]	h [m]	c [m]	l [m]	D [m]	d [m]
1000	200	400	0.5	10	50	50	5	0.015

Na tabela 3.3: e será a profundidade de enterramento da malha, h a espessura da primeira camada de solo, c o comprimento da malha, l a largura da malha, D o espaçamento entre os condutores da malha e d o diâmetro dos condutores.

Ir-se-á verificar quais os factores de distribuição de densidades de corrente ao longo dos segmentos em comparação com o caso de distribuição de corrente uniforme, em que os factores são iguais a 1 para todos os segmentos. Para além disso ir-se-á obter os perfis para cada um dos casos, comparando-se os resultados obtidos.

					1.15	1.17	1.22	1.33	1.60	2.73
					0.71	0.73	0.77	0.87	1.11	2.15
					0.57	0.58	0.63	0.73	0.96	1.95
					0.51	0.52	0.56	0.66	0.89	1.85
					0.48	0.49	0.54	0.63	0.87	1.81
1.15	0.71	0.57	0.51	0.48						
1.17	0.73	0.58	0.52	0.49						
1.22	0.77	0.63	0.56	0.54						
1.33	0.87	0.73	0.66	0.63						
1.60	1.11	0.96	0.89	0.87						
2.73	2.15	1.95	1.85	1.81						

Figura 3.19 – Factores de distribuição de densidade de corrente, considerando distribuição de corrente não uniforme - malha base

A malha de terra apresenta simetria, razão pela qual na figura 3.19 apenas se apresentam aqueles factores de distribuição de corrente, sendo que os restantes são facilmente deduzidos.

Somando todos os factores e dividindo pelo número total de segmentos obtêm-se o valor 1.05, aproximadamente 1. A razão de aquele valor não dar exactamente 1 deve-se a arredondamentos nas casas decimais. Este simples cálculo prova que a corrente escoada é igual àquela que é injectada na malha.

Os perfis apresentados de seguida foram determinados segundo a direcção x, para y=-20 (direcção assinalada na figura 3.18).

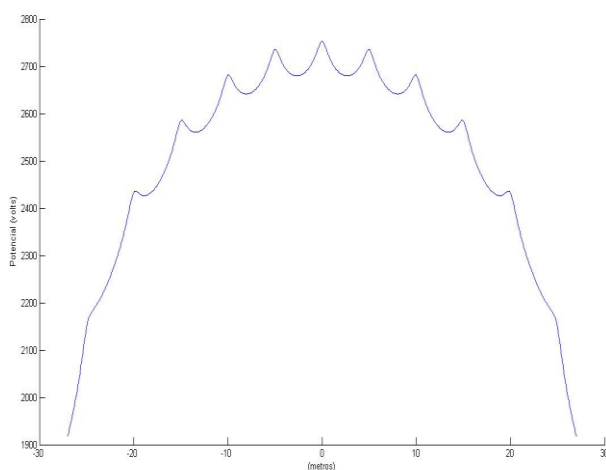


Figura 3.20 – Perfil segundo x (y=-20), distribuição de corrente uniforme

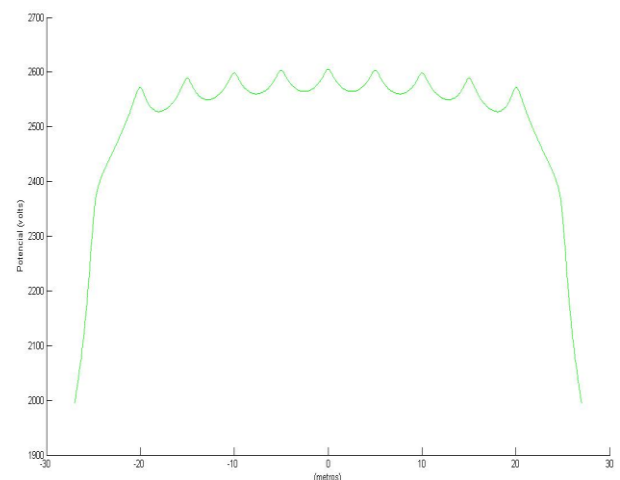


Figura 3.21 – Perfil segundo x (y=-20), distribuição de corrente não uniforme

Observando a figura 3.20 constata-se que considerar distribuição de corrente uniforme é uma aproximação grosseira pois existe uma diferença evidente na corrente escoada por diferentes segmentos da malha. Segmentos da periferia apresentam factores de distribuição da densidade de corrente superiores aos segmentos mais interiores, tal como era previsto.

Comparando as figuras 3.20 e 3.21 verifica-se que, considerando distribuição de corrente uniforme ter-se-á valores de potencial máximo mais elevados que no caso de distribuição não uniforme e o envelope vai crescendo atingindo o valor máximo ao centro, sendo que no segundo caso tem-se que os valores dos picos do envelope estão mais próximos, o que se verifica na realidade. Este facto é visível pelos resultados experimentais obtidos no artigo [2] e que estão representados nas figuras 3.10 - 3.13, deste trabalho.

De seguida ir-se-á realizar um estudo que irá verificar a influência que diferentes configurações ou parâmetros têm sobre os factores de distribuição de corrente. Considera-se três casos diferentes: malha não igualmente espaçada, malha rectangular e malha com espaçamento variável. Estes três casos serão comparados com o caso base apresentado anteriormente. Neste estudo considera-se distribuição de corrente não uniforme.

Malha não igualmente espaçada

					0.97	1.00	1.07	1.20	1.44	2.50
					0.72	0.74	0.80	0.90	1.13	2.00
					0.66	0.68	0.73	0.83	1.07	1.82
					0.63	0.64	0.70	0.80	1.04	1.72
					0.63	0.65	0.71	0.81	1.03	1.68
	0.97	0.72	0.66	0.63	0.63					
	1.00	0.74	0.68	0.64	0.65					
	1.07	0.80	0.73	0.70	0.71					
	1.20	0.90	0.83	0.80	0.81					
	1.44	1.13	1.07	1.04	1.03					
	2.50	2.00	1.82	1.72	1.68					

Figura 3.22 – Factores de distribuição de densidade de corrente - malha não igualmente espaçada

Mais uma vez, na figura 3.22 não se representou os restantes factores de distribuição de corrente porque a malha é simétrica.

Fazendo o somatório do produto do factor de distribuição de corrente pelo comprimento do segmento respectivo e dividindo o total pelo comprimento total da malha verifica-se que o resultado é 1.08, aproximadamente 1.

Ao realizar-se a optimização de Sverak, que será descrita na secção 5.1, verifica-se que já não existe uma diferença tão evidente entre os valores para os vários segmentos (figura 3.22). Sendo que o valor máximo diminui e o mínimo aumenta em

comparação com o caso base. Existe assim uma maior uniformidade da corrente ao longo da malha, tal como é objectivo dessa optimização.

Malha rectangular

O comprimento passou a ser 75 metros, mantendo-se os restantes parâmetros.

								1.19	1.20	1.23	1.28	1.36	1.51	1.84	3.38
								0.72	0.73	0.75	0.79	0.86	0.99	1.28	2.50
								0.57	0.58	0.60	0.63	0.70	0.82	1.11	2.27
								0.50	0.51	0.53	0.56	0.63	0.75	1.03	2.16
								0.47	0.48	0.50	0.53	0.60	0.72	1.00	2.11
1.34	0.82	0.64	0.56	0.51	0.48	0.47	0.46								
1.35	0.83	0.66	0.57	0.52	0.50	0.49	0.48								
1.41	0.88	0.71	0.62	0.57	0.55	0.53	0.52								
1.54	0.99	0.82	0.73	0.68	0.65	0.64	0.63								
1.85	1.27	1.09	0.99	0.94	0.90	0.89	0.88								
3.16	2.46	2.20	2.06	1.97	1.92	1.89	1.88								

Figura 3.23 – Factores de distribuição de densidade de corrente - malha rectangular

Na figura 3.23 os restantes factores de distribuição de corrente não foram representados porque a malha de terra é simétrica.

Somando todos os factores e dividindo pelo número total de segmentos obtêm-se o valor 1.06, aproximadamente 1.

Mudando a configuração da malha, isto é, aumentando o comprimento de 50 para 75 metros, verifica-se que os factores de distribuição de corrente sofrem alterações (figura 3.23). O valor máximo em relação ao caso base aumenta, enquanto o valor mínimo é semelhante, constatando-se que existe uma maior diferença entre os factores para os diferentes segmentos. Existe uma maior não uniformidade da corrente ao longo da malha, o que seria de prever uma vez que a geometria da malha deixa de ser quadrada.

Malha com diferentes espaçamentos entre condutores

Considerou-se a malha base (quadrada e igualmente espaçada) e alterou-se o parâmetro D, ou seja, o espaçamento entre condutores. O objectivo, neste caso, é determinar o factor de não uniformidade para os diferentes casos. O factor de uniformidade da corrente está definido em (3.30).

$$\text{Factor de não uniformidade} = \frac{\text{factor de distribuição de corrente máximo}}{\text{factor de distribuição de corrente mínimo}} \quad (3.30)$$

Tabela 3.4 – Factor de não uniformidade da corrente para diferentes espaçamentos entre condutores

Número de condutores segundo o lado	Espaçamento entre condutores (D) [m]	Factor de distribuição de corrente		Factor de não uniformidade
		Mínimo	Máximo	
26	2	0.43	5.63	13.1
17	3.125	0.45	3.92	8.71
13	4.167	0.47	3.13	6.66
11	5	0.48	2.73	5.69
10	5.56	0.49	2.53	5.16
9	6.25	0.51	2.33	4.57
8	7.14	0.52	2.13	4.10
7	8.33	0.54	1.92	3.56
6	10	0.57	1.71	3.00
5	12.5	0.61	1.51	2.48
4	16.67	0.68	1.31	1.93
3	25	0.80	1.12	1.40
2	50	1.00	1.00	1

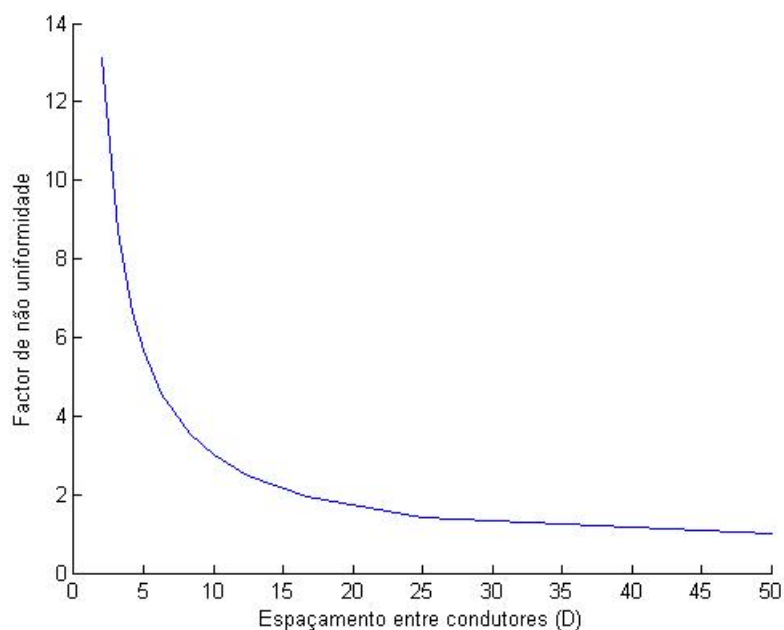


Figura 3.24 – Resultados da tabela 3.4 sob a forma de gráfico

Os resultados da tabela 3.4, que estão representados graficamente na figura 3.24, permitem concluir que aumentando o espaçamento (D), o que consiste em retirar condutores da malha, diminui-se o factor de não uniformidade da corrente, ou seja, têm-se uma corrente mais uniforme na malha. Isto é, malhas mais densas têm uma corrente menos uniforme (factor de não uniformidade maior) enquanto malhas mais esparsas possuem uma corrente mais uniforme ao longo dos seus condutores (factor de não uniformidade menor). Este facto é bem visível pelos resultados apresentados, pois uma malha com um espaçamento de 2 metros (26 condutores segundo cada direcção) possui um factor de não uniformidade de 13.1. Por outro lado uma malha com um espaçamento de 10 metros (6 condutores segundo cada direcção) possui um factor de não uniformidade de apenas 3. Como seria de esperar ao ter-se apenas 4 condutores, perímetro da malha apenas, ter-se-á um factor de não uniformidade de 1, ou seja, corrente igual em todos os segmentos (espaçamento igual a 50).

4. APLICAÇÕES DO MÉTODO DE CÁLCULO DO POTENCIAL

Nesta secção pretende-se realizar dois estudos. O primeiro consiste em considerar solo uniforme e variar a profundidade de enterramento da malha de terra. O segundo consiste em variar a resistividade da segunda camada de terra mantendo todos os outros parâmetros constantes. Como resultados para análise teremos, a resistência de terra, as tensões de passo e toque e o perfil de potencial segundo uma direcção que será, mais à frente, explicitada. Para os estudos pretendidos ir-se-á considerar o seguinte caso base:

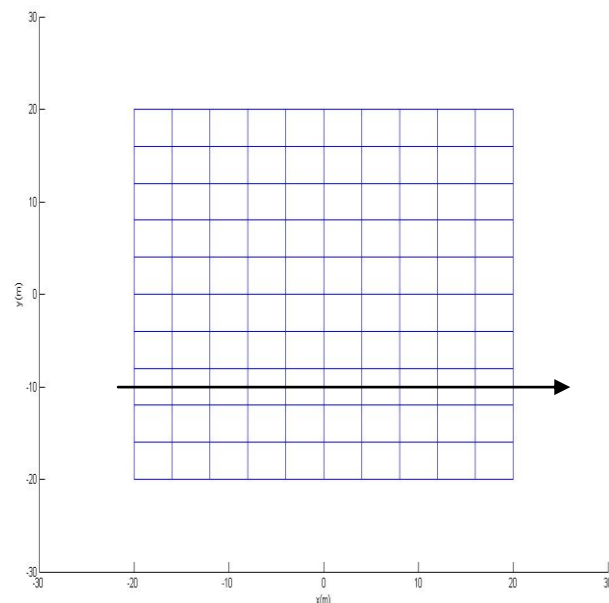


Figura 4.1 – Malha de terra 11x11 - caso de estudo

Tabela 4.1 – Dados da malha de terra 11x11

I [kA]	c [m]	l [m]	D [m]	d [m]
1.6	40	40	4	0.015

Os perfis de tensão são calculados segundo a direcção x, para $y = -10$ (direcção assinalada na figura 4.1).

4.1 Estudo da influência da profundidade de enterramento nos resultados

Com o objectivo de estudar a influência que a profundidade de enterramento da malha de terra tem sobre os resultados, considera-se solo uniforme com resistividade igual a 200 $\Omega \cdot m$ e ir-se-á variar a profundidade de enterramento entre 0.5 e 1.5 metros.

Tabela 4.2 – Influência da variação da profundidade de enterramento nos resultados

	Profundidade de enterramento e [m]	Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]
Malha 1	0.5	2.3443	215.8	730.7
Malha 2	1	2.2949	194.4	830.7
Malha 3	1.5	2.2511	182.0	878.6

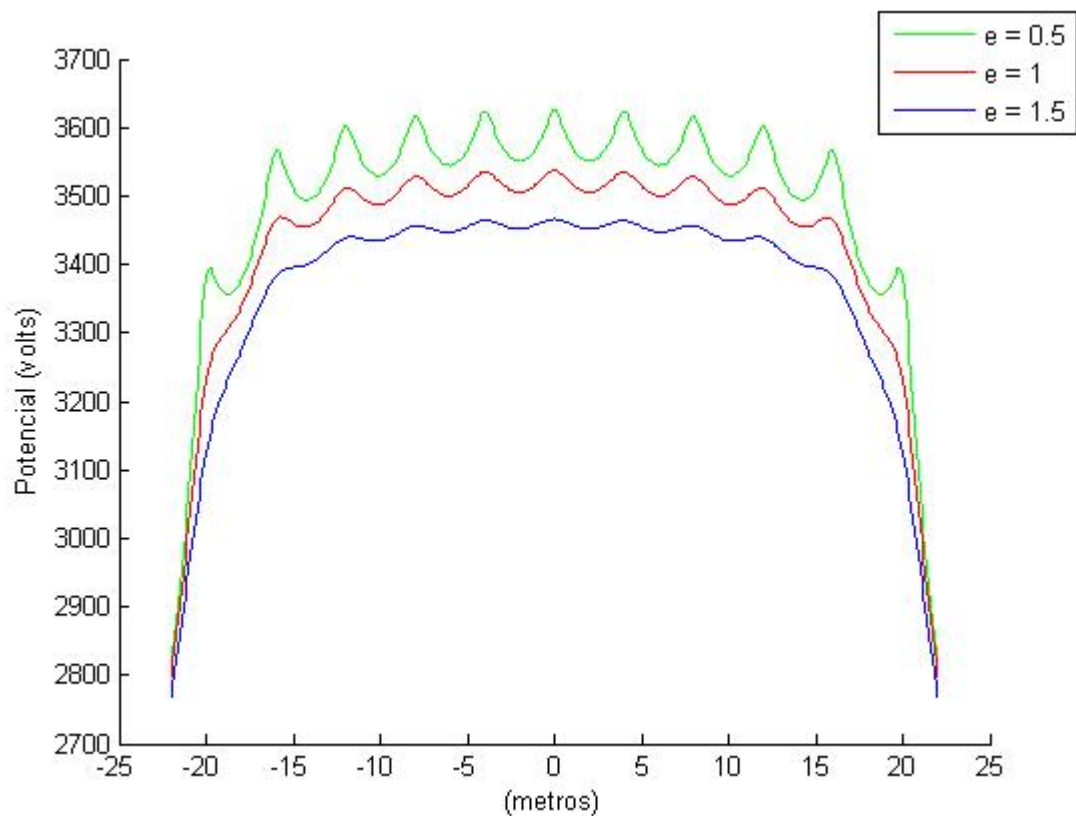


Figura 4.2 – Perfis de potencial segundo x ($y=-10m$) para diferentes profundidades de enterramento

Através da análise dos resultados expressos na figura 4.2 constata-se que aumentando a profundidade de enterramento da malha de terra, ocorre uma redução dos valores dos perfis de potencial e um “alisamento” do seu envelope, isto é, os picos são menos pronunciados. Isto deve-se ao facto da malha estar mais longe da superfície, o que reduz as diferenças de valores ao longo do envelope, tornando-o mais homogêneo.

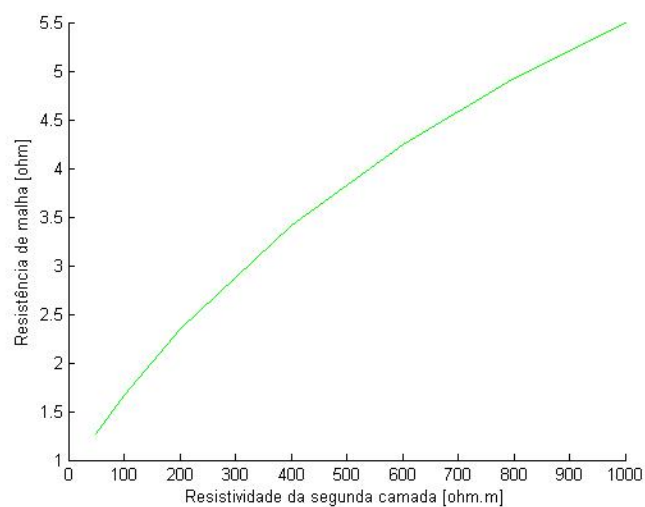
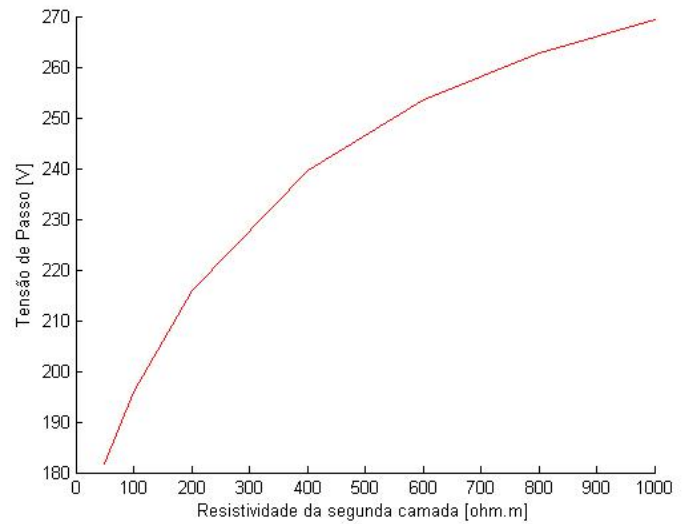
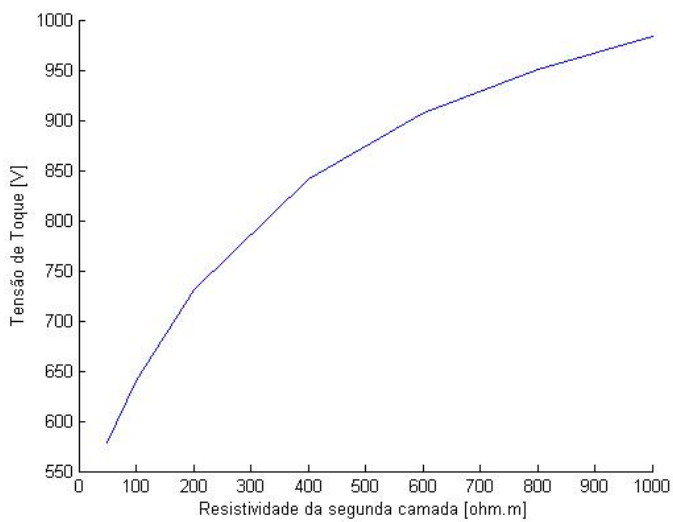
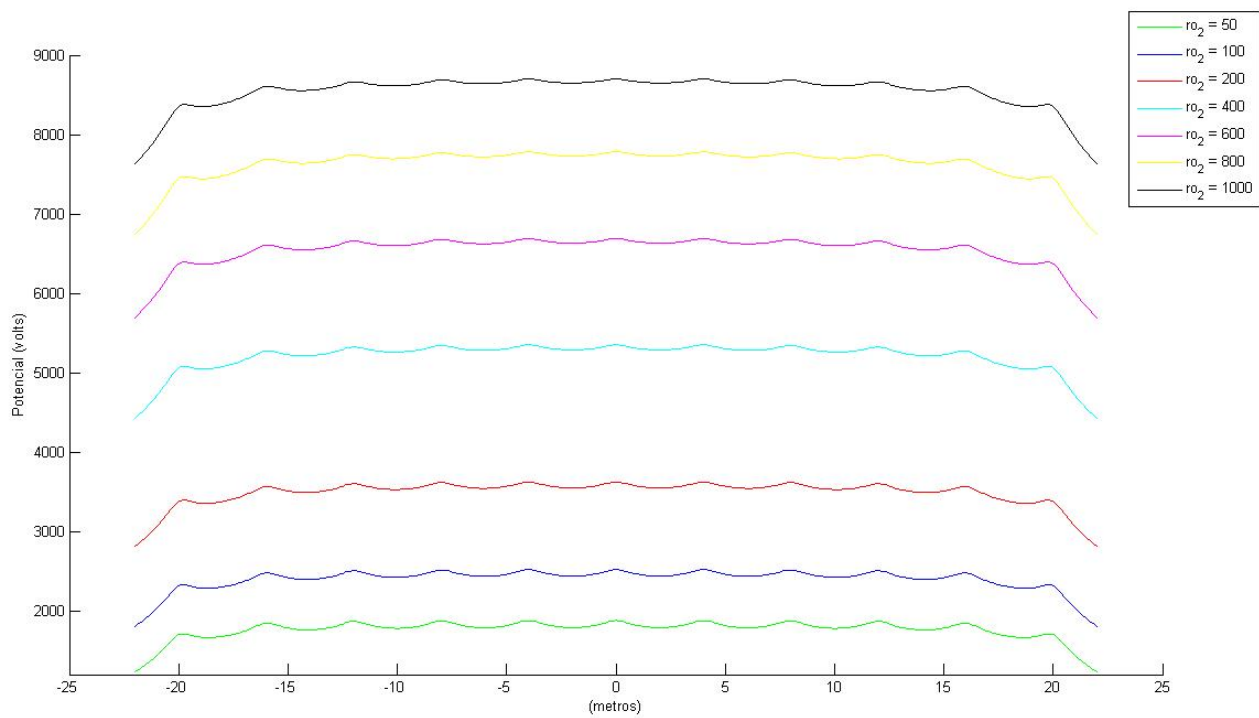
Observando a tabela 4.2 constata-se que o aumento da profundidade de enterramento provoca uma diminuição da resistência de terra e da tensão de passo. A redução da resistência de terra é ligeira enquanto a redução da tensão de passo é mais evidente. Esta última é consistente com o tal “alisamento” dos perfis, pois como a tensão de passo é calculada como a diferença entre os potenciais de pontos colocados a 1 metro de distância, tendo, esses perfis, valores mais próximos ter-se-á uma tensão de passo mais baixa. Por outro lado, a tensão de toque aumenta com a profundidade de enterramento, o que se deve ao facto de esta ser calculada como a diferença entre a tensão de malha e o potencial num certo ponto. A tensão de malha mantém-se sensivelmente constante, pois a resistência de malha em pouco muda, mas os perfis de potencial têm uma redução evidente o que irá provocar o aumento da tensão de toque.

4.2 Estudo da influência da resistividade da segunda camada nos resultados

De forma a estudar a influência que a resistividade da segunda camada tem sobre os resultados considera-se que esse parâmetro irá variar entre $\rho_2=50\Omega.m$ e $\rho_2=1000\Omega.m$. A resistividade da primeira camada é mantida nos $\rho_1=200\Omega.m$ e a altura da primeira camada é $h=8m$. A profundidade de enterramento da malha de terra é fixa nos $e=0.5m$.

Tabela 4.3 – Influência da variação de ρ_2 nos resultados

	Resistividade da segunda camada ρ_2 [$\Omega.m$]	Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]
Malha 4	50	1.2684	181.7	578.6
Malha 5	100	1.6636	195.8	640.6
Malha 6	200	2.3443	215.8	730.7
Malha 7	400	3.4141	239.5	840.8
Malha 8	600	4.2445	253.5	906.8
Malha 9	800	4.9231	262.7	951.3
Malha 10	1000	5.4934	269.3	983.6



Com os resultados expressos na tabela 4.3 obteve-se, para facilidade de percepção, as figuras 4.4, 4.5 e 4.6 que expressam os resultados em função da resistividade da segunda camada.

Observando os resultados obtidos, figuras de 4.3 a 4.6 e a tabela 4.3, pode-se concluir que o aumento da resistividade da segunda camada provoca um aumento de: resistência de malha, tensões de passo e toque e também dos perfis de potencial. Isto é consistente com o facto de, ao aumentar-se a resistividade da segunda camada de terra, ser mais difícil a corrente escoar-se, o que provocará um aumento dos potenciais envolvidos, o que reflecte os resultados obtidos. Os perfis têm um aumento acentuado, aumentando o valor máximo de cerca de 1900 V ($\rho_2 = 50 \Omega.m$ – figura 4.3) para, aproximadamente, 8700 V ($\rho_2 = 1000 \Omega.m$ – figura 4.3). Pelas figuras 4.4, 4.5 e 4.6 é evidente o aumento da tensão de toque, passo e da resistência de terra, respectivamente.

Ir-se-á repetir os procedimentos efectuados anteriormente mas agora considerando diferentes espessuras para a primeira camada. Representar-se-á apenas os valores da resistência de terra e das tensões de passo e toque, não se representando os perfis pois para o exercício que se fará de seguida estes não trarão valor acrescentado. Os resultados encontram-se expressos na tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Resultados da malha para diferentes valores de ρ_2 e de h

Espessura da primeira camada (h) [m]	Resistividade da segunda camada (ρ_2) [$\Omega \cdot m$]	Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]
2	50	0.8455	158.9	416.1
	100	1.3627	183.9	539.0
	200	2.3443	215.8	730.7
	400	4.1141	290.5	1001.4
	600	5.6801	345.9	1193.2
	800	7.0804	390.9	1340.0
	1000	8.3344	439.2	1456.7
4	50	1.0084	163.7	484.0
	100	1.4825	185.3	582.1
	200	2.3443	215.8	730.7
	400	3.8023	253.1	926.7
	600	5.0127	276.1	1054.6
	800	6.0464	292.1	1146.2
	1000	6.9419	309.0	1215.7
8	50	1.2684	181.7	578.6
	100	1.6636	195.8	640.6
	200	2.3443	215.8	730.7
	400	3.4141	239.5	840.8
	600	4.2445	253.5	906.8
	800	4.9231	262.7	951.3
	1000	5.4934	269.3	983.6
16	50	1.6027	202.8	670.8
	100	1.8833	208.3	695.9
	200	2.3443	215.8	730.7
	400	3.0260	224.3	770.4
	600	3.5288	228.9	792.7
	800	3.9269	231.9	807.0
	1000	4.2545	234.0	817.0

Usando os valores do solo uniforme ($\rho_2=200\Omega.m$) como referência normaliza-se os resultados e obtêm-se os gráficos das figuras 4.7, 4.8 e 4.9.

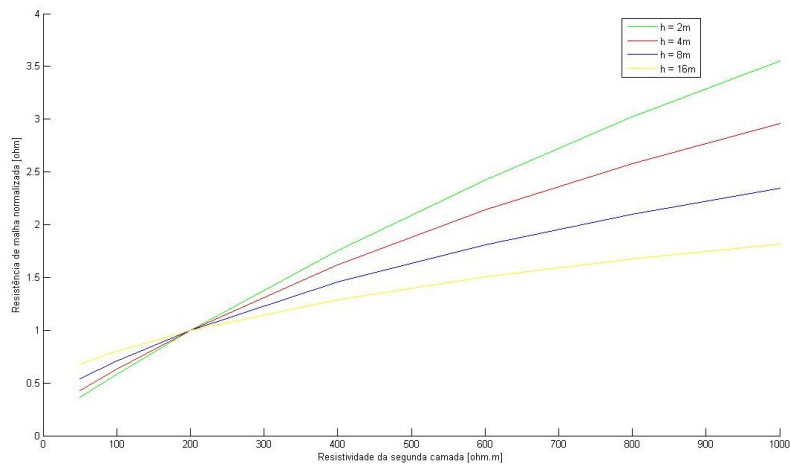


Figura 4.7 – Resistência de terra normalizada em função de ρ_2 , para diferentes espessuras da primeira camada

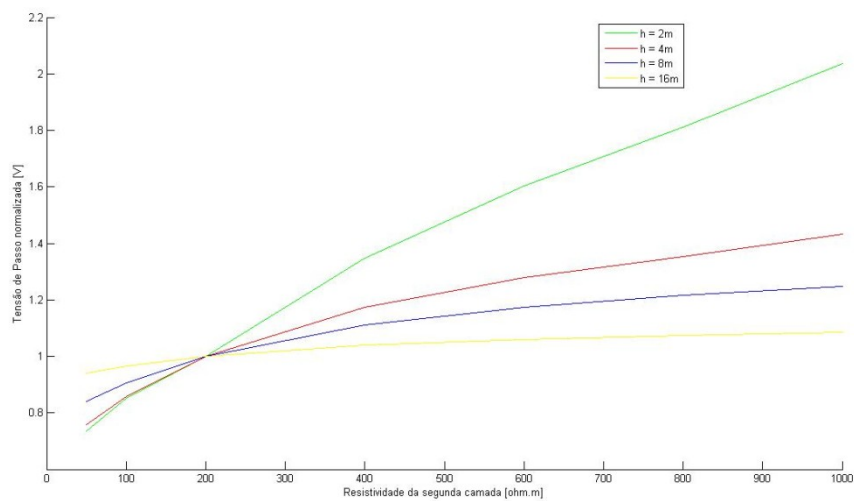


Figura 4.8 – Tensão de passo normalizada em função de ρ_2 , para diferentes espessuras da primeira camada

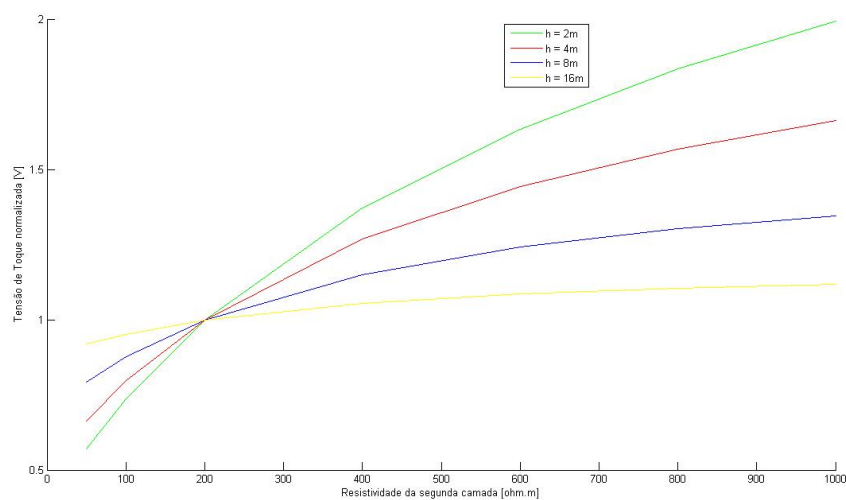


Figura 4.9 – Tensão de toque normalizada em função de ρ_2 , para diferentes espessuras da primeira camada

Observando as figuras 4.7, 4.8 e 4.9 constata-se, tal como já tinha sido visto, que os três parâmetros, resistência de malha, tensão de passo e tensão de toque, aumentam com a resistividade da segunda camada, sendo que as curvas apresentam diferentes declives consoante a espessura da primeira camada. Todas as curvas intersectam-se no ponto $x=200$ e $y=1$, que corresponde à situação de solo homogêneo. Os declives das curvas são inversamente proporcionais à espessura da primeira camada, ou seja, quanto menor a espessura maior o declive e vice-versa. Isto deve-se ao facto de a influência da resistividade da segunda camada ser diferente consoante a espessura da primeira camada. Se a sua espessura for pequena então a resistividade da segunda camada terá uma influência muito elevada sobre os parâmetros. Essa influência irá diminuir com o aumento da espessura da primeira camada, por isso é que para $h=16\text{m}$ se terá curvas com pequenos declives. Para valores de ρ_2 menores que $200 \Omega\cdot\text{m}$, a curva correspondente a $h=16\text{m}$ terá valores mais elevados para os três parâmetros e a curva $h=2\text{m}$ valores mais baixos, pois neste ultimo caso a influência da segunda camada é maior e como a resistividade possui valores baixos, também aqueles três parâmetros apresentaram valores mais reduzidos que nas outras curvas. Para valores de ρ_2 maiores que $200 \Omega\cdot\text{m}$, a ordem das curvas inverte-se porque neste caso será para valores de h baixos que mais se sentirá a influência dos valores elevados da resistividade da segunda camada. Ficou assim provado o que já se previa fisicamente.

5. METODOLOGIAS DE OPTIMIZAÇÃO

O processo de optimização abordado neste trabalho baseia-se em dois processos distintos:

- Técnica de espaçamento variável (método de Sverak);
- Colocação de estacas verticais.

5.1 Método de Sverak (técnica de espaçamento variável)

5.1.1 Descrição do método

A técnica de espaçamento variável que será utilizada no programa foi originalmente proposta por Sverak[6]. Esta partiu do conhecido facto, de que é nas sub-malhas periféricas que se encontram os gradientes de potencial mais gravosos. Numa tentativa de tentar resolver esta questão, a técnica proposta tem como ideia base a colocação de material condutor onde ele é necessário, movendo assim material condutor para a periferia e ficando o centro com menos material condutor, o que não provoca problemas. Esta técnica é um processo iterativo que partindo de uma malha igualmente espaçada que não cumpre os critérios de segurança, introduz sucessivas modificações no espaçamento entre condutores até que a malha de terra cumpra os tais critérios. Em cada iteração i , o método realiza os passos de 1 a 6. A expressão (5.1) não é mais que a expressão empírica do IEEE para o factor de correcção, K_i . Este factor tem em consideração a não uniformidade da corrente ao longo dos condutores da malha. Esta expressão K_i utilizada vários anos no IEEE Std foi contudo modificada na versão mais recente [1]. Na expressão (5.2) determina-se um factor (A) para a respectiva iteração que será utilizado em (5.3) para retirar pontos de uma curva (K_{ci} 's). Esses pontos serão utilizados para determinar distâncias (K_{dik} 's) no ponto 4. No ponto 5 calcula-se a distância D_i , que será utilizada na expressão seguinte (5.6) para adaptar as distâncias K_{dik} à malha em estudo.

1. Calcular K_{ik} para cada sub-malha k na direcção vertical ou horizontal:

$$K_{ik}=0.65+0.172(n+1)-(k-1) \quad (5.1)$$

em que n é o número total de sub-malhas na direcção considerada.

2. Determinar o factor A :

$$A_i=0.9+\left(\frac{i}{10}\right) \quad (5.2)$$

3. Calcular K_{ci} para cada sub-malha k na direcção considerada:

$$K_{cik}=A_i^{(1.3K_{ik})} \quad (5.3)$$

4. Determinar K_{Dik} para cada sub-malha k na direcção considerada:

$$K_{Dik} = \frac{1}{1 + K_{cik}} \quad (5.4)$$

5. Determinar a distância base:

$$D_i = \frac{L}{\sum_{k=1}^n K_{Dik}} \quad (5.5)$$

em que L é o comprimento lateral da grelha na direcção considerada.

6. Calcular, por fim, o comprimento de cada espaçamento:

$$L_{ik} = D_i K_{Dik} \quad (5.6)$$

A técnica tal como foi aqui descrita, realiza uma optimização independente segundo cada direcção e tem como critério de paragem o cumprimento dos critérios de segurança, ou seja, pára na iteração para a qual a rede já cumpre esses tais critérios. Mas a sua utilização no programa desenvolvido seguirá uma abordagem um pouco diferente, isto é, a optimização será completa segundo cada uma das direcções, pois como veremos a seguir, existem inúmeras vantagens em realizar a optimização completa. Isto corresponderá a realizar 5 iterações segundo cada direcção, sendo este o número máximo de iterações permitidas. Isto deve-se ao facto de esta técnica diminuir os espaçamentos na periferia, enquanto aumenta no centro da malha. Se o número de iterações for muito elevado, os espaçamentos no centro tornam-se demasiado grandes, para malhas densas, e o limite relativo à tensão de toque passa a ser aí violado em todas as iterações. Para além disto verifica-se que, para malhas densas, o espaçamento entre os condutores da periferia diminui de tal forma, que se torna praticamente nulo, o que fisicamente não é correcto.

Na secção seguinte (5.1.2) é apresentado um caso de estudo que evidencia as vantagens associadas a esta técnica.

5.1.2 Aplicação do método (caso de estudo)

De forma a verificar a influência dos processos de optimização ir-se-á considerar o seguinte caso de estudo:

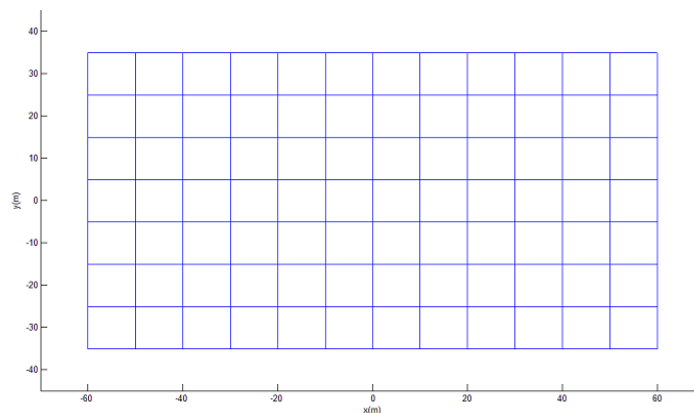


Figura 5.1 – Malha de estudo para a técnica de espaçamento variável

Tabela 5.1 – Dados da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável

I [A]	ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	e [m]	h [m]	c [m]	l [m]	D [m]	d [m]
2500	200	400	0.5	10	120	70	10	0.015

Para esta malha obtiveram-se os resultados expressos na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável

Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]
1.6432	116.5	615.5

O perfil 3D obtido encontra-se representado na figura 5.2.

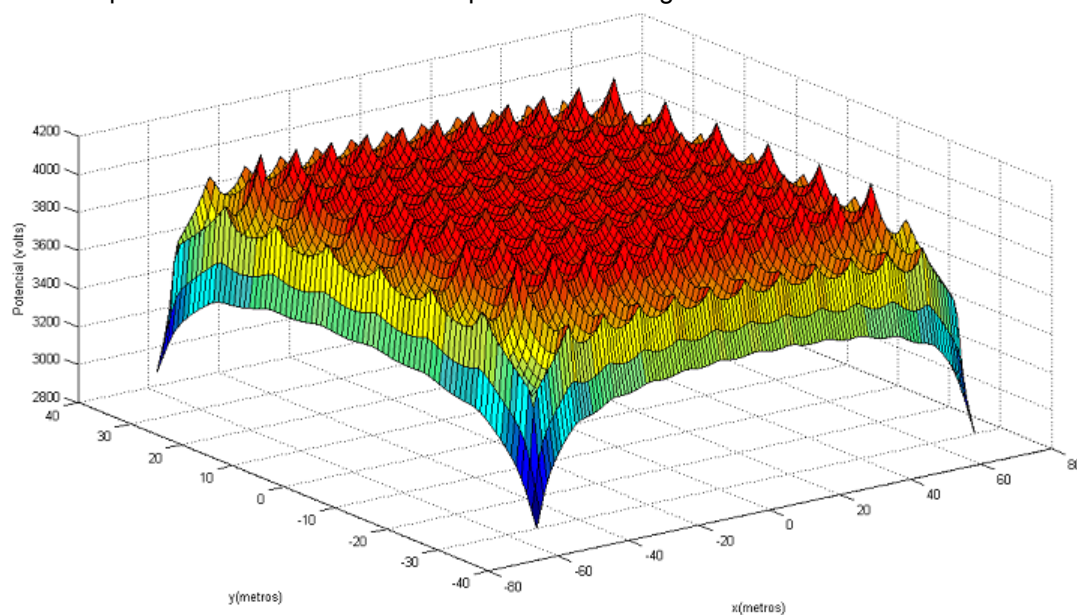


Figura 5.2 – Plot 3D da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável

Os valores de tensão de passo e de toque correspondem aos valores máximos. A tensão de passo máxima foi encontrada na diagonal. O valor máximo da tensão de toque foi encontrada no ponto $x=-57$ e $y=-32$, sendo que esta pesquisa apenas se faz no quarto inferior esquerdo da malha devido à simetria da mesma.

Os perfis de tensão segundo x e segundo y são apresentados, respectivamente, nas figuras 5.3(a) e 5.3(b).

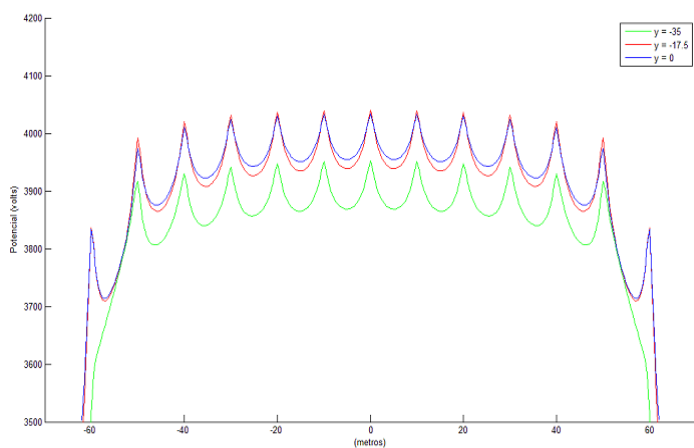


Figura 5.3 (a) – Perfil de potencial segundo x da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável

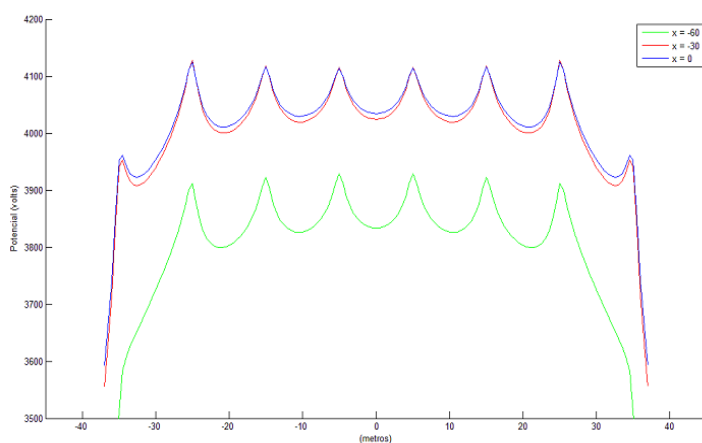


Figura 5.3 (b) – Perfil de potencial segundo y da malha de estudo para a técnica de espaçamento variável

Serão calculadas, nas secções seguintes, reduções em termos de percentagem, sendo que a expressão usada é a seguinte:

$$\text{Redução(\%)} = \frac{(\text{Valor}_{\text{referência}} - \text{Valor})}{\text{Valor}_{\text{referência}}} * 100$$

De seguida realizou-se a optimização de Sverak tal como foi descrita anteriormente e obteve-se a malha da figura 5.4.

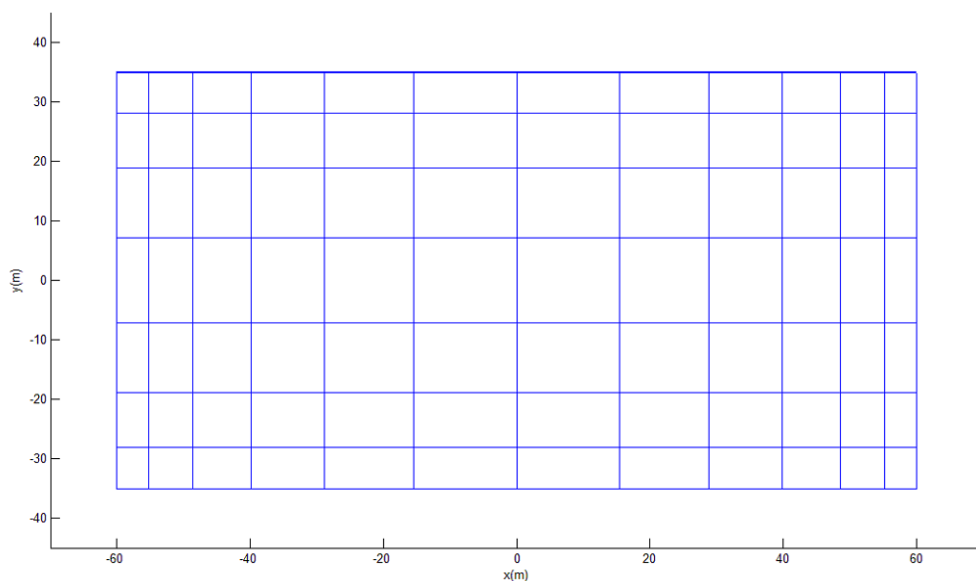


Figura 5.4 – Malha de estudo otimizada em espaçamento

Para esta malha obteve-se os resultados expressos na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultados da malha de estudo otimizada segundo Sverak

Resistência de Malha [Ω] Redução (%)	Tensão de Passo [V] Redução (%)	Tensão de Toque [V] Redução (%)
1.5852 3.5 %	117.9 -1.2%	523.0 15%

As reduções em percentagem foram calculadas em relação aos valores obtidos na tabela 5.2.

O perfil 3D obtido está representado na figura 6.

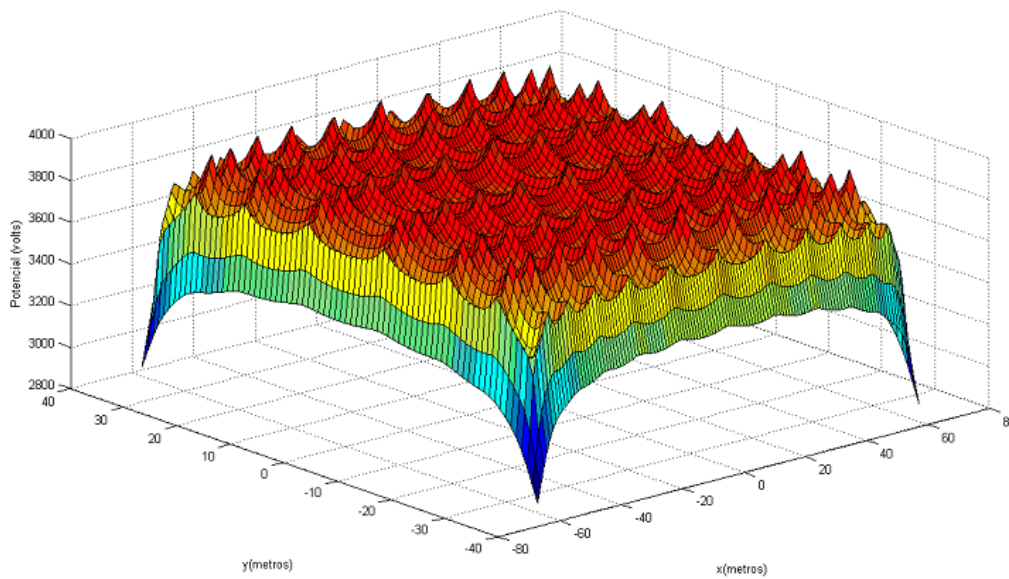


Figura 5.5 – Plot 3D da malha de estudo otimizada em espaçamento

Os valores de tensão de passo e de toque correspondem aos valores máximos. A tensão de passo máxima foi encontrada na diagonal. O valor máximo da tensão de toque foi encontrada no ponto $x=-60$ e $y=-35$, sendo que esta pesquisa apenas se faz no quarto inferior esquerdo da malha devido à simetria da mesma.

Os perfis de tensão segundo certas direcções de x e y estão representados, respectivamente, nas figuras 5.6(a) e 5.6(b).

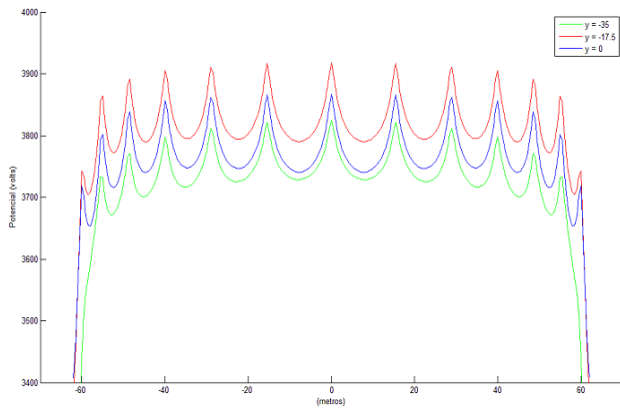


Figura 5.6 (a) – Perfil de tensão para a malha otimizada segundo x

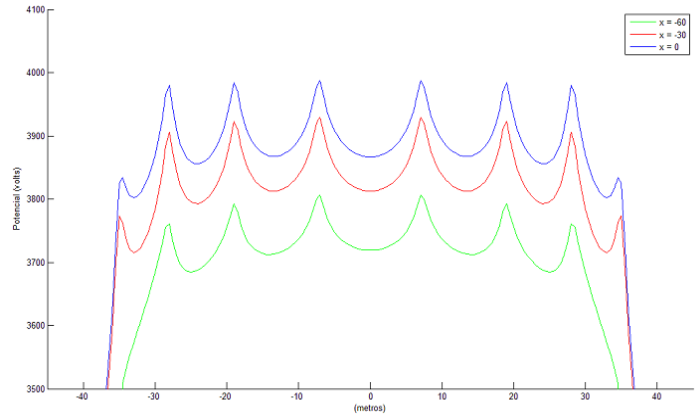


Figura 5.6 (b) – Perfil de tensão para a malha otimizada segundo y

- Há uma redução dos valores dos perfis de potencial, sendo que os envelopes dos perfis se aproximam;
- O potencial encontra-se mais uniformizado ao longo da área da malha;
- A otimização provoca uma ligeira descida da resistência de malha;
- A otimização provoca um ligeiro aumento da tensão de passo, pois os condutores movem-se do centro para a periferia, o que provoca um aumento do espaçamento ao meio;
- A grande vantagem da otimização verifica-se na redução acentuada da tensão de toque;

Por tudo isto verifica-se que, tal como fora anteriormente dito, a técnica de espaçamento variável apresenta inúmeras vantagens que serão aproveitadas no programa de otimização desenvolvido.

5.2 Colocação de estacas verticais

5.2.1 Descrição da técnica

A colocação de estacas verticais é uma prática comum, entre os projectistas que dimensionam malhas de terra. Na figura 5.7 está exemplificada essa colocação.

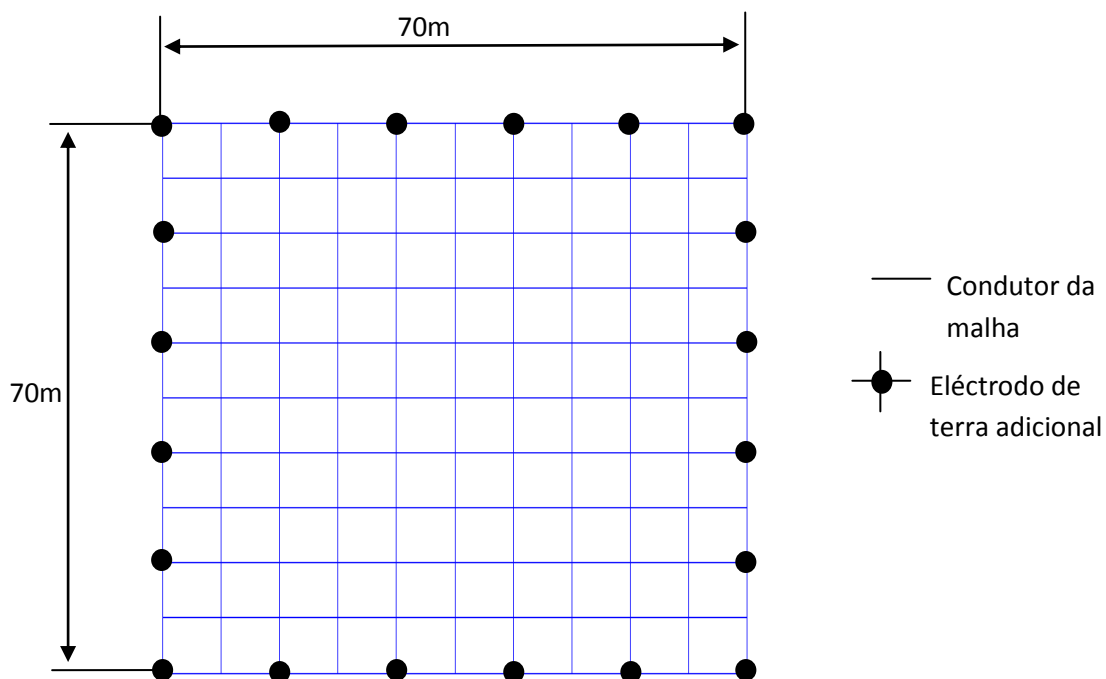

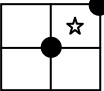
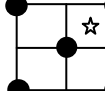
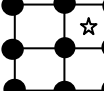


Figura 5.7 – Malha de terra com eléctrodos adicionais no perímetro (retirado de [1])

O número de estacas, bem como a sua localização irão influenciar o comportamento da malha. Existem vários estudos sobre esta influência sendo que se destacam os apresentados nas referências [7] e [8]. Tal como referido em [7], as estacas constituem bons escoadores de corrente, pois os seus valores de densidade de corrente média são mais elevados que os valores dos condutores horizontais (tal como se pode verificar pela figura 5.8, cujos valores de densidade de corrente foram obtidos através do programa desenvolvido).

O estudo conduzido em [7] consistiu em considerar uma malha quadrada 3x3 com 20 metros de lado, enterrada a uma profundidade de 0.5m, considerando diferentes colocações de estacas (de 10 metros de comprimento):

Tabela 5.4 – Resistência de malha e Tensão de Toque para várias configurações de malha (retirado de [6])

	1	2	3	4
Configuração de eléctrodo				
Resistência (Ω)	2.58	2.28	2.00	1.81
Tensão de Toque (%)	35.0	31.0	25.0	21.0

Como se pode verificar, pela tabela 5.4, a colocação de estacas provoca uma redução da resistência bem como da tensão de toque.

Para estudar as questões aqui debatidas relativas à optimização, ir-se-á apresentar de seguida um caso de estudo (secção 5.2.2). Far-se-á a comparação entre várias configurações diferentes de colocação de estacas e por fim ir-se-á, para uma dada configuração de estacas, verificar o efeito do aumento do comprimento das mesmas.

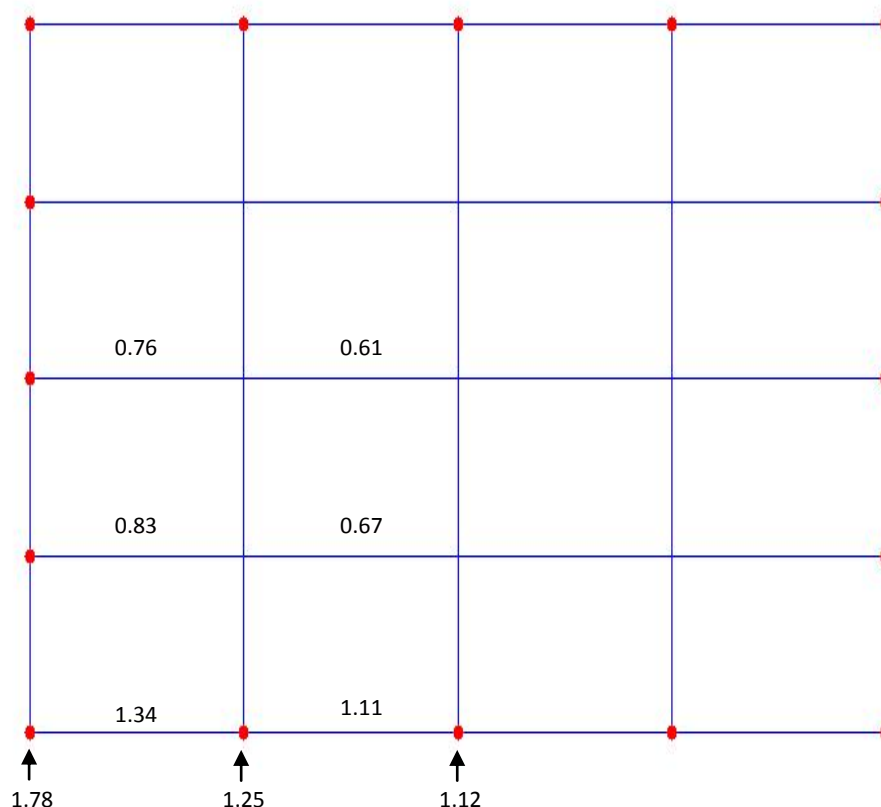


Figura 5.8 – Malha de terra com valores relativos da densidade de corrente nos segmentos da malha e nas estacas

Os valores da figura 5.8 foram obtidos considerando os dados da tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Dados para a malha da figura 5.8

I [A]	ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	e [m]	h [m]	c [m]	l [m]	D [m]	d [m]	c_est [m]
1000	200	400	0.5	10	40	40	10	0.015	7

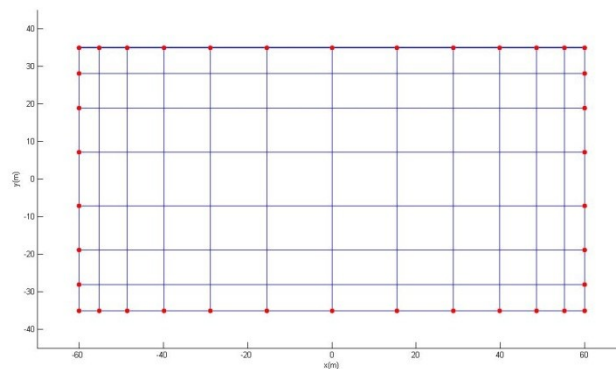
Na tabela 5.5 c_est significa comprimento de estacas utilizadas.

5.2.2 Aplicação da técnica (caso de estudo)

5.2.2.1 Diferentes configurações de colocação de estacas

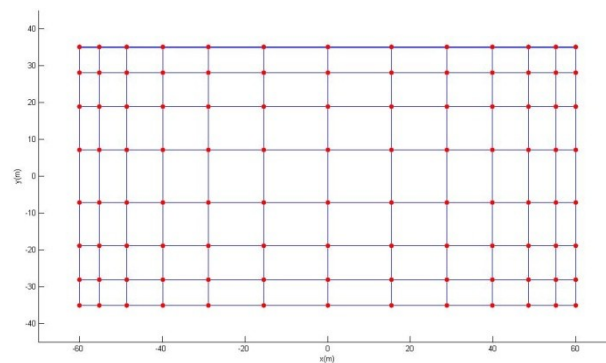
Nesta alínea ir-se-á comparar a influência que diferentes configurações na colocação de estacas apresentam sobre os seguintes parâmetros: resistência de malha, tensão de passo e tensão de toque. Utilizou-se a malha otimizada apresentada na secção 5.1.2, figura 5.4, com estacas de 7 metros de comprimento. Os resultados obtidos encontram-se representados nas figuras 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e na tabela 5.6.

- Estacas em todas as intersecções da periferia – Configuração 1



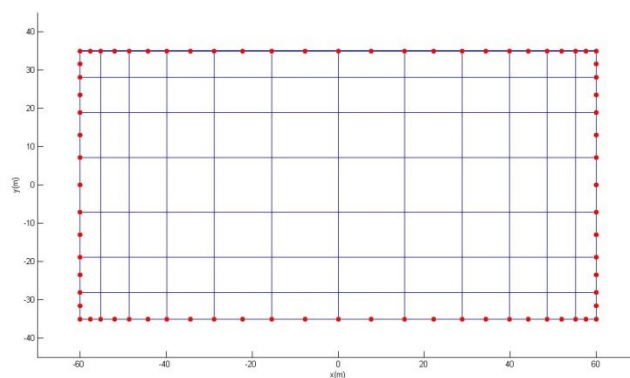
**Figura 5.9 – Malha com estacas na periferia
Configuração 1**

- Estacas em todas as intersecções – Configuração 2



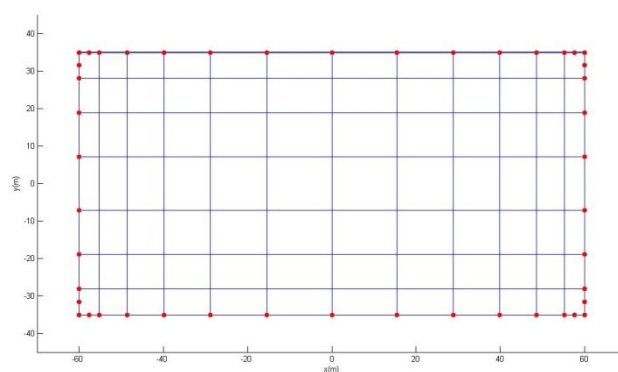
**Figura 5.10 – Malha com estacas em toda a área
Configuração 2**

- Estacas em todas as intersecções, mais meios da periferia – Configuração 3



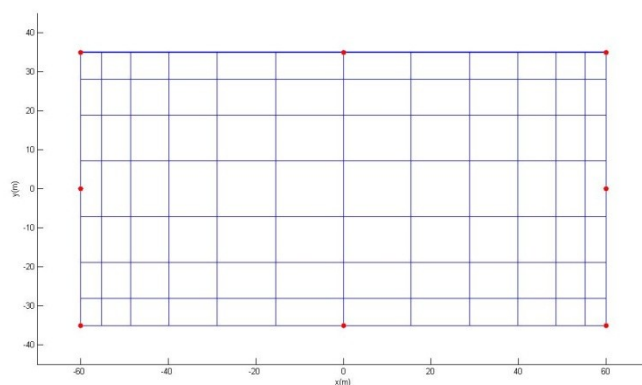
**Figura 5.11 – Malha com estacas na periferia, cada intersecção + meios
Configuração 3**

- Estacas em todas as intersecções da periferia mais 8 condutores nas sub-malhas dos cantos – Configuração 4



**Figura 5.12 – Malha com estacas na periferia + 8 condutores
Configuração 4**

- Estacas nas intersecções dos cantos e nos meios da periferia – Configuração 5



**Figura 5.13 – Malha com estacas no canto e meios
Configuração 5**

Tabela 5.6 – Resultados das malhas com diferentes configurações de estacas

	Resistência de Malha [Ω] Redução (%)	Tensão de Passo [V] Redução (%)	Tensão de Toque [V] Redução (%)	Material adicional (%)
Malha_conf_1	1.5230 3.9%	83.7 29%	328.8 37.1 %	12.45%
Malha_conf_2	1.5168 4.3%	79.7 32.4%	322.7 38.3%	28.02%
Malha_conf_3	1.4910 5.94%	76.6 35.0%	409.2 21.8 %	22.15%
Malha_conf_4	1.5116 4.64%	81.2 31.1%	401.3 23.3%	14.69%
Malha_conf_5	1.5683 1.07%	110.9 5.9%	377.2 27.88%	2.9%

As reduções foram calculadas em relação aos valores obtidos para a malha otimizada, em termos de espaçamento, tabela 5.3.

- A introdução de estacas provoca uma redução visível dos 3 parâmetros em estudo, resistência de malha, tensão de passo e tensão de toque, em todas as configurações;

- É na tensão de toque que essa redução é mais evidente, podendo baixar o seu valor de 523 V para cerca de 323 V, isto para a configuração com estacas em toda a área;

- A configuração 3 é a que verifica valores mais reduzidos para a resistência de malha e para a tensão de passo;

- A configuração 2, estacas em toda a área, é a que verifica um valor mais reduzido para a tensão de toque, seguida da configuração 1;

- Comparando agora a configuração 1 com a 4 (que no fundo é semelhante à 1 mas possui mais 8 condutores nos cantos) verifica-se que a introdução de esses 8 condutores adicionais apresenta vantagens na redução da resistência de malha e na tensão de passo, mas provoca um aumento da tensão de toque;

- A configuração 5 é a que apresenta uma melhor relação entre o material adicional e os ganhos em termos de tensão de toque.

O método de optimização que será usado para o programa irá incluir duas configurações de colocação de estacas distintas, pelo que se terá de escolher duas configurações das acima representadas. Para esta escolha tem de se ter em conta que o programa visa reduzir o material utilizado na construção da malha e que o parâmetro mais determinante daqueles três é a tensão de toque, pois é esta que mais usualmente ultrapassa os valores de segurança. Dito isto e tendo em conta as conclusões acima enumeradas, escolhem-se as configurações 1 (estacas na periferia) e 5 (estacas nos cantos e meios) pelas seguintes razões: a configuração 5 consegue uma acentuada redução da tensão de toque com pouco material adicionado; a configuração 1 apresenta um valor mais reduzido da tensão de toque em comparação com as configurações 3 e 4, com menos material utilizado. A configuração 2 não é utilizada pois o ganho que se tem em termos de redução de tensão de toque em relação à 1 não compensa o material adicional que se usa.

5.2.2.2 Diferentes comprimentos de estaca

Nesta alínea estudou-se o efeito do aumento do tamanho de estacas nos seguintes parâmetros: resistência de malha, tensão de passo e tensão de toque. A malha utilizada foi a de igual espaçamento (figura 5.1) e utilizou-se a primeira configuração de estacas, ou seja, estacas em todas as intersecções da periferia. Variou-se o tamanho das estacas desde 1 metro até 9 metros. Obtiveram-se os resultados expressos na tabela 5.7, que estão representados graficamente na figura 5.14 (os valores foram normalizados para facilidade de comparação).

Tabela 5.7 – Resultados obtidos para a malha com estacas de diferentes tamanhos

	Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]
Estacas 1 metro	1.6292	111.0306	583.7972
Estacas 2 metros	1.6177	105.2858	554.4622
Estacas 3 metros	1.6071	99.8857	528.1001
Estacas 4 metros	1.5970	94.8986	504.4183
Estacas 5 metros	1.5872	90.3390	483.178
Estacas 6 metros	1.5776	86.1961	463.9663
Estacas 7 metros	1.5683	82.4454	446.6966
Estacas 8 metros	1.5591	79.0557	431.1049
Estacas 9 metros	1.5502	75.9939	416.9995

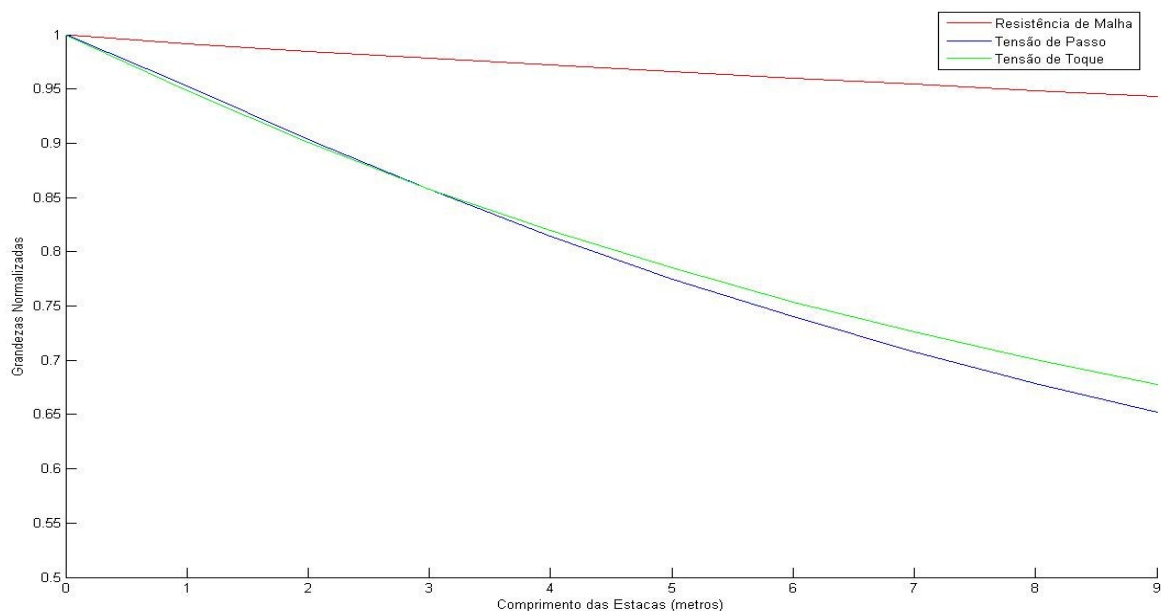


Figura 5.14 – Representação gráfica dos resultados da tabela 5.7

Como seria de esperar o aumento do comprimento das estacas provoca uma redução nos três parâmetros aqui estudados. Observando a figura 5.14 torna-se evidente que a introdução de estacas, em pouco reduz o valor da resistência de malha. As reduções mais evidentes verificam-se na tensão de passo e de toque, sendo a redução um pouco maior na primeira.

Para o programa desenvolvido terão de ser escolhidos dois tamanhos de estaca. Como o programa apresenta a limitação de considerar que as estacas estão integralmente na primeira camada, não se poderá escolher dois tamanhos fixos, pelo que se optará pelos seguintes tamanhos de estaca:

- $h/2$ arredondado para o inteiro imediatamente inferior;
- $h-1$;

sendo h a espessura da primeira camada.

Devido àquela limitação, não foram calculados para este caso os ganhos.

5.3 Método de otimização desenvolvido

5.3.1 Fluxograma e descrição do método

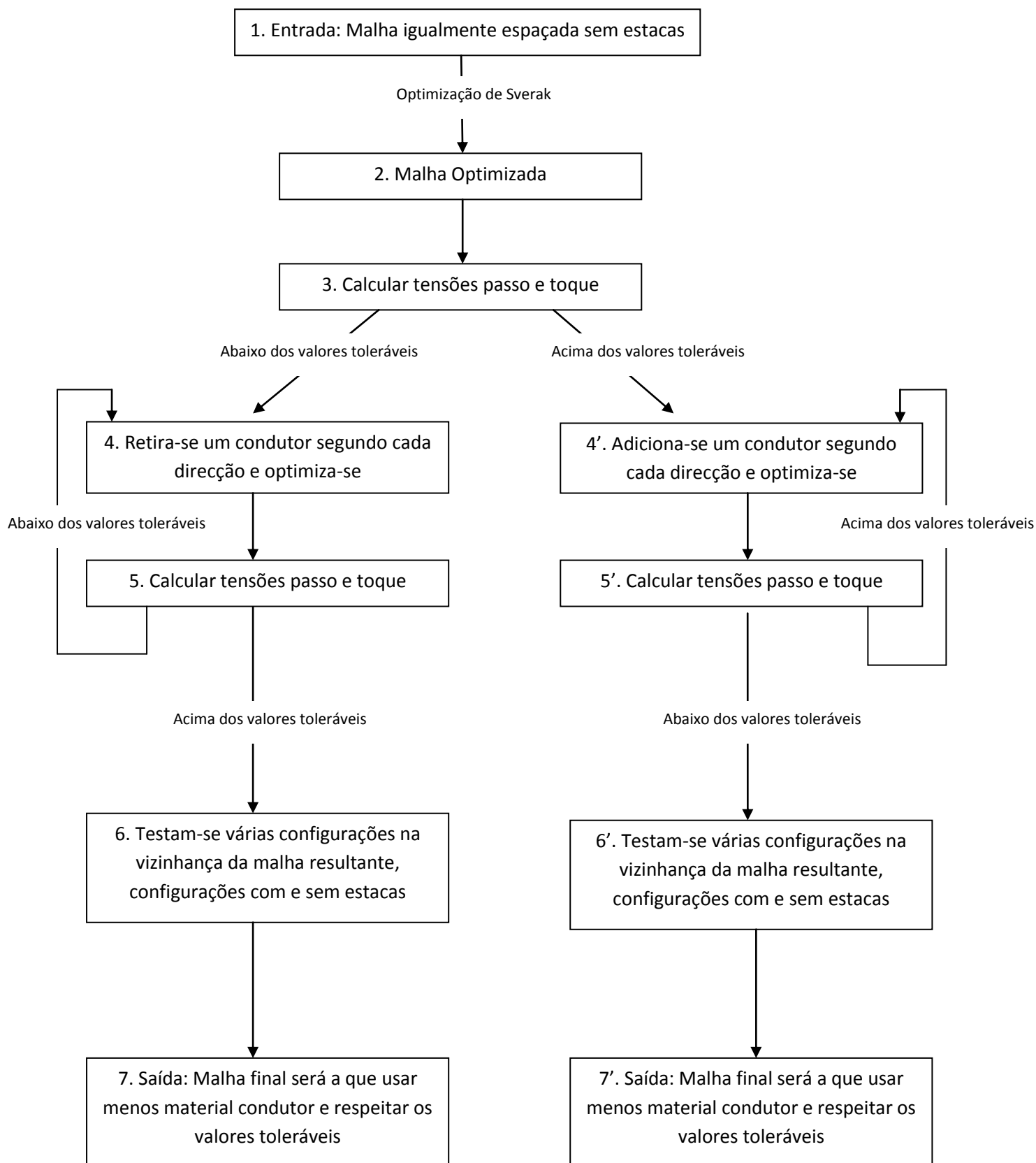


Figura 5.15 – Fluxograma do método de otimização desenvolvido

O método descrito no fluxograma da figura 5.15 consiste no seguinte: é dada como entrada uma malha igualmente espaçada sem estacas, bem como os restantes dados do problema. De seguida realiza-se uma optimização aplicando o método de Sverak, para tirar partido de todas as vantagens associadas a esta técnica. Calculam-se as tensões de passo e toque e verifica-se se os valores obtidos se situam abaixo ou acima dos valores toleráveis. Pode-se então obter dois resultados, que irão decidir qual o caminho que se irá seguir:

- 1- Tensões abaixo dos valores toleráveis;
- 2- Tensões acima dos valores toleráveis.

Resultados abaixo dos valores toleráveis:

A ideia base consiste em retirar material, um condutor segundo cada direcção, de seguida optimiza-se (método de Sverak), calculando as tensões de passo e de toque. Se os resultados obtidos estiverem abaixo dos valores limites, repete-se o procedimento. Isto acabará quando se obtiver uma malha optimizada, em termos de espaçamento, que não respeite os valores limite. Neste ponto dispõe-se da informação do número de condutores segundo cada direcção, em torno dos quais ter-se-á de encontrar a configuração óptima. Assim ir-se-á testar um conjunto de configurações com estacas e sem estacas com um número de condutores em torno do obtido e ir-se-á compará-las de forma a verificar qual delas requer menos material e respeita os limites toleráveis para as tensões. Essa será a malha óptima, no exemplo que se irá apresentar a seguir exemplifica-se quais as configurações testadas.

Resultados acima dos valores toleráveis:

A ideia é em muito semelhante à explicada acima, mas neste caso vai-se adicionando material, um condutor segundo cada direcção, até se obter uma malha que respeite os limites toleráveis. Aí ir-se-á testar um conjunto de configurações com um número de condutores em torno do obtido. A malha que resulta desse processo será a que necessita de menos material e que respeita os valores toleráveis das tensões. No exemplo que se irá apresentar a seguir exemplificam-se quais as configurações testadas.

5.3.2 Exemplo de aplicação

Considere-se a seguinte malha de terra como entrada (Passo 1):

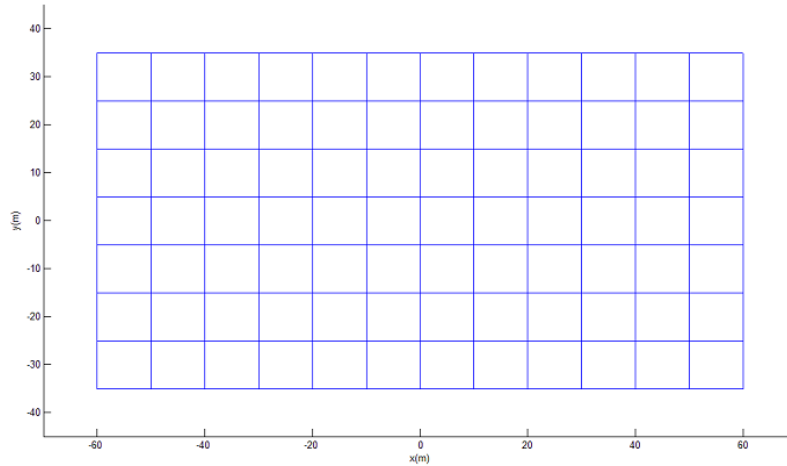


Figura 5.16 – Malha de estudo do método de otimização desenvolvido

Tabela 5.8 – Dados da malha de estudo do método de otimização desenvolvido

I [A]	ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	e [m]	h [m]	c [m]	l [m]	D [m]	d [m]
3500	200	400	0.5	10	120	70	10	0.015

Considera-se que existe uma camada de gravilha à superfície do solo com resistividade $\rho_s=2500 \Omega \cdot m$, de espessura 0.1 m. O tempo de defeito considerado é de $t_s=0.5$ s.

Sendo que os valores toleráveis são:

Influência da camada de gravilha: Factor $C_s = 1 - \frac{0.09(1 + \frac{\rho_1}{\rho_s})}{2h_s + 0.09} = 0.7184$

Resistência pé-solo: $R_f = 3 \cdot C_s \cdot \rho_s = 5388 \Omega$

Corrente tolerável: $I_b = \frac{0.157}{\sqrt{0.5}} = 0.2220$ A

Tensão de passo tolerável: $U_{Ptol} = (1000 + 6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{0.6}} = 2615$ V

Tensão de toque tolerável: $U_{Ttol} = (100 + 1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{0.6}} = 820$ V

Para esta malha (13x8) obteve-se os resultados expressos na tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Resultados da malha de estudo do método de otimização desenvolvido

Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]	Comprimento Total [m]
1.6432	163.1	861.8	1870

O segundo e terceiro passos consistem em otimizar a malha e calcular as tensões de passo e toque. Obtêm-se os resultados expressos na tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Resultados da malha de estudo otimizada em termos de espaçamento

Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]	Comprimento Total [m]
1.5852	165.1	732.3	1870

Agora testa-se e verifica-se que os valores das tensões estão abaixo dos toleráveis, logo o próximo passo será o 4, seguido do 5 e entramos aqui num ciclo que irá acabar quando se tiver uma malha que não respeite os valores toleráveis para as tensões. Neste ciclo faz-se o seguinte: parte-se de uma malha, igualmente espaçada, 12x7 otimiza-se e testa-se, verificando-se que respeita os valores toleráveis; de seguida pega-se numa 11x6 e repete-se o processo... O ciclo termina quando se testa a malha 10x5 otimizada, cuja tensão de toque 890 V viola os limites. O próximo passo 6 consiste em testar um conjunto de configurações em torno deste número de condutores, sendo que algumas configurações apresentam estacas de diferentes tamanhos. As configurações testadas são as representadas na tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Configurações testadas e resultados obtidos para I=3500 A

Conf.	Nc_x	Nc_y	Opção Estacas	Comp. Est. [m]	Resistência [Ω]	U _{PMax} [V]	U _{TMax} [V]	L [m]	Testada
1	11	6	0	0	1.6105	157.5	807.9	1490	Sim
2	10	5	1	5	1.5795	139.4	714.8	1430	Sim
3	10	5	1	9	1.5449	120.2	623.9	1534	Sim
4	10	5	2	5	1.6113	159.9	791.7	1340	Sim
5	10	5	2	9	1.5965	150.0	741.6	1372	Sim
6	10	6	0	0	1.6175	173.9	839.1	1420	Sim
7	10	6	1	5	1.5697	144.9	661.0	1560	Sim
8	10	6	1	9	1.5358	126.6	571.9	1672	Sim
9	10	6	2	5	1.6033	166.3	747.9	1460	Sim
10	10	6	2	9	1.5899	160.8	701.8	1492	Sim
11	9	4	1	5	1.6005	153.2	835.5	1220	Sim
12	9	4	1	9	1.5650	135.0	739.9	1308	Sim
13	9	4	2	5	1.6312	172.7	917.7	1150	Sim
14	9	4	2	9	1.6138	162.8	861.8	1182	Sim
15	9	5	1	5	1.5892	147.6	776.1	1350	Sim
16	9	5	1	9	1.5544	128.2	682.0	1446	Sim
17	9	5	2	5	1.6173	167.4	849.4	1270	Sim
18	9	5	2	9	1.6015	157.9	798.2	1302	Sim

Nc_x – nº de condutores segundo x (comprimento).

Nc_y – nº de condutores segundo y (largura).

Opção Estacas – 0: Sem estacas;

1: Estacas em todas as intersecções da periferia;

2: Estacas nas intersecções dos cantos e nos meios da periferia;

L – Comprimento total de material condutor [m];

O último passo 7 consiste em verificar qual a malha que possui menos material e que respeita os valores limite de tensão. A malha resultante será a da configuração 18. Esta é uma

malha 9x5 com estacas nas intersecções dos cantos e meios na periferia sendo que cada uma delas tem 9 metros de comprimento. A malha está representada na figura 5.17.

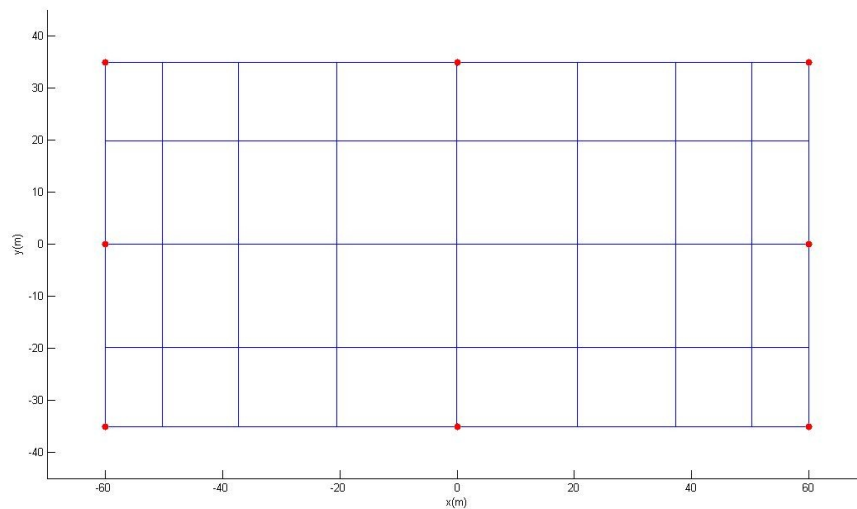


Figura 5.17 – Malha resultante do processo de otimização – resultado 1

A malha resultante continua a respeitar as condições de segurança e representa uma poupança de cerca de 30 % de material, pois de 1870 m de material passámos para 1302 m.

Diminuindo a corrente injectada na malha para o valor:

$$I = 2500 \text{ A}$$

Parte-se da mesma malha (13x8) igualmente espaçada (entrada do método) e optimiza-se, com o método de Sverak. Obtêm-se os resultados expressos na tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Resultados para a malha de estudo optimizada em espaçamento e considerando $I=2500 \text{ A}$

Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]	Comprimento Total [m]
1.5852	117.9	523.0	1870

Repete-se o procedimento acima descrito. O ciclo (passos 4 e 5) termina quando se testa a malha 8x3 optimizada, cuja tensão de toque 839 V viola os limites. As configurações testadas no passo 6 estão representadas na tabela 5.13.

Tabela 5.13 – Configurações testadas e resultados obtidos para I=2500 A

Conf.	Nc_x	Nc_y	Opção Estacas	Comp. Est. [m]	Resistência [Ω]	U _{PMax} [V]	U _{TMax} [V]	L [m]	Testada
1	9	4	0	0	1.6500	131.2	723.7	1110	Sim
2	8	3	1	5	1.6318	107.0	713.8	1010	Sim
3	8	3	1	9	1.5950	98.4	640.9	1082	Sim
4	8	3	2	5	1.6599	117.5	762.6	960	Sim
5	8	3	2	9	1.6386	113.0	715.3	992	Sim
6	8	4	0	0	1.6620	119.5	773.8	1040	Sim
7	8	4	1	5	0	0	0	0	Não
8	8	4	1	9	0	0	0	0	Não
9	8	4	2	5	0	0	0	0	Não
10	8	4	2	9	0	0	0	0	Não
11	7	2	1	5	1.6820	142.7	856.7	800	Sim
12	7	2	1	9	1.6429	132.1	781.0	856	Sim
13	7	2	2	5	1.7247	167.8	1094.4	770	Sim
14	7	2	2	9	1.6978	157.9	1038.3	802	Sim
15	7	3	1	5	1.6510	127.6	791.5	930	Sim
16	7	3	1	9	1.6140	116.1	717.3	994	Sim
17	7	3	2	5	1.6700	134.5	827.3	890	Sim
18	7	3	2	9	1.6467	127.4	777.5	922	Sim

As configurações de 7 a 10 não foram testadas pois como a configuração 6 tem tensões abaixo dos valores toleráveis não valeria a pena testar essa malha com estacas adicionais, pois apenas representaria a adição de material desnecessário. A malha resultante (passo 7) será a da configuração 12. Esta é uma malha 7x2 com estacas na periferia sendo que cada uma delas tem 9 metros de comprimento. A malha está representada na figura 5.18.

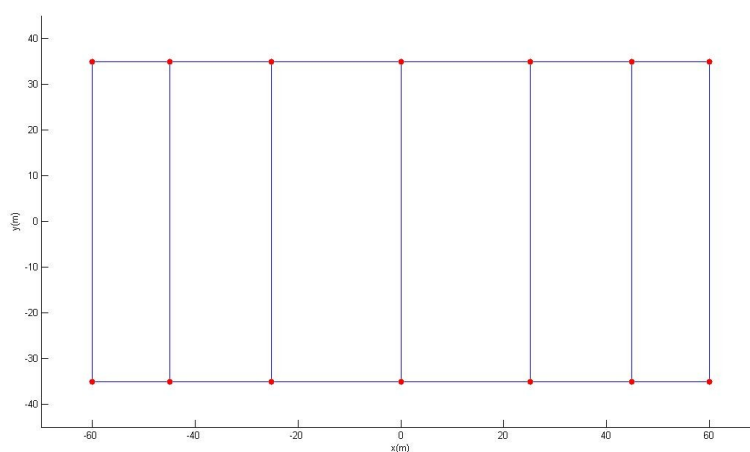


Figura 5.18 – Malha resultante do processo de otimização – resultado 2

A malha resultante continua a respeitar as condições de segura e representa uma poupança de cerca de 54 % de material, pois de 1870 m de material passámos para uns meros 856 m. Este exemplo é meramente exemplificativo do funcionamento do método pois corresponde a um caso extremo de redução de material.

Agora ir-se-á aumentar a corrente injectada na malha para o valor:

$I = 4500 \text{ A}$

Parte-se da mesma malha (13x8) igualmente espaçada (entrada do método) e optimiza-se, aplicando o método de Sverak. Obtêm-se os resultados expressos na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Resultados para a malha de estudo optimizada em espaçamento e considerando $I=4500 \text{ A}$

Resistência de Malha [Ω]	Tensão de Passo [V]	Tensão de Toque [V]	Comprimento Total [m]
1.5852	212.3	941.5	1870

Verifica-se que a tensão de toque ultrapassa o valor limite, pelo que se irá entrar num ciclo, passos 4' e 5'. Começa-se por pegar numa malha 14x9 (igualmente espaçada), optimiza-se e calcula-se as tensões de passo e toque, como a tensão de toque ultrapassa o valor limite, pega-se de seguida numa malha 15x10 e repete-se o processo... O ciclo acaba quando se encontra uma malha optimizada que respeite os valores limites, essa é uma malha 16x11. De seguida testa-se um conjunto de configurações de malhas com um nº de condutores em torno daquele valor, algumas com estacas de diferentes tamanhos. As configurações testadas são as representadas na tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Configurações testadas e resultados obtidos para $I=4500 \text{ A}$

Conf.	Nc_x	Nc_y	Opção Estacas	Comp. Est. [m]	Resistência [Ω]	U_{PMax} [V]	U_{TMax} [V]	L [m]	Testada
1	17	12	0	0	1.5524	224.9	807.8	2630	Sim
2	16	11	1	5	1.5164	149.7	573.6	2690	Sim
3	16	11	1	9	1.4856	138.9	514.4	2890	Sim
4	16	11	2	5	1.5506	132.3	623.7	2480	Sim
5	16	11	2	9	1.5432	123.9	586.1	2512	Sim
6	16	12	0	0	1.5552	215.0	820.5	2560	Sim
7	16	12	1	5	1.5131	154.8	564.7	2820	Sim
8	16	12	1	9	1.4827	142.9	506.4	3028	Sim
9	16	12	2	5	1.5473	138.0	618.0	2600	Sim
10	16	12	2	9	1.5403	129.3	581.2	2632	Sim
11	15	10	1	5	1.5229	135.6	590.5	2480	Sim
12	15	10	1	9	1.4916	127.4	530.0	2664	Sim
13	15	10	2	5	1.5570	156.9	635.6	2290	Sim
14	15	10	2	9	1.5489	149.1	596.5	2322	Sim
15	15	11	1	5	1.5195	140.5	581.9	2610	Sim
16	15	11	1	9	1.4886	131.3	522.0	2802	Sim
17	15	11	2	5	1.5532	153.7	628.4	2410	Sim
18	15	11	2	9	1.5455	142.5	590.2	2442	Sim

A malha que sairá deste processo será a que respeitar os limites toleráveis e necessitar de menos material condutor. A malha que satisfaz estes critérios é a da configuração 13, que é uma malha 15x10 com estacas nos cantos e meios, sendo que cada estaca possui 5 m de comprimento. Esta malha está representada na figura 5.19.

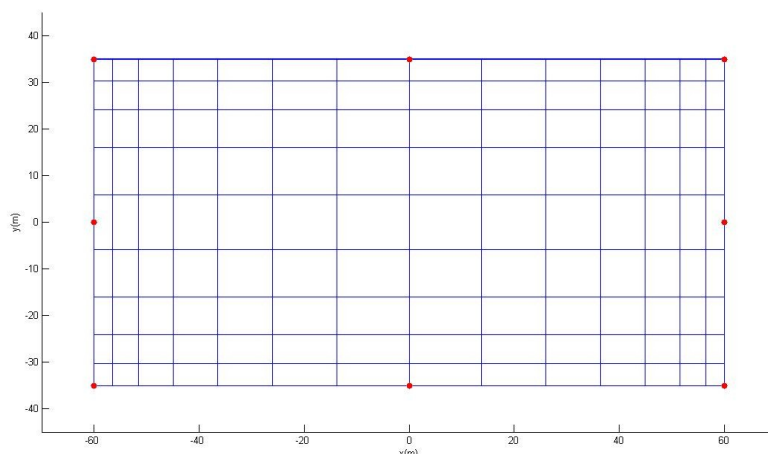


Figura 5.19 – Malha resultante do processo de otimização – resultado 3

Esta malha respeita os critérios de segurança e usa o mínimo material possível dentro das condições do método.

Analisando o exemplo acima ilustrado verifica-se que as configurações testadas em 6 e 6' são do mesmo tipo. De 4 e 5 sai uma malha que não respeita os critérios de segurança, consideremos esta a malha axb. De 4' e 5' sai a primeira malha que respeita os critérios de segurança, malha cxd. Considerando agora uma malha $(Nc_x) \times (Nc_y)$, teremos:

$$Nc_x = a+1 \text{ ou } Nc_x = c;$$

$$Nc_y = b+1 \text{ ou } Nc_y = d;$$

E as configurações testadas serão as representadas na tabela 5.16.

Tabela 5.16 – Configurações tipo testadas no método de otimização desenvolvido

Conf.	Número Condutores x	Número Condutores y	Opção Estacas	Comprimento Estacas
1	Nc_x	Nc_y	0	0
2	Nc_x-1	Nc_y-1	1	$h/2$
3	Nc_x-1	Nc_y-1	1	$h-1$
4	Nc_x-1	Nc_y-1	2	$h/2$
5	Nc_x-1	Nc_y-1	2	$h-1$
6	Nc_x-1	Nc_y	0	0
7	Nc_x-1	Nc_y	1	$h/2$
8	Nc_x-1	Nc_y	1	$h-1$
9	Nc_x-1	Nc_y	2	$h/2$
10	Nc_x-1	Nc_y	2	$h-1$
11	Nc_x-2	Nc_y-2	1	$h/2$
12	Nc_x-2	Nc_y-2	1	$h-1$
13	Nc_x-2	Nc_y-2	2	$h/2$
14	Nc_x-2	Nc_y-2	2	$h-1$
15	Nc_x-2	Nc_y-1	1	$h/2$
16	Nc_x-2	Nc_y-1	1	$h-1$
17	Nc_x-2	Nc_y-1	2	$h/2$
18	Nc_x-2	Nc_y-1	2	$h-1$

Como foi atrás referido as configurações de 7-10 apenas serão testadas se a tensão de toque ou passo da configuração 6 estiver acima dos limites, caso contrário não vale a pena testar configurações que adicionam desnecessariamente material.

O que se procura fazer é testar um conjunto de configurações tirando partido da optimização segundo Sverak e da introdução de estacas, tentando-se reduzir ao máximo o material usado, tendo em conta os pressupostos do método que foram explicados anteriormente.

5.4 Comparação entre o método desenvolvido e as técnicas que o constituem

O método de optimização desenvolvido é uma combinação de duas técnicas distintas e, como tal, aproveita as mais-valias de cada uma delas. Essas duas técnicas têm sido usadas ao longo dos tempos de uma forma bem distinta do uso que lhes é dado neste trabalho. Em relação ao método de Sverak, realizava-se apenas um número de iterações que permitisse tornar a malha segura, não se aproveitando as vantagens da optimização completa (5 iterações, a razão deste número encontra-se explicada no início do capítulo). Porque ao realizar-se mais iterações fica-se ainda mais do lado da segurança, ou seja, fica-se mais longe dos valores limite para as tensões de passo e toque. Em relação à colocação de estacas, a técnica não tem sido alvo de muitos trabalhos ao longo do tempo, sendo que aqui se fez um estudo aprofundado da sua utilização.

O método desenvolvido apresenta a grande vantagem de ele próprio realizar uma pesquisa pela malha de terra que se apresente como melhor solução, isto é, que utilize o mínimo material possível e continue a respeitar os valores limite para as tensões de passo e toque, sendo que tira o maior partido das duas técnicas que o constituem nessa pesquisa. Este tipo de pesquisa não era realizada pelo método de Sverak, pois este apenas tinha o objectivo de tornar a malha segura.

6. ESTUDOS DE OPTIMIZAÇÃO

Nesta secção pretende-se aplicar o método de optimização desenvolvido a vários casos práticos, de forma a evidenciar as suas potencialidades. Considera-se que ocorre um curto-circuito monofásico num barramento (tipicamente de 60kV), sendo que existirá uma repartição da corrente entre a malha de terra, os cabos de guarda e as resistências de terra dos apoios. Tipicamente como cabo de guarda ter-se-á um OPGW, sendo $R_t=20\Omega$. A corrente de curto-circuito apresenta valores numa gama ampla, podendo assumir valores entre os 200 A e os 12000 A, tipicamente. A percentagem de corrente que é injectada para a malha poderá variar entre os 20% e os 80%, valores típicos. As resistividades das camadas de solo também poderão variar, tipicamente, entre uns meros 30 $\Omega.m$ e os (1000 $\Omega.m$). A profundidade de enterramento da malha apresenta como valor típico 1 m (referência [9]), mas poderá variar entre os 0.5 m e os 1.5 m. O espaçamento entre condutores apresenta o valor típico de 3.5 m (referência[9]), mas poderá variar entre os 2 m e os 7m, dependendo da situação.

Seguidamente ir-se-á fazer um estudo sobre a influência que a variação de certos parâmetros têm sobre o método de optimização desenvolvido.

6.1. Caso base

Para isso ter-se-á um caso base, a partir do qual se irá trabalhar (figura 6.1 e tabela 6.1). Trata-se de uma malha igualmente espaçada com 21 condutores segundo cada uma das direcções, sem estacas.

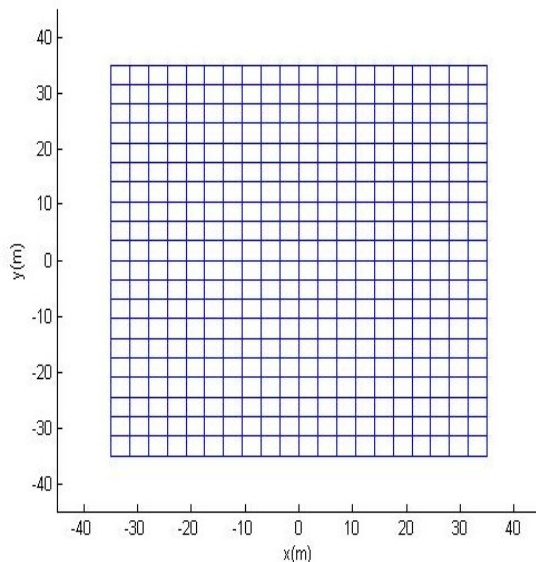


Figura 6.1 – Caso base da malha de terra

Tabela 6.1 – Dados da malha do caso base

	I [kA]	ρ_1 [$\Omega.m$]	ρ_2 [$\Omega.m$]	h [m]	e [m]	c [m]	l [m]	D [m]	d [m]	L [m]
Caso base	1,8	400	400	-	1	70	70	3,5	0.015	2940

Considera-se que existe uma camada de gravilha à superfície do solo com resistividade $\rho_s=2500 \Omega.m$, de espessura 0.1 m. O tempo de defeito considerado é de $t_s=0.6$ s.

Tendo estes dados os valores para as tensões de passo e toque toleráveis são os seguintes:

Influência da camada de gravilha: Factor $C_s=1-\frac{0.09(1-\frac{\rho_1}{\rho_s})}{2h_s+0.09}=0.7429$

Resistência pé-solo: $R_f=3 \cdot C_s \cdot \rho_s=5572 \Omega$

Corrente tolerável: $I_b=\frac{0.157}{\sqrt{0.6}}=0.2027$ A

Tensão de passo tolerável: $U_{Ptol}=(1000+6C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{0.6}}=2461.2$ V

Tensão de toque tolerável: $U_{Ttol}=(100+1.5C_s \cdot \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{0.6}}=767.3$ V

O estudo será dividido em várias partes: estudar-se-á a influência de diferentes configurações de solo, sobre os resultados, variando a resistividade da segunda camada e a espessura da primeira; estudar-se-á também a influência da profundidade de enterramento variando este parâmetro e a resistividade da segunda camada; verificar-se-á qual a influência que a geometria da malha tem sobre os resultados do método de optimização variando-se a largura da mesma; observar-se-á a influência da variação da corrente que é injectada na malha e por último estuda-se a influência da variação do espaçamento entre condutores. A situação em que as resistividades das duas camadas são iguais corresponde a existência de solo homogéneo. O processo de optimização para a malha do caso base (malha 0) produziu os resultados expressos na figura 6.2 e nas tabelas 6.2 e 6.3.

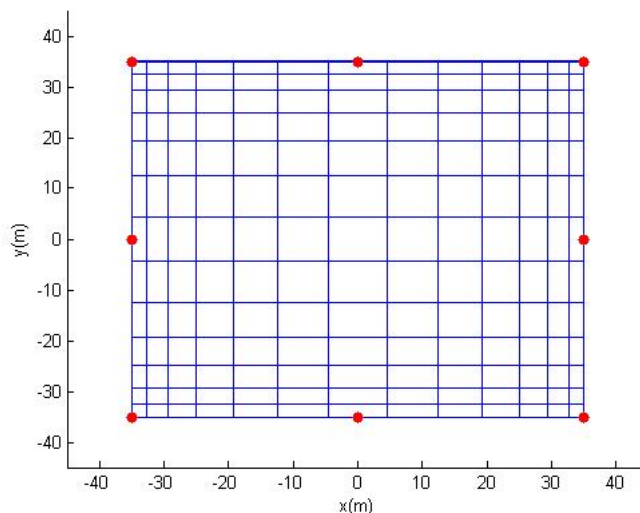


Figura 6.2 – Malha 0 optimizada (caso base)

Tabela 6.2 – Resultados da optimização da malha 0 (geometria)

	ρ_1 [Ω.m]	ρ_2 [Ω.m]	h [m]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
				P.I. [m]	P.O. [m]	Variação (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Comprimento [m]
Malha 0 – caso base	400	400	-	2940	2000	- 32,0	21	14	21	14	8	5

Tabela 6.3 – Resultados da optimização da malha 0 (grandezas eléctricas)

	U_{TMax}			U_{TMax}/U_{TTol}		U_{PMax}			U_{PMax}/U_{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 0 – caso base	662.5	698.8	+ 5.5	0.86	0.91	309.8	208.4	-32.7	0.13	0.08	2.4747	2.5211	+1.9

Nas tabelas 6.2, 6.3 e nas restantes usar-se-á as nomenclaturas P.I. e P.O. que significam projecto inicial e projecto final, respectivamente. Os valores do projecto inicial obtidos para as tensões de passo e toque e para a resistência de malha correspondem aos valores da malha inicial não igualmente espaçada, ou seja, a malha inicial com a optimização de Sverak, pois é a partir destes valores que o método de optimização desenvolvido decidirá qual o passo seguinte, tal como foi dito na descrição do método.

Observando os resultados da tabela 6.3 verifica-se que, com o processo de optimização o valor da tensão de passo máximo sofre uma diminuição de 32.7%. Isto acontece porque os potenciais à superfície do solo tornam-se mais uniformes. A resistência de malha sofre um aumento de 1.9%, que é explicado pela redução de material condutor. Por fim, a tensão de toque apresenta um aumento de 5.5%. A tensão de toque máxima é calculada como sendo a diferença entre o potencial de malha e o menor valor de potencial à superfície do solo. O potencial de malha varia de forma proporcional à resistência de malha e o potencial mínimo tende a aumentar com o processo de optimização, porque se retira material condutor. Desta forma, o aumento da tensão de toque ocorreu, porque o valor do potencial de malha teve um aumento superior ao aumento do potencial mínimo à superfície do solo.

6.2 Influência das características do solo nos resultados da optimização

Pretende-se observar a influência das características do solo nos resultados da optimização da malha de terra. Para este propósito testa-se o processo de optimização para diferentes valores da espessura da primeira camada ($h=5; 10; 15$ m) e da resistividade da segunda ($\rho_2=200; 800 \text{ } \Omega \cdot \text{m} \leftrightarrow \rho_2=\rho_1/2; 2\rho_1$). Mantém-se constante a profundidade de enterramento.

Tabela 6.4 – Influência das características do solo nos resultados da optimização (geometria)

	ρ_1 [$\Omega \cdot \text{m}$]	ρ_2 [$\Omega \cdot \text{m}$]	h [m]	e [m]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
					P.I. [m]	P.O. [m]	Variação (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Comprimento [m]
Malha 1	400	200	5	1	2940	1136	- 61.4	21	8	21	8	8	2
Malha 2	400	200	10	1	2940	1440	- 51.0	21	10	21	10	8	5
Malha 3	400	200	15	1	2940	1596	- 45.7	21	11	21	11	8	7
Malha 0	400	400	-	1	2940	2000	- 32.0	21	14	21	14	8	5
Malha 4	400	800	5	1	2940	3936	+ 33.9	21	28	21	28	8	2
Malha 5	400	800	10	1	2940	3120	+ 6.1	21	22	21	22	8	5
Malha 6	400	800	15	1	2940	2716	+ 7.6	21	19	21	19	8	7

Tabela 6.5 – Influência das características do solo nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)

	U_{TMax}			U_{TMax}/U_{TTol}		U_{PMax}			U_{PMax}/U_{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 1	508.3	736.1	+44.8	0.66	0.96	233.9	139.7	-40.3	0.10	0.06	1.4813	1.6562	+11.8072
Malha 2	554.5	671.2	+21.0	0.72	0.87	257.6	136.0	-47.2	0.10	0.06	1.6401	1.7416	+6.1886
Malha 3	585.0	658.1	+12.5	0.76	0.86	272.5	147.1	-46.0	0.11	0.06	1.7589	1.8297	+4.0252
Malha 0	662.5	698.8	+5.5	0.86	0.91	309.8	208.4	-32.7	0.13	0.08	2.4747	2.5211	+1.8750
Malha 4	873.6	745.3	-14.7	1.14	0.97	414.9	388.4	-6.4	0.17	0.16	4.2166	4.1632	-1.2664
Malha 5	801.6	706.9	-11.8	1.04	0.92	377.5	320.7	-15.0	0.15	0.13	3.8456	3.8227	-0.5955
Malha 6	758.3	688.1	-9.3	0.99	0.90	356.1	282.0	-20.8	0.14	0.11	3.6021	3.5943	-0.2165

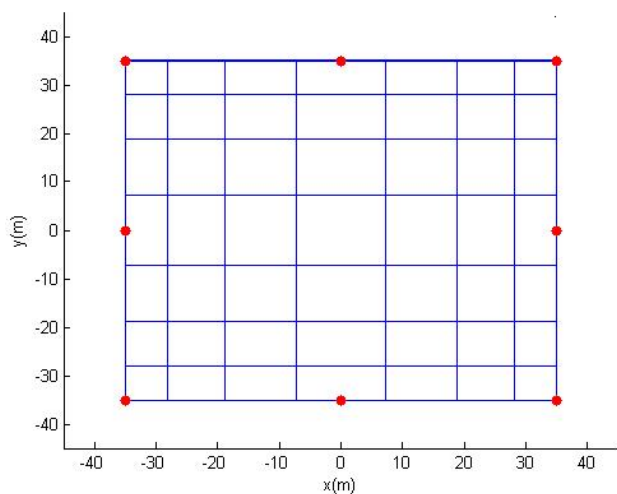


Figura 6.3 – Malha 1 otimizada
 $(\rho_2 = 200 \, \Omega \cdot m = \rho_1/2; h=5m)$

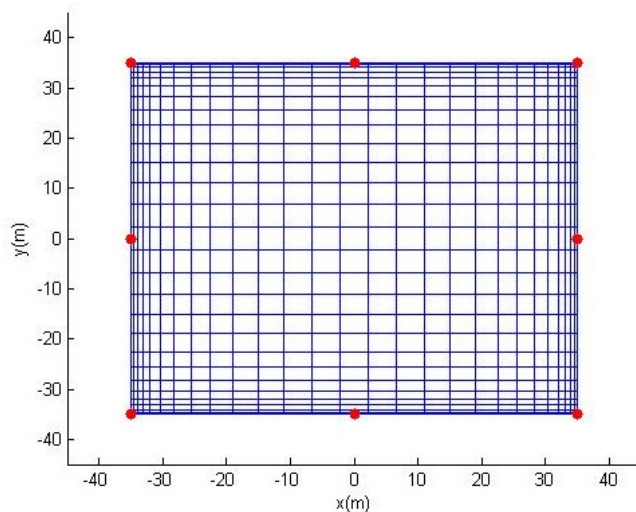


Figura 6.6 – Malha 4 otimizada
 $(\rho_2 = 800 \, \Omega \cdot m = 2\rho_1; h=5m)$

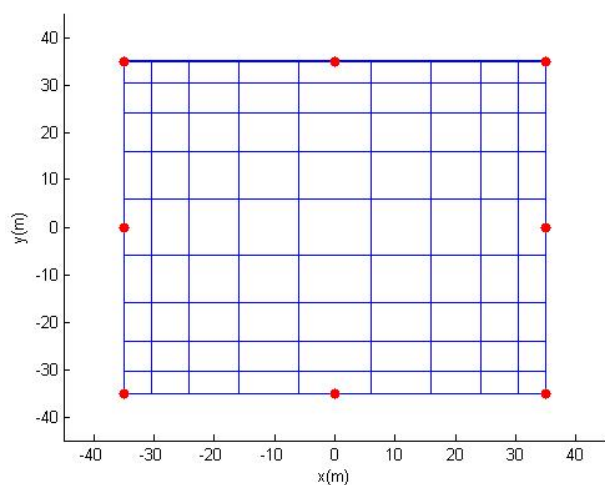


Figura 6.4 – Malha 2 otimizada
 $(\rho_2 = 200 \, \Omega \cdot m = \rho_1/2; h=10m)$

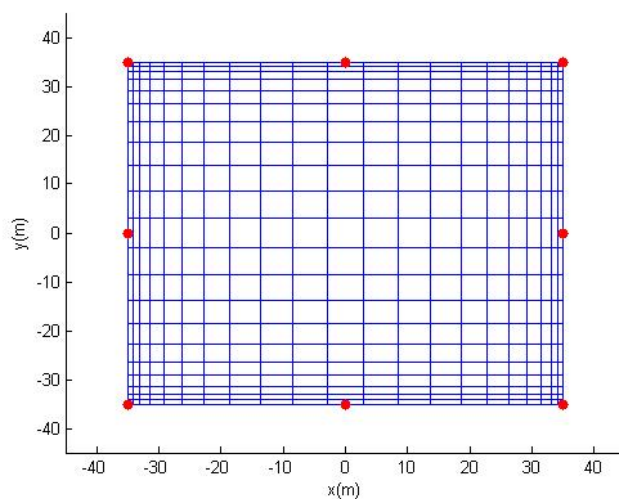


Figura 6.7 – Malha 5 otimizada
 $(\rho_2 = 800 \, \Omega \cdot m = 2\rho_1; h=10m)$

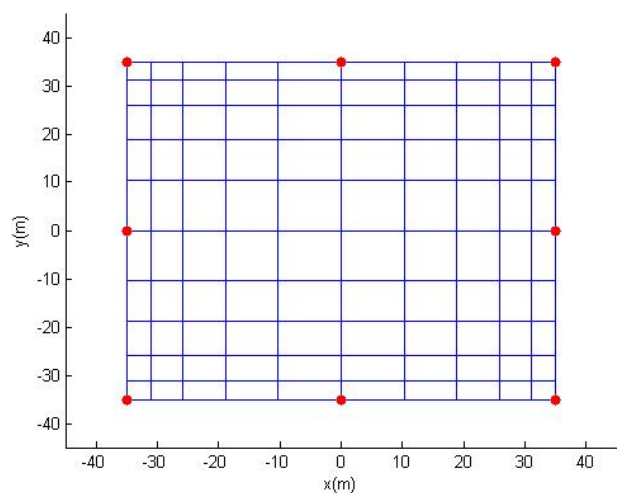


Figura 6.5 – Malha 3 otimizada
 $(\rho_2 = 200 \, \Omega \cdot m = \rho_1/2; h=15m)$

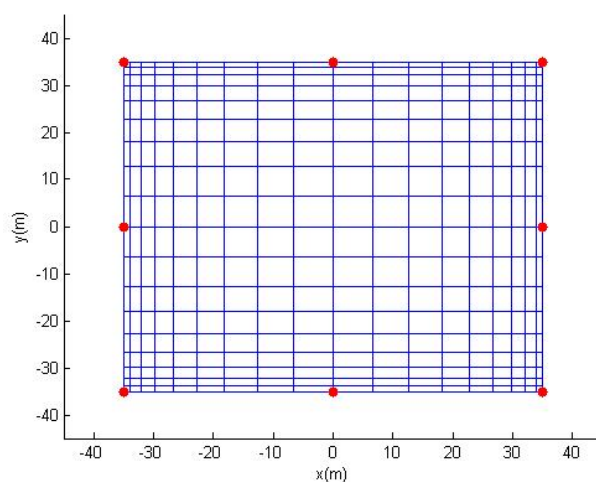


Figura 6.8 – Malha 6 otimizada
 $(\rho_2 = 800 \, \Omega \cdot m = 2\rho_1; h=15m)$

Observando as tabelas 6.4 e 6.5, verifica-se que quando o projecto inicial de malha respeita os limites relativos às tensões de passo e toque, o método de optimização reduz o material condutor, uma vez que é possível fazê-lo e continuar a respeitar esses limites. Pelo contrário quando uma relação U/U_{tol} é superior a um, o que acontece para as malhas 4 e 5 nos valores relativos à tensão de toque, o método de optimização adiciona material, pois só assim se poderá respeitar os valores limite para essas tensões. Os valores para as tensões de passo sofrem uma variação negativa para todas as malhas analisadas. Quando os valores da resistência de malha aumentam a tensão de toque tende a aumentar. Mas quando a resistência de malha diminui, o que acontece para as malhas 4, 5 e 6, a tensão de toque também irá diminuir, o que é consistente com o referido anteriormente, pois ter-se-á uma diminuição do potencial de malha e um aumento do potencial mínimo à superfície. Na malha 6 verifica-se uma diminuição da resistência de malha apesar de se retirar material condutor, o que acontece pois o aumento desse valor provocado pela retirada de material foi menor que a diminuição provocada pela introdução de estacas e pela optimização de Sverak.

Analisando as figuras 6.3, 6.4 e 6.5 verifica-se que com o aumento da espessura da primeira camada, as malhas vão ficando mais densas, porque à medida que h aumenta vai diminuindo a influência da segunda camada cuja resistividade é inferior à da primeira. O contrário é observável pelas figuras 6.6, 6.7 e 6.8, pois neste caso a resistividade da segunda camada é superior à primeira, logo as malhas vão ficando menos densas à medida que h vai aumentando uma vez que a segunda camada vai tendo menos influência. Tudo isto é consistente com os estudos efectuados anteriormente.

6.3 Influência da profundidade de enterramento nos resultados da otimização

Pretende-se observar a influência que a profundidade de enterramento tem sobre os resultados de otimização, para solo homogêneo e para solos estratificados ($\rho_2=\rho_1/2$ e $\rho_2=2\rho_1$). Para este propósito varia-se a profundidade de enterramento ($e=0.5$; 1; 1.5 m), mantendo-se a espessura da primeira camada constante ($h=10$ m).

Tabela 6.6 – Influência da profundidade de enterramento nos resultados da otimização (geometria)

	ρ_1 [Ω .m]	ρ_2 [Ω .m]	e [m]	h [m]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
					P.I. [m]	P.O. [m]	Variação (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Comprimento [m]
Malha 7	400	200	0.5	10	2940	1100	- 62.6	21	7	21	7	24	5
Malha 8	400	400	0.5	10	2940	1580	- 46.3	21	11	21	11	8	5
Malha 9	400	800	0.5	10	2940	2280	- 22.4	21	16	21	16	8	5
Malha 10	400	200	1	10	2940	1440	- 51.0	21	10	21	10	8	5
Malha 0	400	400	1	10	2940	2000	- 32.0	21	14	21	14	8	5
Malha 11	400	800	1	10	2940	3120	+ 6.1	21	22	21	22	8	5
Malha 12	400	200	1.5	10	2940	1580	- 46.3	21	11	21	11	8	5
Malha 13	400	400	1.5	10	2940	2280	- 22.4	21	16	21	16	8	5
Malha 14	400	800	1.5	10	2940	4240	+ 44.2	21	30	21	30	8	5

Tabela 6.7 – Influência da profundidade de enterramento nos resultados da otimização (grandezas eléctricas)

	U_{TMax}			U_{TMax}/U_{TTol}		U_{PMax}			U_{PMax}/U_{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 7	484.8	742.0	+53.1	0.63	0.97	305.9	249.2	-18.5	0.12	0.10	1.6786	1.8160	+8.1854
Malha 8	575.6	584.0	+1.5	0.75	0.76	364.7	218.3	-40.1	0.15	0.09	2.5124	2.6029	+3.6021
Malha 9	693.2	633.1	-8.7	0.90	0.83	441.1	229.7	-47.9	0.18	0.09	3.8823	3.9115	+0.7521
Malha 10	554.5	671.2	+21.0	0.72	0.87	257.6	136.0	-47.2	0.10	0.06	1.6401	1.7416	+6.1886
Malha 0	662.5	698.8	+5.5	0.86	0.91	309.8	208.4	-32.7	0.13	0.08	2.4747	2.5211	+1.8750
Malha 11	801.6	706.9	-11.8	1.04	0.92	377.5	320.7	-15.0	0.15	0.13	3.8456	3.8227	-0.5955
Malha 12	596.6	722.4	+21.1	0.78	0.94	210.9	143.1	-32.1	0.09	0.06	1.6059	1.6871	+5.0564
Malha 13	717.2	736.5	+2.7	0.93	0.96	256.1	212.3	-17.1	0.10	0.09	2.4416	2.4676	+1.0649
Malha 14	872.1	732.6	-16.0	1.14	0.95	314.6	283.2	-10.0	0.13	0.12	3.8138	3.7506	-1.6571

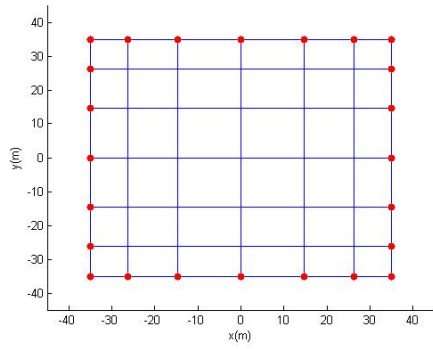


Figura 6.9 – Malha 7 otimizada
($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=0.5m$)

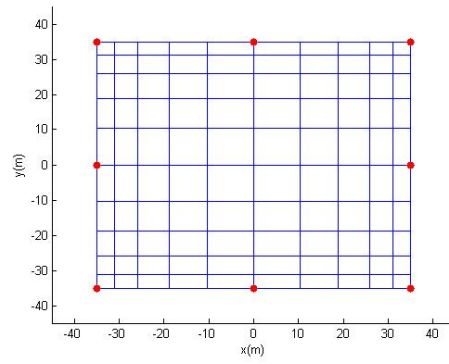


Figura 6.10 – Malha 8 otimizada
($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $e=0.5m$)

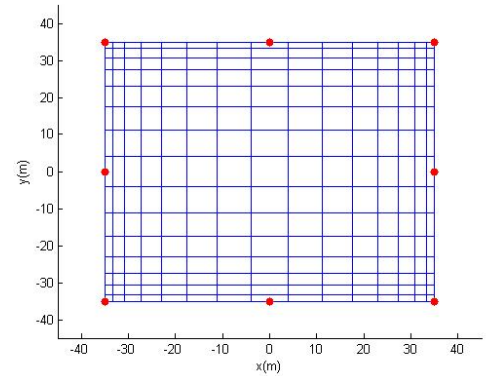


Figura 6.11 – Malha 9 otimizada
($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $e=0.5m$)

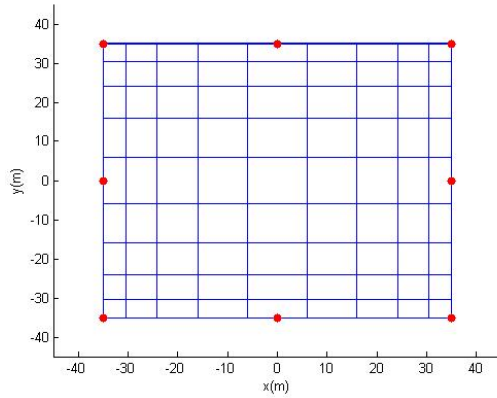


Figura 6.12 – Malha 10 otimizada
($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=1m$)

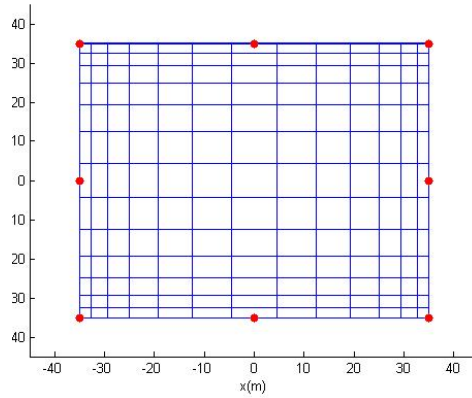


Figura 6.13 – Malha 0 otimizada
($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $e=1m$)

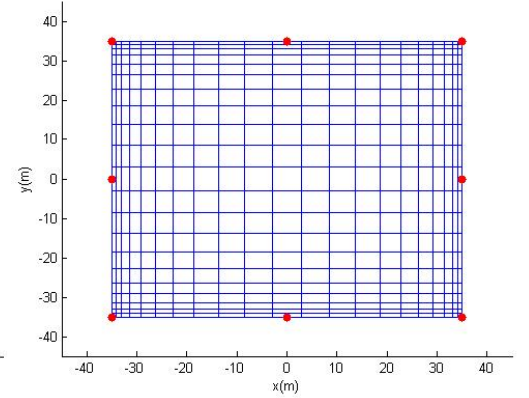


Figura 6.14 – Malha 11 otimizada
($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $e=1m$)

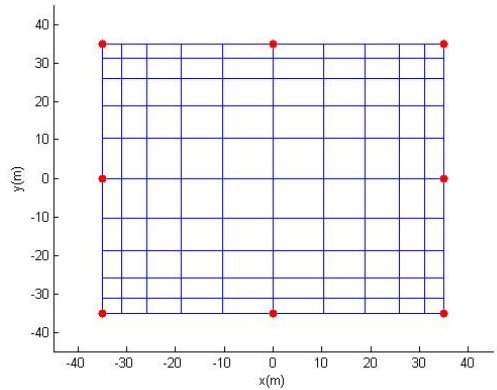


Figura 6.15 – Malha 12 otimizada
($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $e=1.5m$)

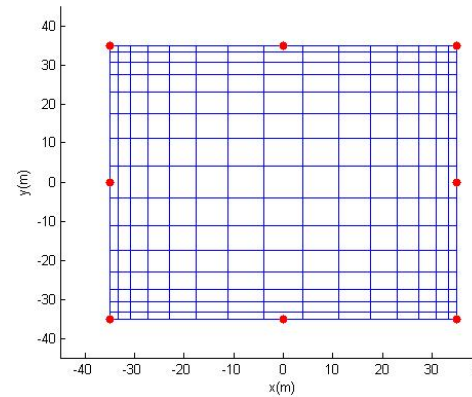


Figura 6.16 – Malha 13 otimizada
($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $e=1.5m$)

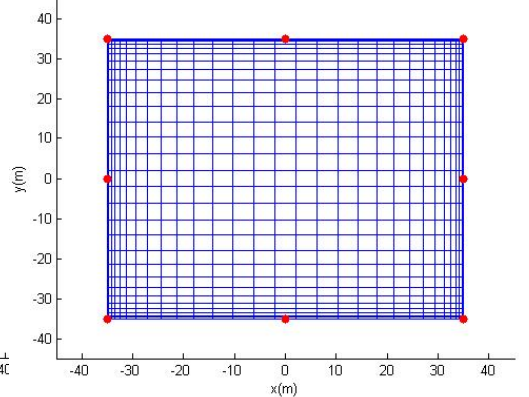


Figura 6.17 – Malha 14 otimizada
($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $e=1.5m$)

Analisando os resultados das tabelas 6.6 e 6.7 é de realçar vários aspectos. Na maioria das malhas analisadas, o método produz resultados muito satisfatórios em termos de redução de material condutor, por exemplo na malha 7 houve uma redução de cerca de 62.6% de material. Por outro lado nas malhas 11 e 14 foi necessário adicionar material, sendo que nesta última se deu um aumento acentuado, cerca de 44.2%. Esta corresponde à situação mais desfavorável, uma vez que a malha está mais próxima ($e=1.5m$) da segunda camada que tem uma resistividade muito elevada. De salientar os resultados da malha 9 na tabela 6.7, nos quais se observa que a resistência de malha aumenta mas a tensão de toque tem uma variação negativa, o que acontece pela seguinte razão: o aumento é muito reduzido, o que provoca um aumento também reduzido da tensão de malha comparativamente ao aumento do menor potencial no solo.

Comparando as figuras 6.9, 6.12 e 6.15 constata-se que o aumento da profundidade de enterramento conduz a uma malha resultante mais densa, porque esse aumento conduz a uma tensão de toque superior (tabela 6.7), o que não permite uma redução de material tão acentuada. Para a mesma profundidade de enterramento (figuras 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12, 6.13, 6.14 e 6.15, 6.16, 6.17), um aumento da resistividade da segunda camada conduz a uma malha resultante mais densa, tal como era previsto.

A malha 7 otimizada apresenta uma configuração de estacas diferente das outras malhas, pois possui estacas em toda a periferia. Tal como foi descrito anteriormente, o processo de optimização testa várias configurações de malha, com estacas (periferia ou cantos e meios) e sem estacas, antes de decidir qual a optimização mais vantajosa. Na maioria dos casos essa configuração consiste numa malha não igualmente espaçada com 8 estacas, mas neste caso isso não se verificou. A malha da figura 6.9 é a que representa a melhor solução em termos de material condutor utilizado e cumprimento dos valores das tensões de passo e toque toleráveis. Para a situação da malha 7 também seria aceitável a malha apresentada na figura 6.18, malha 7 sub-optimizada, que possui 8 estacas. Os resultados para esta malha estão nas tabelas 6.8 e 6.9 e como se pode verificar ela respeita os valores toleráveis para as tensões de passo e toque, mas possui um comprimento total de material condutor no valor de 1160, valor este superior aos 1100 da malha 7, razão pela qual o método decidiu que a malha da figura 6.9 seria a melhor solução para aquela situação.

Tabela 6.8 – Resultados da malha 7 sub-otimizada (geometria)

	ρ_1 [$\Omega \cdot m$]	ρ_2 [$\Omega \cdot m$]	e[m]	h [m]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
					P.I. [m]	P.O. [m]	Variação (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Comprimento [m]
Malha 7 sub-otimizada	400	200	0.5	10	2940	1160	- 60.5	21	8	21	8	8	5

Tabela 6.9 – Resultados da malha 7 sub-otimizada (grandezas eléctricas)

	U_{TMax}			U_{TMax}/U_{TTol}		U_{PMax}			U_{PMax}/U_{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 7 sub-otimizada	484.8	714.7	+47.4	0.63	0.93	305.9	237.7	-22.3	0.12	0.10	1.6786	1.8423	+9.7522

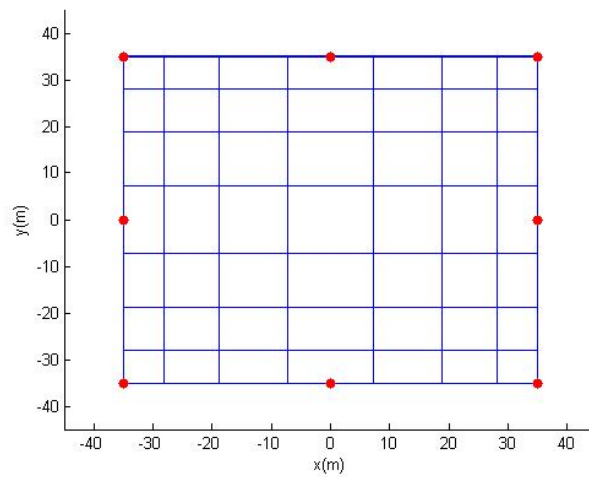


Figura 6.18 – Malha 7 sub-otimizada (limitação a 8 estacas)
($\rho_2 = 200 \Omega \cdot m = \rho_1/2$; $e = 0.5m$)

6.4 Influência da geometria nos resultados da optimização

Ir-se-á modificar a geometria da malha e verificar a influência que esse factor tem sobre o resultado final do método de optimização. Para este fim ir-se-á aumentar a largura da malha, tornando-a rectangular.

Tabela 6.10 – Influência da geometria nos resultados da optimização (geometria)

	ρ_1 [$\Omega.m$]	ρ_2 [$\Omega.m$]	l [m]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
				P.I. [m]	P.O. [m]	Variaçã o (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Compriment o [m]
Malha 15	400	200	70	2940	1440	- 51.0	21	10	21	10	8	5
Malha 0	400	400	70	2940	2000	- 32.0	21	14	21	14	8	5
Malha 16	400	800	70	2940	3120	+ 6.1	21	22	21	22	8	5
Malha 17	400	200	91	2940	1104	- 62.4	21	4	26	10	8	5
Malha 18	400	400	91	2940	1587	- 46.0	21	7	26	13	8	5
Malha 19	400	800	91	2940	2553	- 13.2	21	13	26	19	8	5

Tabela 6.11 – Influência da geometria nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)

	U_{TMax}			U_{TMax}/U_{TTol}		U_{PMax}			U_{PMax}/U_{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 15	554.5	671.2	+21.0	0.72	0.87	257.6	136.0	-47.2	0.10	0.06	1.6401	1.7416	+6.1886
Malha 0	662.5	698.8	+5.5	0.86	0.91	309.8	208.4	-32.7	0.13	0.08	2.4747	2.5211	+1.8750
Malha 16	801.6	706.9	-11.8	1.04	0.92	377.5	320.7	-15.0	0.15	0.13	3.8456	3.8227	-0.5955
Malha 17	443.6	662.0	+49.2	0.58	0.86	213.1	106.9	-49.8	0.09	0.04	1.4025	1.6092	+14.7380
Malha 18	538.5	681.4	+26.5	0.70	0.89	260.4	141.6	-45.6	0.11	0.06	2.1583	2.2764	+5.4719
Malha 19	662.6	699.8	+5.6	0.86	0.91	322.4	233.1	-27.7	0.13	0.09	3.4173	3.4660	+1.4251

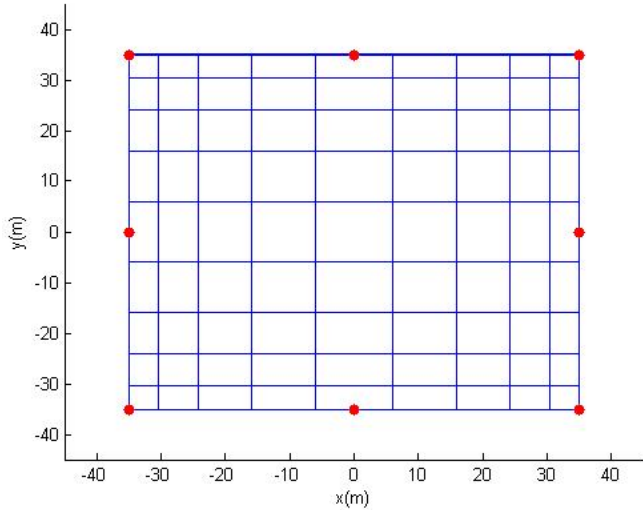


Figura 6.19 – Malha 15 otimizada
($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $l=70m$)

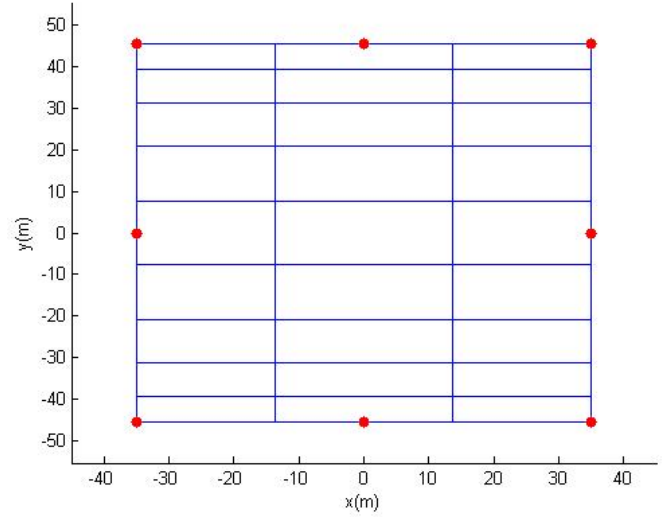


Figura 6.22 – Malha 17 otimizada
($\rho_2 = 200 \Omega.m = \rho_1/2$; $l=91m$)

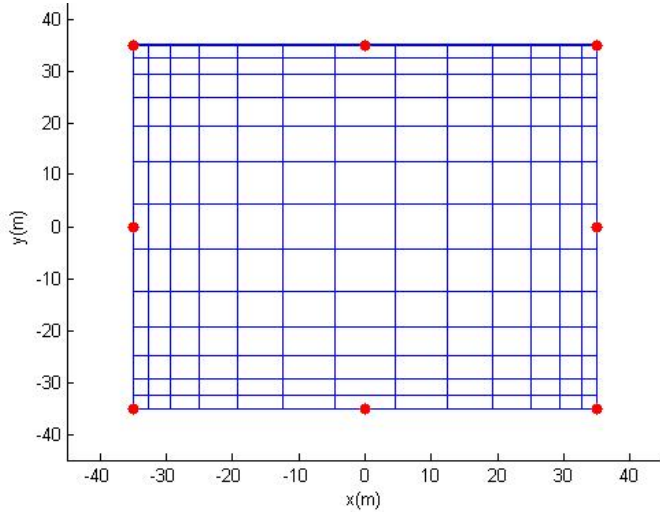


Figura 6.20 – Malha 0 otimizada
($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $l=70m$)

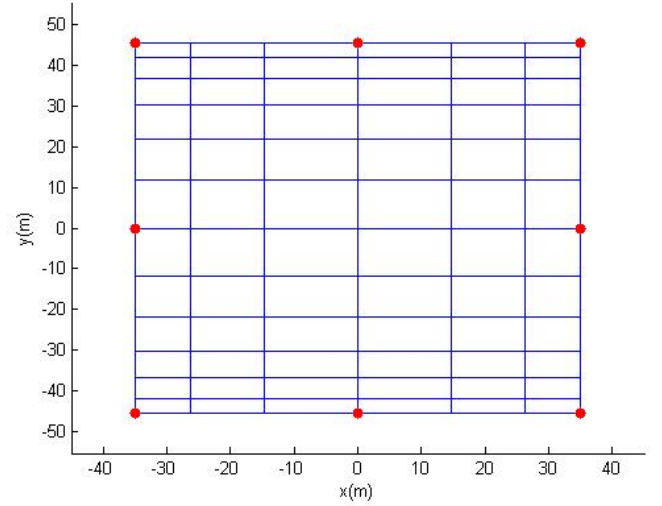


Figura 6.23 – Malha 18 otimizada
($\rho_2 = 400 \Omega.m = \rho_1$; $l=91m$)

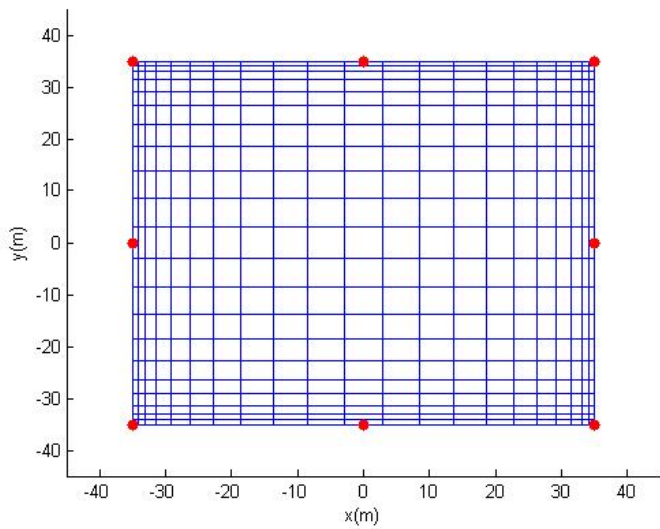


Figura 6.21 – Malha 16 otimizada
($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $l=70m$)

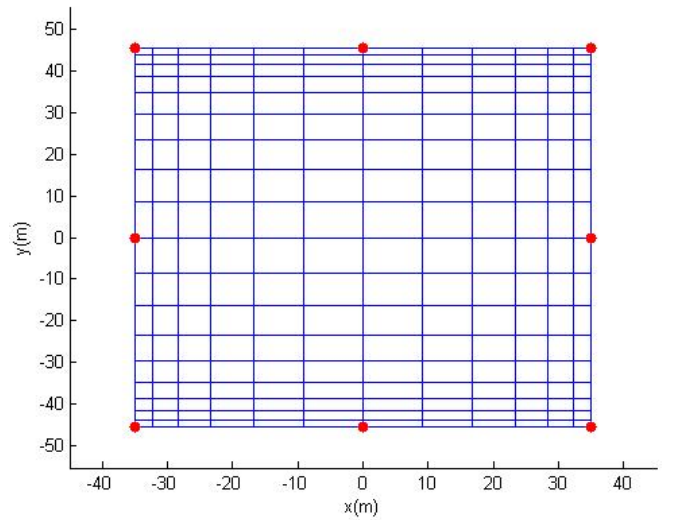


Figura 6.24 – Malha 19 otimizada
($\rho_2 = 800 \Omega.m = 2\rho_1$; $l=91m$)

Observando as tabelas 6.10 e 6.11 verifica-se que aumentando a largura de 70 para 91 metros (aumento da área da malha) consegue-se produzir resultados em termos de optimização muito superiores, quer em termos de número de condutores segundo cada uma das direcções (menos condutores), quer em termos de material condutor utilizado (menos material condutor).

Comparando figuras em que a resistividade da segunda camada é a mesma verifica-se que para $l=91m$ tem-se uma malha menos densa (figuras 6.19, 6.22 e 6.20, 6.23 e 6.21, 6.24). Para a mesma situação de l , o aumento da resistividade da segunda camada conduz a malhas mais densas (figuras 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22, 6.23, 6.24).

6.5 Influência do valor de corrente injectada nos resultados da optimização

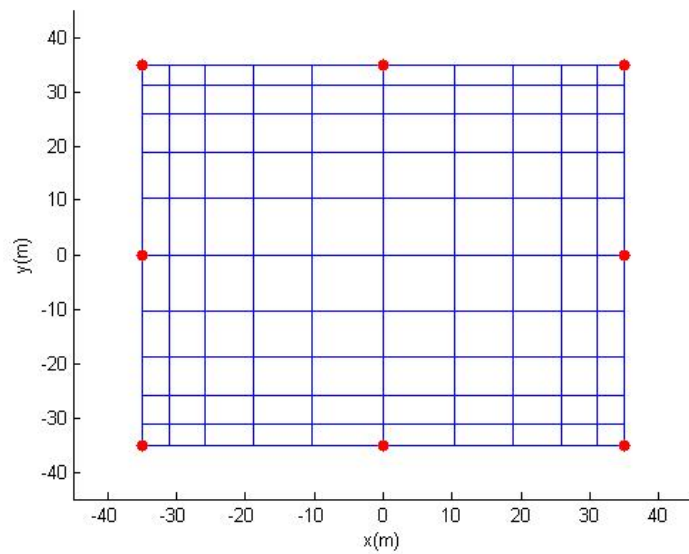
Ir-se-á partir do caso base e modificar o valor da corrente injectada na malha, de forma a verificar a influência desse valor sobre o resultado final do processo de optimização.

Tabela 6.12 – Influência do valor de corrente injectada nos resultados da optimização (geometria)

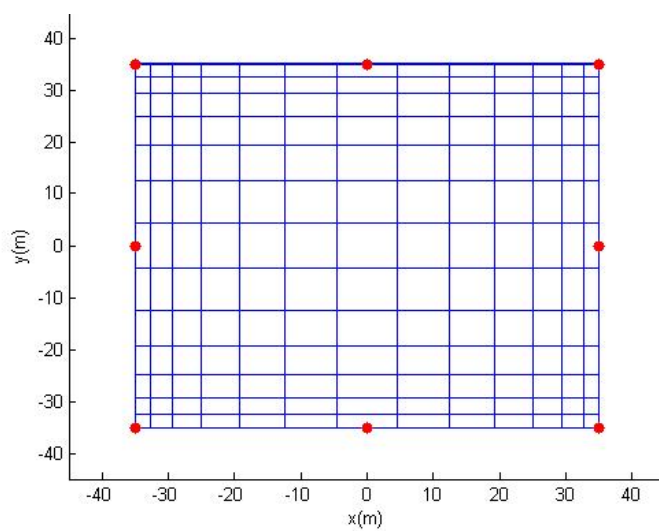
	I [A]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
		P.I. [m]	P.O. [m]	Variação (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Comprimento [m]
Malha 20	1.6	2940	1580	- 46.3	21	11	21	11	8	5
Malha 0	1.8	2940	2000	- 32.0	21	14	21	14	8	5
Malha 21	2.0	2940	2560	- 12.9	21	18	21	18	8	5

Tabela 6.13 – Influência do valor de corrente injectada nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)

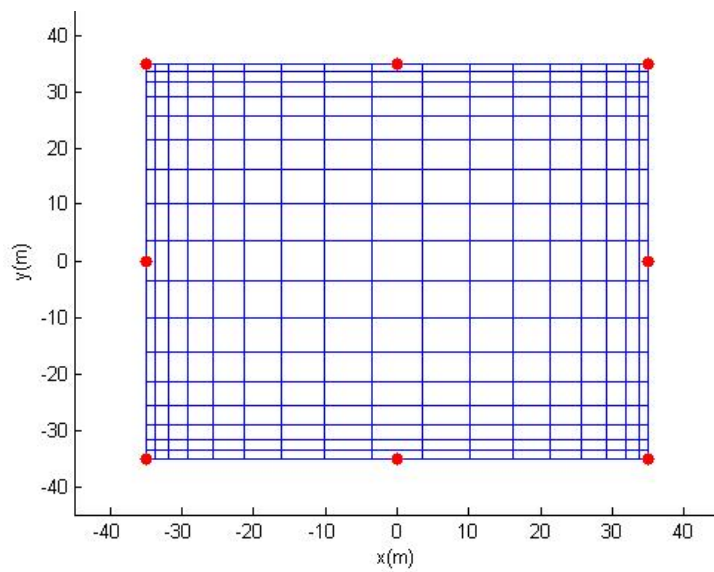
	U _{TMax}			U _{TMax} /U _{TTol}		U _{PMax}			U _{PMax} /U _{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 20	588.9	677.5	+15.0	0.77	0.88	275.4	155.1	-43.7	0.11	0.06	2.4747	2.5626	+3.5519
Malha 0	662.5	698.8	+5.5	0.86	0.91	309.8	208.4	-32.7	0.13	0.08	2.4747	2.5211	+1.8750
Malha 21	736.1	701.8	-4.7	0.96	0.91	344.3	276.1	-19.8	0.14	0.11	2.7474	2.4828	-9.6309



**Figura 6.25 – Malha 20 otimizada
($I=1.6\text{kA}$)**



**Figura 6.26 – Malha 0 otimizada
($I=1.8\text{kA}$)**



**Figura 6.27 – Malha 21 otimizada
($I=2.0\text{kA}$)**

Observando os resultados das tabelas 6.12 e 6.13 verifica-se que, tal como era previsto, um valor de corrente injectada menor conduz a uma optimização mais acentuada, isto é, menos comprimento total de condutor (malha 20 - $L = 1580\text{m}$), enquanto uma corrente mais elevada não permite que se retire tanto material condutor (malha 21 - $L = 2560\text{m}$). Este facto é evidenciado nas figuras 6.25 – 6.27, onde se pode verificar que uma corrente mais elevada conduz a uma malha mais densa.

6.6 Influência do espaçamento entre condutores nos resultados da optimização

Parte-se também do caso base e pretende-se variar o espaçamento entre condutores de forma a verificar em que medida a situação de partida para o processo de optimização irá afectar os resultados obtidos.

Tabela 6.14 – Influência do espaçamento entre condutores nos resultados da optimização (geometria)

	D[m]	L			Nc_x		Nc_y		Estacas (P.O.)	
		P.I. [m]	P.O. [m]	Variação (%)	P.I.	P.O.	P.I.	P.O.	Nº	Comprimento [m]
Malha 22	2.5	2940	2000	- 32.0	29	14	29	14	8	5
Malha 0	3.5	2940	2000	- 32.0	21	14	21	14	8	5
Malha 23	5	2940	2000	- 32.0	15	14	15	14	8	5

Tabela 6.15 – Influência do espaçamento entre condutores nos resultados da optimização (grandezas eléctricas)

	U _{TMax}			U _{TMax} /U _{TTol}		U _{PMax}			U _{PMax} /U _{TTol}		Resistência malha		
	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [V]	P.O. [V]	Var. (%)	P.I.	P.O.	P.I. [Ω]	P.O. [Ω]	Var. (%)
Malha 22	581.4	698.8	+20.2	0.76	0.91	315.1	208.4	-33.9	0.13	0.08	2.4358	2.5211	+3.5019
Malha 0	662.5	698.8	+5.5	0.86	0.91	309.8	208.4	-32.7	0.13	0.08	2.4747	2.5211	+1.8750
Malha 23	785.1	698.8	-11.0	1.02	0.91	264.8	208.4	-21.3	0.11	0.08	2.5289	2.5211	-0.3084

As malhas 22, 0 e 23 optimizadas são idênticas, como seria de esperar, pois alterando o espaçamento entre condutores e mantendo os restantes parâmetros, o método de optimização conduzirá à mesma solução para os vários casos. Estas malhas são, portanto, iguais à malha representada na figura 6.2, caso base optimizado.

Ao longo dos vários estudos aqui apresentados ficaram evidentes as mais-valias apresentadas pelo método de optimização desenvolvido, pois na maioria dos casos apresentados, este permitiu uma redução do material utilizado, por exemplo na malha 7, obteve-se uma poupança de 62,6% (sendo este o caso mais extremo), pois necessitou-se apenas de 1100m de material condutor em comparação com os 2940m iniciais. Para além disto foi também visível que este método não serve apenas o propósito de redução de material, pois em certos casos (por exemplo malhas 4 e 5), foi necessário adicionar material condutor, uma vez que não se cumpriam os valores toleráveis para as tensões de passo e toque, sendo que o método procura a situação que permita cumprir esses limites com o mínimo de material condutor possível.

Na maioria dos casos analisados a solução dada pelo método consiste numa configuração com estacas nos cantos e meios, 8 estacas no total, com comprimentos diferentes consoante a espessura da primeira camada. Esta é a configuração que dentro das características do método e para os parâmetros fornecidos, representará a melhor solução, nesses casos. Mas nem sempre isto é verdade, pois, por exemplo, a malha 7 será uma malha com estacas em toda a periferia, sendo que neste caso, esta malha representará a melhor solução para o método desenvolvido.

Nas malhas analisadas o método de optimização conduziu a uma redução da tensão de passo, sendo que a resistência de malha e a tensão de toque podem aumentar ou diminuir dependendo da situação, como já fora explicado anteriormente.

Os estudos efectuados anteriormente neste trabalho viram as suas conclusões aqui verificadas.

7. CONCLUSÃO

Observando todo o trabalho desenvolvido pode-se constatar que os objectivos a que este trabalho se propunha foram cumpridos.

Desenvolveu-se um programa com capacidade para realizar uma análise prática e eficaz do comportamento da malha de terra, e ao mesmo tempo com a capacidade de realizar uma optimização que conduz na maioria dos casos a ganhos importantes em termos do material condutor utilizado.

A parte de análise de malha revela-se como uma ferramenta muito importante, uma vez que permite obter resultados tais como a resistência de malha, tensões de passo, de toque e os correspondentes valores limite, inferindo-se assim sobre a segurança da malha de terra. Esta análise pode ser feita em malhas quadradas ou rectangulares, igualmente espaçadas ou não, com diferentes configurações de estacas e considerando solo uniforme ou estratificado em duas camadas, factores estes que se revelam mais-valias nessa análise. No capítulo 3 após a descrição do método de análise, realizou-se a imprescindível validação de resultados e de seguida realizou-se um estudo importante sobre a consideração ou não de distribuição de corrente uniforme ao longo da malha. Concluindo-se que se comete um erro elevado ao considerar-se escoamento uniforme de corrente na malha, uma vez que na realidade isso não acontece, os segmentos exteriores apresentam densidades de corrente mais elevadas que os interiores, e quanto mais densa for a malha maior vai ser a não uniformidade de corrente ao longo dos segmentos da mesma. No capítulo 4 usou-se o programa para analisar e verificar a influência que certos parâmetros (profundidade de enterramento e resistividade da segunda camada) têm sobre o comportamento da malha, verificando-se que o aumento da profundidade de enterro provoca uma diminuição da resistência de terra e da tensão de passo e um aumento da tensão de toque; o aumento da resistividade da segunda camada provocará tal como era previsto, um aumento da resistência de malha e das tensões de passo e toque.

A optimização que constitui a parte principal do programa desenvolvido revelou-se como uma poderosa ferramenta em termos de redução da quantidade de material condutor utilizado, uma vez que combina duas técnicas de optimização eficientes. Por um lado a técnica de espaçamento variável e por outro a colocação de estacas verticais. No capítulo 5, começa-se por descrever essas duas técnicas e apresenta-se para cada uma delas um exemplo de aplicação no qual se verifica a sua eficácia, principalmente na redução da tensão de toque, parâmetro que se revela mais determinante em questões de segurança, uma vez que o seu valor é o que mais ultrapassa o valor tolerável, na maioria dos casos. Em relação às estacas conclui-se que se ganha muito em colocá-las na periferia, pois é aí que se verificam correntes mais elevadas, mas que se ganha pouco ao colocá-las no interior da malha. Verifica-se também que um comprimento de estaca maior conduz a uma redução mais acentuada das tensões de passo e toque, e uma redução quase insignificante da resistência de malha. Posteriormente introduziu-se o método de optimização desenvolvido, exemplificando de seguida o seu uso e comparando-o com as outras duas técnicas isoladas. Concluindo-se que

este constitui uma mais-valia pois procura, por ele próprio, a configuração mais vantajosa em termos de material condutor utilizado, não se limitando a tornar a malha segura. Finalmente no capítulo 6 utilizou-se o método desenvolvido para estudar várias malhas e verificar a influência que certos parâmetros tinham sobre os resultados do método. Observou-se que se a resistividade da segunda camada for baixa e se a espessura da primeira for também reduzida então ter-se-á como resultado uma malha menos densa, sendo que aumentando a espessura da primeira camada ir-se-á obter uma malha mais densa, verificando o oposto se a resistividade do solo for elevada. Quanto maior for a profundidade de enterramento mais densa será a malha resultante. Para além disso a densidade da malha é proporcional ao valor de corrente injectada e ao se modificar o espaçamento inicial entre condutores, mantendo-se os restantes parâmetros, o resultado final será a mesma malha. Observando os resultados verifica-se que se a malha inicial respeitar os valores limites então, na maioria dos casos será possível efectuar reduções acentuadas em termos de material condutor, até cerca de 63% de poupança, o que faz deste método uma ferramenta de optimização muito interessante.

7.1 Direcções de trabalho futuro

Após a realização deste trabalho, verifica-se que existem vários aspectos que ainda podem ser melhorados. Sugerem-se os seguintes tópicos de estudo futuro:

- Muitas áreas a proteger com malhas de terra podem não ter uma forma quadrada ou rectangular, sendo necessário implementar outras formas.
- Neste trabalho considerou-se as estacas como sendo introduzidas na primeira camada, seria uma mais-valia se a sua análise pudesse incluir a situação em que a estaca perfure as duas camadas.
- Em termos do processo de optimização poder-se-ia considerar, em termos futuros, a variação de mais parâmetros, para além do número de condutores e da configuração e tamanho de estaca. Podendo-se assim considerar a variação de parâmetros como as dimensões da malha, a profundidade de enterramento, as configurações de estacas, para além das duas consideradas, bem como o seu tamanho, para além dos dois tamanhos considerados em cada simulação.

ANEXO 1 – Manual do Programa

Para iniciar o programa OPTIMA começa-se por escrever na linha de comando do *Matlab* o seguinte comando “optima”. Após o comando digitado, o utilizador será confrontado com uma janela (fig. A1.1) que lhe irá permitir seguir a execução do programa.

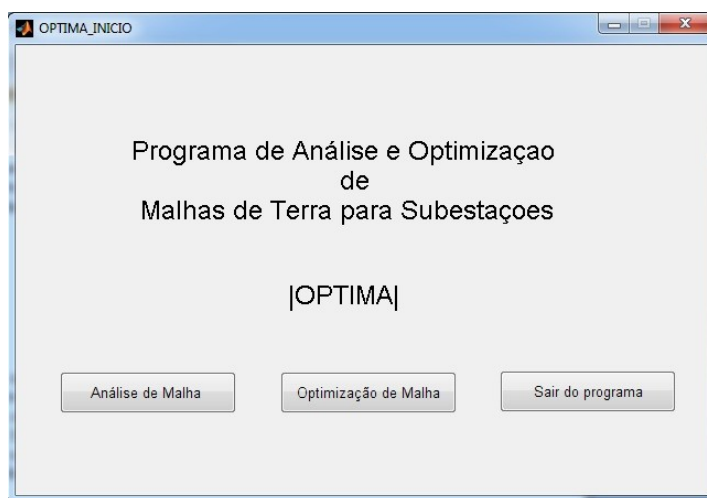


Figura A1.1 Janela Inicial do programa OPTIMA

Como se pode observar pela figura A1.1 e como referido no corpo principal deste trabalho, o programa desenvolvido possibilitará duas opções, a simples análise de uma malha de terra ou a sua optimização.

I.1 Análise de uma malha de terra

Para proceder à análise de uma malha de terra o utilizador deverá clicar em *Análise de Malha* na janela principal do programa (fig. A1.1). Em seguida será apresentado ao utilizador uma janela para a inserção de dados (fig. A1.2). O utilizador deverá então preencher os vários campos com a informação da malha que se pretende analisar e em seguida deve clicar em *Continuar*.

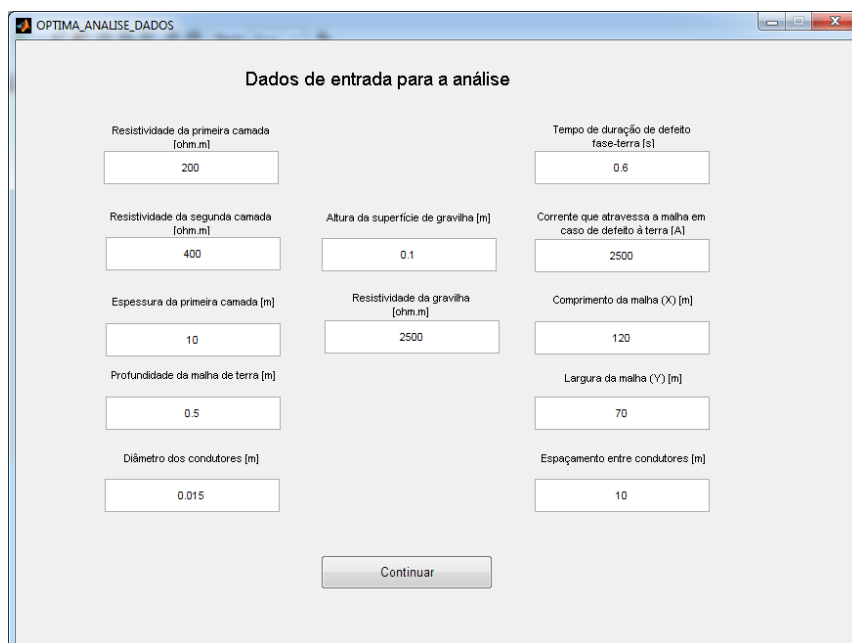
A screenshot of the 'OPTIMA_ANALISE_DADOS' window. It has a title bar with the text 'OPTIMA_ANALISE_DADOS'. The main area is titled 'Dados de entrada para a análise'. It contains 12 input fields arranged in two columns. The left column fields are: 'Resistividade da primeira camada [ohm.m]' (200), 'Resistividade da segunda camada [ohm.m]' (400), 'Espessura da primeira camada [m]' (10), 'Profundidade da malha de terra [m]' (0.5), and 'Diâmetro dos condutores [m]' (0.015). The right column fields are: 'Tempo de duração de defeito fase-terra [s]' (0.6), 'Corrente que atravessa a malha em caso de defeito à terra [A]' (2500), 'Comprimento da malha (X) [m]' (120), 'Largura da malha (Y) [m]' (70), and 'Espaçamento entre condutores [m]' (10). At the bottom center is a 'Continuar' button.

Figura A1.2 Janela para a introdução de dados para a análise de malha

Em seguida aparecerá uma interface (fig. AI.3) na qual o utilizador deverá escolher as opções que pretende. O utilizador deverá então escolher se pretender analisar a malha considerando igual espaçamento entre condutores ou aplicando o método de Sverak, ou seja, a técnica de espaçamento variável (técnica descrita no corpo principal deste trabalho). Para além disso o utilizador poderá escolher se pretende introduzir estacas ou não, sendo que possui 5 configurações de estacas disponíveis. Caso opte por introduzir estacas, deverá colocar no campo *Tamanho de estaca*, o comprimento de estaca que pretende utilizar, sendo que, como o programa apenas considera a análise de estacas na primeira camada, o utilizador deverá respeitar o tamanho máximo de estaca que se encontra indicado à direita do campo referido. Após a escolha das opções pretendidas o utilizador deverá clicar em *Continuar*.

The screenshot shows a software window titled "OPTIMA_ANALISE OPCOES". Inside, the text "Escolha entre as seguintes opções" is centered. Below this, there are three main sections:

- Escolha o tipo de espaçamento entre condutores**: This section contains two radio buttons. The first is "Igual espaçamento entre condutores" (unselected). The second is "Técnica de espaçamento variável (Método de Sverak)" (selected).
- Escolha o tipo de configuração de estaca que deseja**: This section contains six radio buttons. The first is "Sem estacas" (unselected). The second is "Estacas em todas as intersecções da periferia" (selected). The other four options are "Estacas em todas as intersecções", "Estacas em todas as intersecções, mais meios da periferia", "Estacas em todas as intersecções da periferia mais 8 condutores nas sub-malhas dos cantos", and "Estacas nas intersecções dos cantos e nos meios da periferia" (all unselected).
- Caso tenha optado pela colocação de estacas, escolha o comprimento de estaca**: This section contains a text input field labeled "Tamanho de estaca =" with the value "5" entered. To the right of this field, it says "Tamanho Máximo [m] = 10 (Limitado à primeira camada)".

A "Continuar" button is located to the right of the first section.

Figura AI.3 Janela para a selecção de opções de análise

A interface que é apresentada de seguida possui os resultados da análise efectuada (fig. AI.4). Esta interface possui as informações básicas da análise, bem como a representação da malha analisada. Para além disso possibilita ao utilizador o acesso a mais informações relevantes para a análise. Se o utilizador clicar em *Gráfico 3D* será apresentado o perfil 3D da distribuição de potencial à superfície do solo (fig. AI.5). Clicando em *Mapa de Tensão de Toque*, aparecerá uma nova janela com a distribuição da tensão de toque à superfície do solo (fig. AI.6). Os botões *Perfil X* e *Perfil Y* permitem determinar os perfis de potencial segundo as direcções x e y, respectivamente. A figura AI.7 apresenta o perfil segundo X para y = 0. Os valores de y ou x para os quais esses perfis são calculados deverão ser colocados, pelo utilizador, nos campos disponíveis para o efeito. Concluída a observação dos resultados o utilizador deverá clicar em *Continuar*.

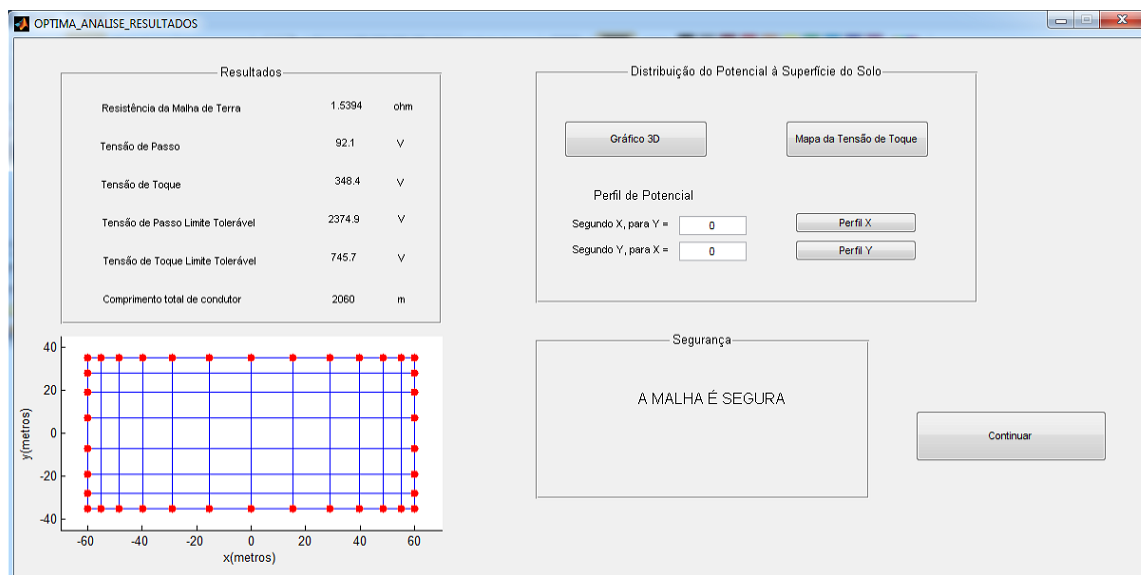


Figura A1.4 Janela de resultados da análise da malha

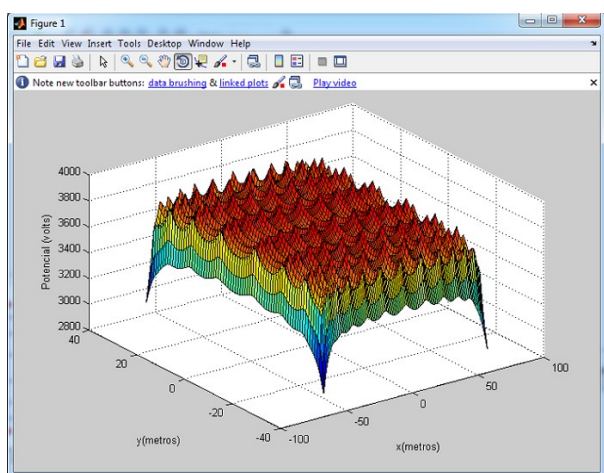


Figura A1.5 Perfil 3D da distribuição de potencial à superfície do solo

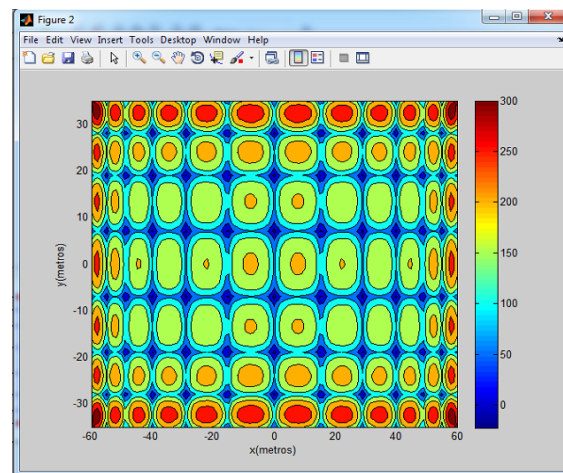


Figura A1.6 Mapa da tensão de toque à superfície do solo

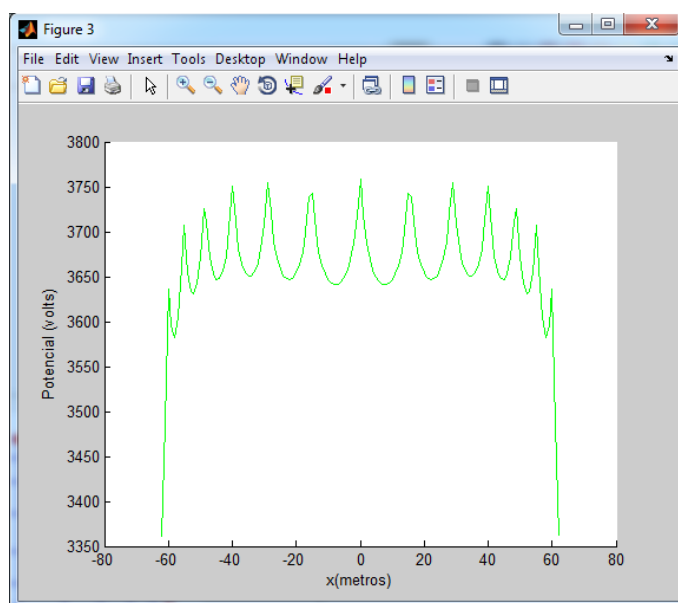


Figura A1.7 Perfil de potencial segundo x para y=0

É por fim apresentada a janela de saída do programa (fig. Al.11). Para finalizar a aplicação o utilizador deverá clicar em *Sair*.

I.2 Optimização da malha de terra

Para poder usufruir das capacidades de optimização do programa desenvolvido, o que constitui a principal funcionalidade do mesmo, o utilizador deverá clicar em *Optimização de Malha* na janela principal do programa (fig. Al.1). De seguida será apresentada uma interface que servirá para o utilizador introduzir os dados da malha que será a entrada do método de optimização (fig. Al.8). Concluída esta acção o utilizador deverá clicar em *Continuar*.

The screenshot shows a window titled 'OPTIMA_OPTIMIZACAO_DADOS' with the subtitle 'Dados de entrada para a optimização'. It contains 11 input fields arranged in two columns, with a 'Continuar' button at the bottom center. The values entered in the fields are: 400, 0.6, 200, 0.1, 1800, 5, 2500, 70, 70, 0.015, and 3.5.

Resistividade da primeira camada [m]	Tempo de duração de defeito fase-terra [s]
400	0.6
Resistividade da segunda camada [m]	Altura da superfície de grilha [m]
200	0.1
Corrente que atravessa a malha em caso de defeito à terra [A]	
	1800
Espessura da primeira camada [m]	Resistividade da grilha [ohm.m]
5	2500
Comprimento da malha (X) [m]	
	70
Profundidade da malha de terra [m]	Largura da malha (Y) [m]
1	70
Diâmetro dos condutores [m]	Espaçamento entre condutores [m]
0.015	3.5

Continuar

Figura Al.8 Janela para a introdução de dados para a optimização

De seguida é apresentada uma interface com informações sobre a malha de entrada do método de optimização (fig. Al.9). É apresentada uma representação gráfica da malha bem como os resultados da análise da malha, sendo que essa análise é realizada aplicando o método de Sverak (ver fluxograma do método no corpo principal). É também apresentada informação sobre a segurança da malha e a possibilidade de retirar, ou não, material condutor. Para prosseguir para a optimização da malha o utilizador deverá clicar em *Continuar*.

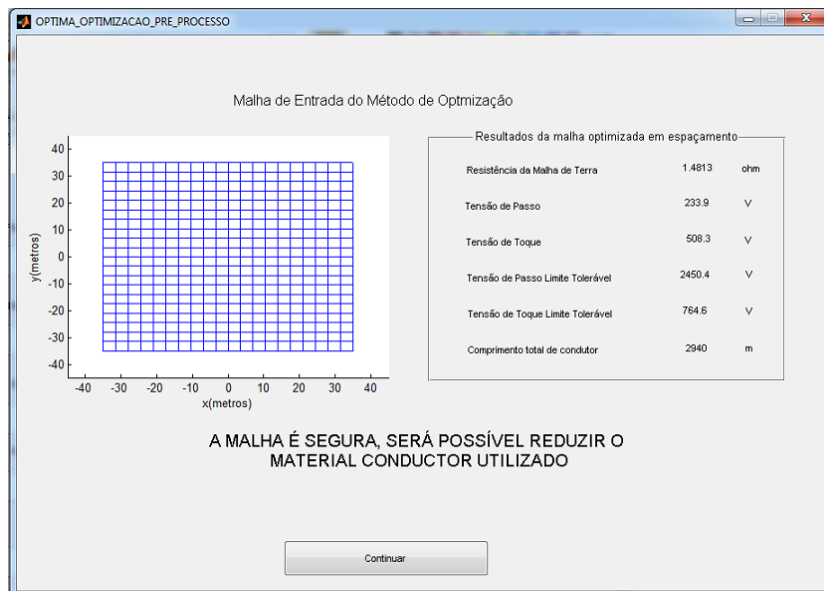


Figura Al.9 Janela de apresentação da malha antes da optimização

Em seguida será apresentada a interface com os resultados da optimização (fig. Al.10). É apresentada a representação gráfica da malha optimizada, bem como as informações básicas sobre a malha. Para além disso é apresentada, a vermelho, informação sobre a poupança ou a adição de material condutor. Por último também está à disposição do utilizador a possibilidade de obter o perfil 3D da distribuição de potencial à superfície, o mapa da tensão de toque, e os perfis segundo x e y. Concluída a observação dos resultados o utilizador deverá clicar em *Continuar*.

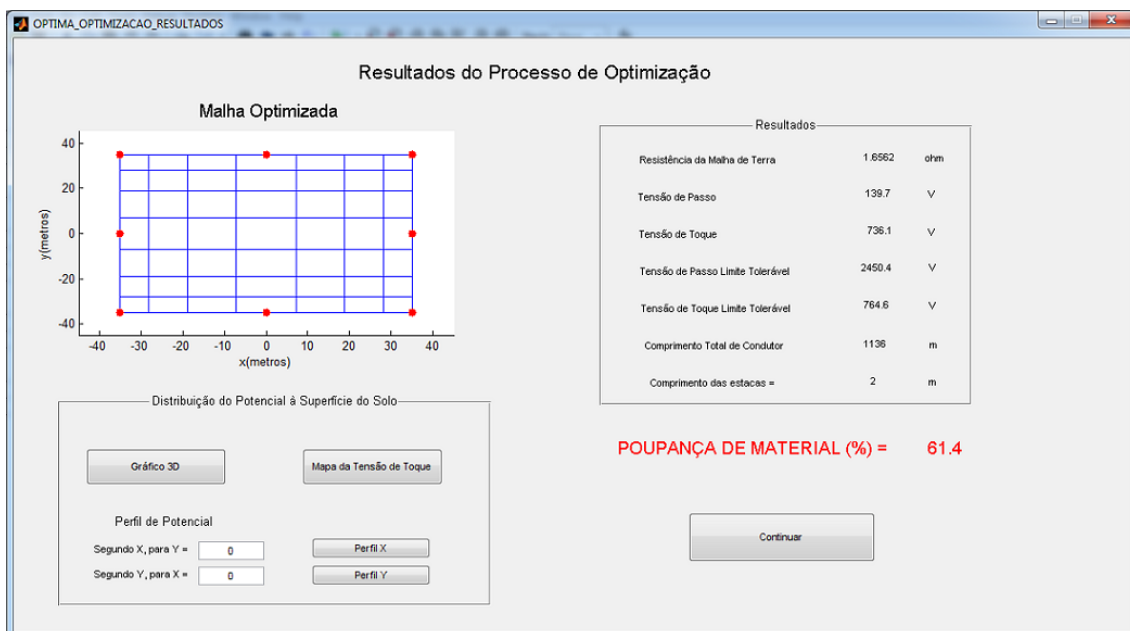


Figura Al.10 Janela com os resultados da optimização

É por fim apresentada a janela de saída do programa (fig. A1.11). Para finalizar a aplicação o utilizador deverá clicar em *Sair*.

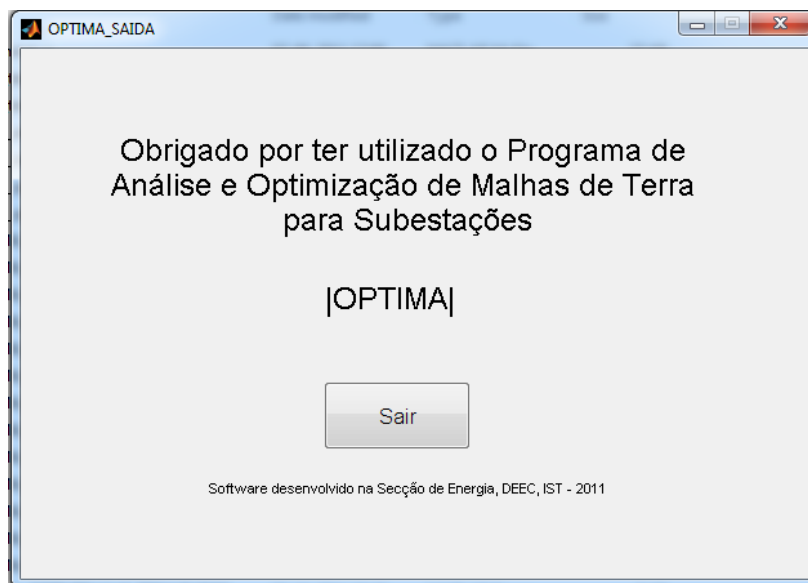


Figura A1.11 Janela de saída do programa OPTIMA

Referências Bibliográficas

- [1] "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", *IEEE Std 80-2000*, Agosto 2000.
- [2] Dawalibi, F.; Mukhedkar D.; "Optimum Design of Substation Grounding in a two Layer Earth Structure- Part I analytical study", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 252-261, Março/Abril 1975.
- [3] Dawalibi, F.; Mukhedkar D.; "Optimum Design of Substation Grounding in a two Layer Earth Structure- Part II", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 262-266, Março/Abril 1975.
- [4] Dawalibi, F.; Mukhedkar D.; "Optimum Design of Substation Grounding in a two Layer Earth Structure- Part III", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-94, No. 2, pp. 266-272, Março/Abril 1975.
- [5] Dawalibi, F.; Mukhedkar D.; "Multi Step Analysis of Interconnected Grounding Electrodes", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No. 1, Janeiro/Fevereiro 1976.
- [6] Sverak, J.G.; "Optimized Grounding Grid Design Using Variable Spacing Technique", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No. 1, pp. 362-374, Janeiro/Fevereiro 1976.
- [7] Dawalibi, F.; Mukhedkar D.; "Influence of Ground Rods on Grounding Grids", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 6, Nov./Dez. 1979.
- [8] Sverak, J.G.; "Simplified Analysis of Electrical Gradients Above a Grounding Grid, Part I: How Good is the Present IEEE Method?", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 103, pp. 7-25, Janeiro 1984.
- [9] "INSTALAÇÕES AT E MT. SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO", *EDP distribuição*, Fevereiro 2007.
- [10] Heppe, R. J., "Computation of potential at surface above an energized grid or other electrode, allowing for non-uniform current distribution", *IEEE Transaction on Power Apparatus and systems*, Vol. Pas-98, No. 6, Nov./Dec. 1979, pp. 1978-1989.
- [11] F. Dawalibi, D. Mukhedkar, "Behaviour of Grounding Systems in Multilayer soils: A Parametric Analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, No. 1, January. 1994, pp. 334-342.
- [12] Huang, L.; Chen, X.; Yan, H.; "Study of Unequally Spaced Grounding Grids", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 2, pp. 716-722, Abril 1995.