



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Cálculo do campo electromagnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia

Jorge Filipe Guerreiro Casaca

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Júri

Presidente: Doutor Gil Domingos Marques

Orientador: Doutora Maria Eduarda de Sampaio Pinto de Almeida Pedro

Co-orientador: Doutor Manuel Ventura Guerreiro das Neves

Vogal: Doutor Vítor Manuel de Oliveira Maló Machado

Setembro de 2007

Aos meus pais

Agradecimentos

Este projecto não teria sido possível sem a ajuda e o apoio de algumas pessoas a quem gostaria de expressar a minha gratidão. Primeiro, à minha orientadora, Prof. Maria Eduarda Pedro, pela ajuda, a dedicação e pelo tempo dispendido em tornar esta Dissertação de Mestrado uma realidade. Ao Prof. Manuel Guerreiro das Neves, pelo seu apoio e disponibilidade.

Gostaria de agradecer também à minha namorada Joana Maria Oliveira Marques, pelo seu apoio absoluto, amor e paciência em todos os momentos durante a realização desta dissertação.

Finalmente, uma palavra de agradecimento especial aos meus pais. À minha mãe Celeste da Conceição Guerreiro Casaca e ao meu pai Manuel Joaquim Paulino Casaca, por toda a confiança e apoio incondicional, não só ao longo da realização desta dissertação, mas durante todo o curso.

O meu muito obrigado a todos.

Resumo

Devido às recentes preocupações de que o campo electromagnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia, pode afectar os sistemas biológicos, a comunidade científica tem vindo a esforçar-se no sentido de encontrar novas soluções capazes de reduzir os campos na vizinhança das linhas.

Neste trabalho é apresentado um método de cálculo dos campos eléctrico e magnético a 50Hz, produzidos por linhas aéreas de transmissão de energia. Este método permite a avaliação de todas as correntes do sistema, incluindo as correntes nos subcondutores de cada fase, bem como as correntes dos cabos de guarda e na malha de mitigação (caso esteja presente). No cálculo do campo magnético é tido em conta o carácter não uniforme da trajectória descrita pelos condutores entre dois postes, descrevendo uma catenária.

Com este método, foi elaborado um programa de cálculo dos campos eléctrico e magnético, para qualquer geometria de linha, incluindo a presença da malha de mitigação do campo magnético. Usando o programa foram examinados diversos tipos de linhas e propostas soluções de mitigação do campo, dando especial atenção à eficácia da malha de mitigação em curto-circuito e com condensador em série.

Palavras Chave

Campo magnético, campo eléctrico, malha de mitigação, linhas de transmissão.

Abstract

Due to the recent concerns that electromagnetic fields generated by overhead power lines might affect biological systems, scientific community have been trying to find solutions that will reduce fields surrounding power lines.

In this work, a method for the evaluation of 50Hz electromagnetic fields produced by overhead power lines is presented. This method allows for a correct evaluation of all currents in the system, including the currents in the subconductors of each phase bundle, the currents in the ground wires and the currents in the mitigation loop (if present). In the magnetic field calculation, the nonuniform character of the trajectory described by the conductors between towers, drawing a catenary, is considered.

Using this method, a program for the calculation of magnetic and electric fields was produced. It can handle any line geometry, including the presence of a mitigation loop.

Making use of the program, all kinds of electric lines were examined and solutions for field reduction were proposed, giving special attention to the effectiveness of the mitigation loop technique with or without capacitor compensation.

Key Words

Magnetic field, electric field, mitigation loop, transmission lines.

Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo	v
Palavras Chave	v
Abstract.....	vi
Key Words	vi
Índice	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Abreviações	xii
1. Introdução	13
2. Equações da linha de transmissão	18
2.1 Linha sem perdas	18
2.2 Linha com perdas	23
3. Cálculo do campo electromagnético originado por linhas de transmissão de energia.....	27
3.1 Cálculo do campo magnético	27
3.2 Cálculo do campo eléctrico.....	35
4. Resultados de simulação	39
Conclusões	73
Referências	75
Anexos.....	78

Lista de Figuras

Figura 1.1 A – Carga à superfície do corpo originada pelo campo eléctrico. B – O campo magnético origina um fluxo de correntes que circulam no corpo.	15
Figura 2.1 Linha multifilar na presença da terra.....	18
Figura 2.2 Superfície para determinação da variação da corrente ao longo da linha	19
Figura 2.3 Linha de transmissão multifilar. Parâmetros geométricos	21
Figura 2.4 Representação do método de Dubanton.....	24
Figura 2.5 Variação da altura ao longo de um vão. Parâmetros da catenária.....	25
Figura 3.1 Representação da Lei de Ampère.	27
Figura 3.2 Especificação das coordenadas necessárias ao método de cálculo do campo magnético originado pelo condutor k no ponto P	28
Figura 3.3 Geometria de uma linha de 400kV em esteira, com malha de mitigação presente	30
Figura 3.4 Representação geométrica das extremidades próxima e distante da malha de mitigação. 33	
Figura 3.5 Especificação das coordenadas necessárias ao método de cálculo do campo eléctrico originado pelo condutor k no ponto P	37
Figura 4.1 Geometria de uma linha em esteira de 400kV, vista no poste ($z=0$).....	39
Figura 4.2 Representação transversal da variação do campo de indução magnética B , com a distância em x ($y = 1.8m, z = 150m, x \in [-50m; 50m]$). A curva 1 representa o caso base, com a linha não uniforme. A curva 2 representa a linha com altura média.	41
Figura 4.3 Representação transversal da variação do campo de indução magnética B , com a distância em z ($y = 1.8m, x = 0m, z \in [0m; 300m]$). A curva 1 representa o caso base, com a linha não uniforme. A curva 2 representa a linha com altura média.....	42
Figura 4.4 Representação geométrica da malha de mitigação na linha de 400kV em esteira ($z=0$). ..	42
Figura 4.5 Representação transversal da variação do campo de indução magnética B , com a distância em x . ($y = 1.8m, z = 150m, x \in [-50m; 50m]$).....	44
Figura 4.6 Representação da variação do campo de indução magnética B ao longo do espaço (entre dois postes consecutivos) para um $y = 1.8m$ (malha em curto-circuito).	45
Figura 4.7 Representação da variação do campo de indução magnética B , com a posição em x do condutor $L2$ da malha de mitigação (mantendo a simetria em relação ao poste, $L1=-L2$).	46
Figura 4.8 Vista aérea da configuração da linha com a malha colocada em $xL1 = -10m$ e $xL2 = 10m$	47
Figura 4.9 Campo de indução magnética B em função da reactância X_s do condensador inserido na malha de mitigação. O ponto assinalado corresponde à situação da malha em curto-circuito.	48
Figura 4.10 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m, z = 150m, x \in [-50m; 50m]$). A curva 1 (azul) representa a situação sem mitigação; a curva 2 (vermelho) corresponde à linha com malha de mitigação em curto-circuito; e a curva 3 corresponde à melhor solução com condensador em série.....	50
Figura 4.11 Representação da variação do campo magnético ao longo de um vão ($y = 1.8m, x = 0m, z \in [0; 300m]$). A curva 1 (azul) representa a situação sem mitigação; a curva 2 (vermelho)	

<i>corresponde à linha com malha de mitigação em curto-circuito; e a curva 3 (verde) corresponde à melhor solução com condensador em série.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 4.12 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$). A curva 1 (azul) representa a situação com malha de mitigação com os parâmetros $R = 0.131\Omega/km$ e $Cs = 6.354mF$; a curva 2 (vermelho) corresponde à linha com malha de mitigação de menor resistência linear $R = 0.028\Omega/km$ e $Cs = 5.005mF$.</i>	<i>52</i>
<i>Figura 4.13 Plano transversal com o contorno da intensidade do campo B_{rms} medido a meio vão. As curvas correspondem ao nível crítico de $100\mu T$. A curva 1 (azul) corresponde à situação sem mitigação; a curva 2 (vermelho) está associada à malha em curto-circuito; a curva 3 (verde) corresponde à malha com $R = 0.131\Omega/km$ e $Cs = 6.354mF$; e a curva 4 (preto) corresponde a $R = 0.028\Omega/km$ e $Cs = 5.005mF$.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 4.14 Representação geométrica das três configurações de linha analisadas, vistas do poste ($z=0$). (a) Linha na vertical; (b) Linha em triângulo; (c) Linha em triângulo invertido.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.15 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$) para as 4 geometrias analisadas: curva 1 (azul) – Linha em esteira; curva 2 (vermelho) – Linha na vertical; curva 3 (verde) – Linha em triângulo; curva 4 (preto) – Linha em triângulo invertido.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 4.16 Configuração geométrica de uma linha de duplo circuito de 400kV.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.17 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$), para a linha de circuito simples caracterizada pela tabela 4.1 e figura 4.1 (sem mitigação) – curva 1 e para a linha de duplo circuito, com geometria vertical caracterizada pela tabela 4.7 e pela figura 4.16.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.18 Plano transversal com o contorno da intensidade do campo B_{rms} medido a meio vão, para a linha de duplo circuito na vertical. A curva corresponde ao nível crítico de $100\mu T$.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 4.19 Representação geométrica da linha de duplo circuito em triângulo (a) e em triângulo invertido (b), vistas do poste ($z=0$).</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.20 Representação transversal da variação do campo magnético com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$) para as 3 geometrias de duplo circuito : curva 1 (azul) – Linha na vertical; curva 2 (vermelho) – Linha em triângulo; curva 3 (verde) – Linha em triângulo invertido.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.21 Representação transversal da variação do campo eléctrico E, com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$).O ponto assinalado representa o valor máximo do campo E obtido.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.22 Representação transversal da variação do campo eléctrico E para diferentes geometrias ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$)......</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.23 Representação geométrica da distância D_c e H_c na geometria em esteira.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.24 Representação transversal da variação do campo eléctrico E fazendo variar a distância entre condutores para a geometria em esteira ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$).</i>	<i>66</i>
<i>Figura 4.25 Representação transversal da variação do campo eléctrico E fazendo variar a distância dos condutores ao solo para a geometria em esteira ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$).</i>	<i>67</i>

Figura 4.26 Plano transversal com o contorno da intensidade do campo E para a linha em esteira caracterizada pela tabela 4.1 e pela figura 4.1. As curvas correspondem aos níveis críticos da ICNIRP. O contorno a azul corresponde ao nível para o público de 5kV/m; o contorno a castanho corresponde ao nível para os trabalhadores de 10kV/m.	68
Figura 4.27 Sequência das fases na geometria de duplo circuito aplicada na figura 4.29.....	69
Figura 4.28 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , para a geometria típica de duplo circuito da figura 4.16 e para os diferentes arranjos da figura 4.27.	70
Figura 4.29 Sequência das fases na geometria de duplo circuito aplicada na figura 4.19 – a).	70
Figura 4.30 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , para a geometria de duplo circuito da figura 4.19-a) em triângulo, para as diferentes geometrias da figura 4.29.....	71
Figura 4.31 Sequência das fases na geometria de duplo circuito aplicada na figura 4.22 – b).	71
Figura 4.32 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , para a geometria de duplo circuito da figura 4.19-b) em triângulo invertido, para as diferentes geometrias da figura 4.31.	72
Figura 0.1 Influência da resistividade da terra no campo magnético B_{rms} (linha em esteira)	78
Figura 0.2 Interface gráfico do programa de cálculo do campo eléctrico e magnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia.....	79
Figura 0.3 Apresentação dos valores obtidos pelo programa.....	80

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 Características de todos os condutores da linha	40
Tabela 4.2 Características dos condutores da malha de mitigação	43
Tabela 4.3 Amplitudes complexas da corrente de todos os condutores, sem malha incluída e com malha em curto-circuito	43
Tabela 4.4 Amplitudes complexas das correntes nos condutores, para a malha com condensador em série	49
Tabela 4.5 Variação do campo com a resistência linear dos condutores da malha, para o mesmo ponto de observação do campo ($x = 0m, y = 1.8m, z = 150m$)	52
Tabela 4.6 Variação do campo para diferentes configurações da linha, para o mesmo ponto de observação do campo ($x = 0m, y = 1.8m, z = 150m$)	55
Tabela 4.7 Características de todos os condutores da linha de duplo circuito	58
Tabela 4.8 Amplitudes complexas das correntes nos condutores, para a linha de duplo circuito na vertical	59
Tabela 4.9 Variação do campo para diferentes configurações da linha de duplo circuito, para o mesmo ponto de observação do campo ($x = 0m, y = 1.8m, z = 150m$)	62
Tabela 4.10 Valores obtidos para o campo eléctrico para diferentes geometrias	64
Tabela 4.11 Valores obtidos para o campo eléctrico para as diferentes geometrias, usando um condutor por fase	65

Lista de Abreviações

CEMS	Campos electromagnéticos
ROW	Right-of-way
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
ANSI	American National Standards Institute
IEEE	Institute of Electric and Electronics Engineers
DGS	Direcção-Geral de Saúde
REN	Redes Energéticas Nacionais

1. Introdução

A electricidade tem tido um papel determinante nas sociedades industrializadas ao longo dos anos, constituindo a base do modo de vida nos países desenvolvidos. O transporte, a distribuição e a utilização diária de energia eléctrica pelos consumidores, tornam as habitações, bem como os locais de trabalho, lugares com um ambiente electromagnético de muito baixa frequência bastante diferente do ambiente natural. À medida que as necessidades de energia aumentam, também aumenta a capacidade de transporte das centrais para os centros de consumo fazendo uso de tensões cada vez mais elevadas nas linhas de transmissão. Torna-se assim importante estudar os efeitos das linhas de transmissão de energia à medida que o consumo e as tensões de transmissão aumentam. Nos últimos anos, um dos factores importantes na selecção da linha de transmissão são os efeitos do campo eléctrico e magnético.

A exposição a campos electromagnéticos (CEMs) não é um fenómeno novo. No entanto, durante o século XX, a proliferação de fontes electromagnéticas não ionizantes foi considerável, tendo sido o nosso quotidiano invadido pelos CEMs.

Em meados do século passado, as principais preocupações com linhas de transmissão de energia estavam relacionadas com aspectos estéticos, bem como potenciais interferências nos sistemas de rádio e televisão. A partir dos anos 70, os CEMs provocados pelas linhas passaram a ser motivo de preocupação, devido a uma possível relação entre a incidência de cancro e a exposição a CEM's. Estas suspeitas, devido ao interesse que o publico e os meios de comunicação lhe dedicaram, despertaram a investigação científica que se seguiu. Desde então têm sido publicados inúmeros artigos científicos e resultados de investigações com esta temática [CARST95].

Um pouco por todo o mundo estão a ser realizados estudos epidemiológicos, os quais serão uma peça fundamental para determinar se os CEMs são responsáveis por efeitos adversos na saúde.

No entanto, até agora os estudos relacionados com a saúde têm sido inconclusivos, sem que nunca seja provada uma evidência directa entre a exposição a CEMs e efeitos pejorativos na saúde. Grupos científicos reconhecidos internacionalmente em [COMAR00]-[CARST95], acreditam que a informação não é suficiente para concluir que os campos eléctrico ou magnético provenientes das linhas de transmissão possam causar cancro, anomalias reprodutivas ou de desenvolvimento. Não existem populações expostas há tempo suficiente que permitam tirar conclusões mais definitivas nesta altura.

No entanto, com base nos conhecimentos científicos actuais, a Comissão Internacional para a Protecção contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) definiu um conjunto de limites básicos de exposição aos CEMs, tanto para a população em geral como para os trabalhadores que actuam junto das linhas [ICNIRP98]. Para a população em geral os limites são:

- para a intensidade do campo eléctrico, $E < 5 \text{ kV/m}$;
 - para a intensidade do campo magnético, $H < 80 \text{ A/m}$;
 - para a densidade do fluxo magnético, $B < 100 \text{ } \mu\text{T}$.
-

No que respeita aos trabalhadores, são:

- para a intensidade do campo eléctrico, $E < 10 \text{ kV/m}$;
- para a intensidade do campo magnético, $H < 400 \text{ A/m}$;
- para a densidade do fluxo magnético, $B < 500 \text{ } \mu\text{T}$.

A população exposta ocasionalmente (trabalhadores) consiste em adultos que estão geralmente expostos em condições que são conhecidas e que são treinados de modo a evitarem o potencial risco e a tomarem precauções. Por outro lado, o público em geral, compreende indivíduos de todas as idades e estado de saúde variável, e pode incluir grupos ou pessoas particularmente susceptíveis. Em muitos casos, os membros do público não estão cientes ou desconhecem a sua exposição a campos electromagnéticos.

Estes níveis de exposição são baseados em valores a partir dos quais se verifica a ocorrência de efeitos nocivos na saúde. Com base nessas normas o Conselho da União Europeia elaborou a Recomendação nº 1999/519/CE de 12 de Julho, relativa à limitação da exposição da população aos CEMs (0 Hz – 300 GHz). Em Portugal foi adoptada a Recomendação do Conselho Europeu através da Portaria nº 1421/2004, de 23 de Novembro. Grande parte dos países da EU, nomeadamente França, Alemanha, Espanha, Reino Unido, Finlândia e Grécia, adoptaram as orientações da ICNIRP e da Recomendação da EU, e criaram medidas legislativas. Por outro lado, em países como a Itália e a Bélgica, foram adoptados níveis de referência mais restritos do que os definidos pela ICNIRP (recomendação da EU). Noutros países, no que respeita à população em geral, temos a seguinte situação:

- Nos Estados Unidos, são seguidos os limites da ANSI/IEEE, que são na generalidade superiores aos da ICNIRP.
- No Canadá, Nova Zelândia e Japão, foram adoptados valores de referência similares aos da ICNIRP.
- Na Suíça, são seguidos os valores-limite da ICNIRP, com excepção das zonas residenciais, onde são mais reduzidos.

Tendo em conta esta diversidade de valores adoptados pelos diferentes países, é portanto de prever que um longo percurso irá ser trilhado no futuro, no sentido de se obter uma clarividência no que respeita às interacções dos CEMs com a saúde. A publicação de novos resultados conduzirá provavelmente à revisão dos actuais valores de referência adoptados, e necessariamente, a nova regulamentação. É de prever que a tendência verificada nestas revisões seja para diminuir valores.

Recentemente (Agosto 2007), foi divulgado um estudo da DGS sobre a exposição da população a campos electromagnéticos [DGS07], nos quais foram feitas algumas recomendações de destacar:

- Que não se deverão impor condicionantes à operação de sistemas que produzam radiações não ionizantes sem fundamentos científicos comprovados;
- A necessidade de se definirem procedimentos de medição e de cálculo, para avaliação do cumprimento dos níveis de referencia e das restrições básicas das emissões provenientes de linhas de energia, de postos de transformação e de outros equipamentos;

- Os projectos de linhas eléctricas de muito alta tensão passem a incluir uma avaliação dos campos electromagnéticos, nos locais de acesso da população em geral.

À frequência industrial, as componentes do campo eléctrico e magnético comportam-se de forma independente. A intensidade do campo eléctrico produzida pela linha de transmissão depende principalmente da tensão da linha, enquanto que o campo magnético tem uma forte dependência da corrente transportada pela linha. A forma como o campo eléctrico e magnético interagem com o corpo é, também ela, diferente. Os campos eléctricos de baixa frequência não penetram no corpo de forma significativa, mas acumulam carga à sua superfície (*figura 1.1*). Como resultado, as correntes eléctricas fluem desde a superfície até ao solo (terra) [WHO02]. Os campos magnéticos podem facilmente penetrar no corpo provocando a circulação de correntes. Estas correntes não se escoam necessariamente para a terra, podendo, no caso de serem suficientemente intensas, estimular os nervos e os músculos e afectar outros processos biológicos [WHO02].

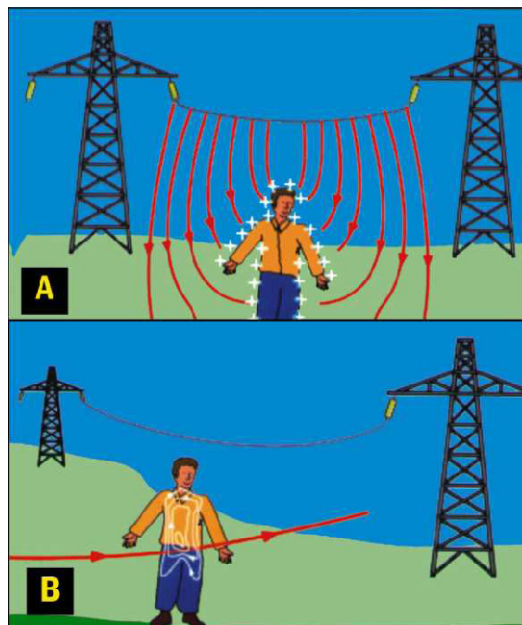


Figura 1.1 A – Carga à superfície do corpo originada pelo campo eléctrico. B – O campo magnético origina um fluxo de correntes que circulam no corpo.

Os efeitos dos campos na saúde caem fora do contexto deste trabalho, no entanto, pelo facto do campo magnético penetrar no corpo de forma mais significativa, este vai ser estudado de forma mais aprofundada do que o campo eléctrico. O cálculo rigoroso dos campos eléctrico e magnético originados por linhas de transmissão de energia afigura-se assim muito importante, bem como soluções para a sua redução. A redução dos CEMs na vizinhança das linhas de transmissão de energia constitui assim um desafio de engenharia para desenvolver soluções tecnológicas eficazes associado com o desafio biomédico de definir, exactamente, quais os campos e que níveis são prejudiciais à saúde.

No que diz respeito a reduzir a exposição aos campos magnéticos, de muito baixa frequência, originados pelas linhas de transmissão de energia, podem ser feitas inúmeras abordagens:

- aumentar a distância de segurança das linhas de transmissão;
- aumento da tensão (para a mesma carga, reduz a corrente);
- redução das distâncias entre fases, associado a um aumento do número de fases (linhas compactas);
- reconfigurar a geometria da linha;
- instalar uma malha de mitigação passiva ou activa, junto dos condutores de fase;
- utilizar cabos subterrâneos.

A maior parte destas soluções são consideradas “medidas extremas” ou inviáveis por diversos motivos, sendo quase sempre o preço o factor decisivo.

Normalmente a primeira abordagem, e mais simples, consiste em aumentar as distâncias entre os condutores, o que implica expandir o corredor da linha (conhecido pela expressão inglesa right-of-way ou ROW). Esta solução acarreta diversos problemas, nomeadamente do foro legal. Como é sabido, uma linha de transmissão, tal como uma linha ferroviária ou uma auto-estrada, possui um corredor com distâncias específicas, sujeito a direitos de passagem em propriedades privadas. Alterar o corredor da linha é assim uma tarefa complicada e dispendiosa devido à utilização dos terrenos. Tendo em conta, que a redução dos valores dos campos é normalmente necessária em zonas densamente povoadas, na vizinhança de escolas, etc., raramente a expansão do corredor da linha pode ser aplicada.

Devido às dificuldades em obter novos corredores para linhas de transmissão, as entidades públicas dos países industrializados, redobram esforços de modo a maximizar a capacidade dos circuitos existentes utilizando sempre que possível, linhas de duplo circuito, mesmo que um circuito fique em reserva num estado inicial.

De todos os métodos de mitigação, aquele que conduz a resultados quase nulos do campo magnético é a utilização de cabos subterrâneos. No entanto esta solução tem um custo aproximadamente 7 vezes superior à configuração tradicional da linha horizontal em esteira [WASHI92].

Neste trabalho foi elaborado um programa de cálculo do campo magnético e eléctrico na plataforma Matlab para diferentes configurações de linhas e que permite considerar a existência de uma malha de mitigação (em curto-circuito ou com condensador em série) como forma de reduzir o campo magnético. O programa tem como variáveis de entrada a geometria da linha, as características dos condutores, a tensão e corrente da linha e a resistividade da terra. As variáveis de saída são as intensidades do campo magnético, H , do campo eléctrico, E e a densidade do campo magnético, B .

No capítulo 2 é feita a primeira abordagem à linha de transmissão, onde são deduzidas as equações de propagação da linha. A partir da linha sem perdas são calculados os parâmetros C e L . É obtida a matriz das impedâncias longitudinais Z , através da soma de três parcelas: a matriz dos coeficientes de indução da linha ideal L_e ; a matriz de correcções devidas ao efeito pelicular nos condutores

aéreos; e a matriz de correcções devidas ao efeito pelicular na terra. É descrito o método empírico de Dubanton no cálculo da matriz de correcções devidas ao efeito pelicular na terra. De seguida é apresentada a expressão para a geometria da catenária, que traduz a variação da altura linha ao longo de um vão.

No capítulo 3 é descrito o método de cálculo do campo electromagnético adoptado na realização do programa. O cálculo do campo magnético implica o conhecimento de todas as correntes do sistema. A partir da matriz de impedâncias é obtida a fórmula de cálculo das correntes usando como exemplo uma linha em esteira de circuito simples. Primeiro é obtida a corrente na malha de mitigação, seguida da corrente nas guardas e posteriormente nas fases geminadas, para as linhas com mais de um condutor por fase. Calculadas as correntes, é obtida a expressão para o cálculo do campo magnético B , num ponto genérico, como o somatório das contribuições de todos os condutores da linha.

Finalmente, é descrito o cálculo do campo eléctrico, calculando o vector das cargas q nos condutores, em função das tensões e da matriz dos coeficientes de potencial da linha.

O capítulo 4 é reservado aos resultados de simulação obtidos para diferentes geometrias. Este capítulo está dividido em duas partes, a primeira reservada à análise do campo magnético e a segunda ao campo eléctrico. Uma vez que o estudo incidiu, sobretudo, no cálculo do campo magnético, pelas razões referidas anteriormente, por uma questão de uma maior facilidade de percepção na análise dos resultados, optou-se por separar a análise do campo magnético e do campo eléctrico. Para cada um dos campos são analisadas várias geometrias para linhas de circuito simples e de duplo circuito, usando como caso base, a linha em esteira (circuito simples) e a linha na vertical (duplo circuito), pelo facto de serem as linhas de transmissão mais usadas em Portugal pela REN. São estudadas em pormenor as influências da malha de mitigação (em curto-circuito e com condensador em série) e da geometria da linha nos valores do campo magnético.

Finalmente, de forma idêntica ao estudo do campo magnético, é feita a análise do campo eléctrico.

2. Equações da linha de transmissão

2.1 Linha sem perdas

A linha de transmissão sem perdas é constituída por um sistema de condutores metálicos perfeitos, dispostos sobre a superfície da terra, suposta plana e condutora perfeita. O meio dieléctrico, ar, que envolve os condutores metálicos também se considera perfeito.

Considerando a linha de transmissão, constituída por um sistema de n condutores de raio r_k ($k = 1, \dots, n$) (figura 2.1).

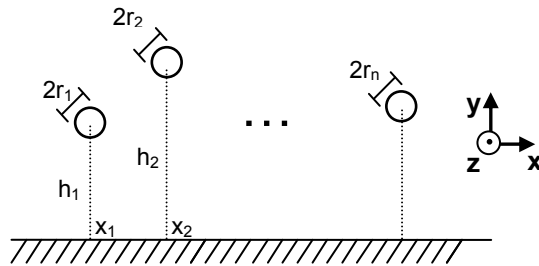


Figura 2.1 Linha multifilar na presença da terra

Considerando um troço do condutor k . Envolvemos agora esse condutor pela superfície fechada S , que contém o volume V . Da equação da continuidade:

$$\operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2.1)$$

e aplicando o teorema de Gauss, resulta:

$$\int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \, dS = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} \, dV \quad (2.2)$$

em que \mathbf{n} constitui a normal exterior à superfície S (figura 2.2).

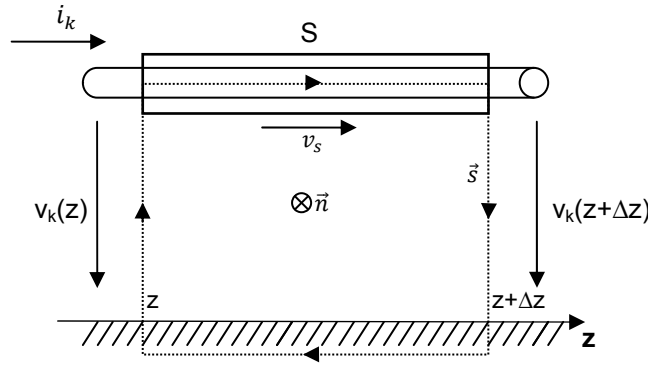


Figura 2.2 Superfície para determinação da variação da corrente ao longo da linha

Temos como contribuições para o integral de superfície, $-i_k(z)$ e $+i_k(z + \Delta z)$, respectivamente. A superfície lateral tem contribuição nula, uma vez que o dielétrico é perfeito. Ficamos então com,

$$-i_k(z) + i_k(z + \Delta z) = -\frac{\partial q_k(z)}{\partial t} \cdot \Delta z \quad (2.3)$$

em que $q_k(z)$ representa a carga por unidade de comprimento do condutor k em z , admitindo que Δz é suficientemente pequeno para considerarmos ρ constante ao longo de Δz .

Em meio linear, ficaremos com:

$$q_i(z) = \sum_{i=1}^n C_{ki} v_i(z) \quad (2.4)$$

C_{ki} tem a dimensão de capacidade por unidade de comprimento.

Substituindo em (2.3) e dividindo por Δz , teremos então:

$$\frac{i_k(z + \Delta z) - i_k(z)}{\Delta z} = -\sum_{i=1}^n C_{ki} \frac{\partial v_i(z)}{\partial t} \quad (2.5)$$

Com Δz a tender para zero, obtemos a seguinte equação, que podemos generalizar como uma equação matricial para os n condutores da linha:

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -\mathbf{C} \frac{\partial v}{\partial t} \quad (2.6)$$

Vamos considerar agora a lei geral da indução:

$$\int_s \mathbf{E} \, ds = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS \quad (2.7)$$

Aplicando (2.7) à circulação s , tendo S como uma superfície que se apoia no caminho de circulação e n uma normal em cada ponto à superfície S , obedecendo à regra de Stokes.

Ficamos assim com a seguinte equação:

$$v_k(z + \Delta z) - v_k(z) = -\frac{\partial \psi_s}{\partial t} \quad (2.8)$$

Considerando novamente que estamos em meio linear:

$$\psi_s(z) = \Delta z \sum_{i=1}^n L_{ki} i_i(z) \quad (2.9)$$

Procedendo de forma análoga à equação (2.5), ficamos com:

$$\frac{v_k(z + \Delta z) - v_k(z)}{\Delta z} = -\sum_{i=1}^n L_{ki} \frac{\partial i_i(z)}{\partial t} \quad (2.10)$$

Obtemos assim, para os n condutores:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\mathbf{L} \frac{\partial \mathbf{i}}{\partial t} \quad (2.11)$$

No domínio da frequência as equações da linha são:

$$\begin{cases} \frac{d\bar{\mathbf{I}}}{dz} = -\bar{\mathbf{Y}}\bar{\mathbf{V}} \\ \frac{d\bar{\mathbf{V}}}{dz} = -\bar{\mathbf{Z}}\bar{\mathbf{I}} \end{cases} \quad (2.12)$$

onde,

$$\begin{cases} \bar{\mathbf{Z}} = j\omega\mathbf{L} \\ \bar{\mathbf{Y}} = j\omega\mathbf{C} \end{cases} \quad (2.13)$$

Cálculo dos parâmetros C e L:

Como o campo electromagnético não penetra condutores perfeitos, as suas fronteiras coincidem com as superfícies dos condutores aéreos e a terra. Assim a geometria dos condutores, em conjunto com os parâmetros do dieléctrico ϵ e μ (ϵ_0 e μ_0 para o ar), determinam completamente os coeficientes de indução externo e de capacidade da linha [NEVES90].

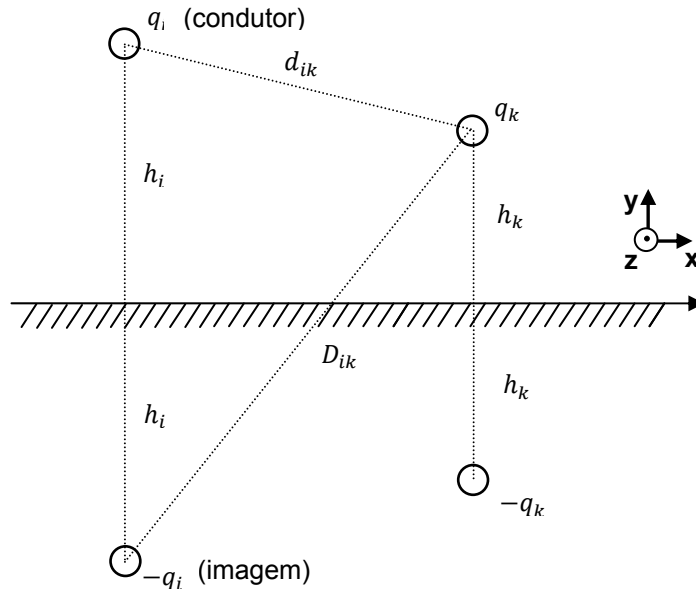


Figura 2.3 Linha de transmissão multifilar. Parâmetros geométricos

Cada carga filiforme e a sua imagem formam um par simétrico – método das imagens (*figura 2.3*). Considerando o condutor i com carga q_i por unidade de comprimento (*figura 2.3*), o campo eléctrico criado pela carga q_i e respectiva imagem na terra, é dado por:

$$\mathbf{E}_i(x, y) = \frac{q_i}{2\pi\epsilon d_i} \mathbf{e}_{di} - \frac{q_i}{2\pi\epsilon D_i} \mathbf{e}_{Di} \quad (2.14)$$

em que d_i é a distancia entre condutores e D_i a distancia entre o condutor e a sua imagem (*figura 2.3*). \mathbf{e}_{di} e \mathbf{e}_{Di} são os vectores directores de d_i e D_i respectivamente.

A distância entre o ponto (x, y) e o condutor i , foi designada por d_i , sendo D_i a distância do mesmo ponto à imagem do condutor i .

Para o condutor i e a sua imagem, podemos calcular v_i :

$$v_i = \int_{r_i}^{h_i} \frac{q_i}{2\pi\epsilon d_i} dd_i + \int_{h_i}^{2h_i} \frac{q_i}{2\pi\epsilon D_i} dD_i \quad (2.15)$$

Ficando assim:

$$v_i = \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \frac{h_i}{r_i} + \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{h_i} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (2.16)$$

Os elementos da diagonal principal da matriz dos coeficientes de potencial P são dados por:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (2.17)$$

Para v_k :

$$v_k = \int_0^{h_k} \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{\sqrt{(h_i - y)^2 + (x_i - x_k)^2}} \cdot \frac{h_i - y}{\sqrt{(h_i - y)^2 + (x_i - x_k)^2}} dy + \int_0^{h_k} \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \cdot \frac{1}{\sqrt{(h_i + y)^2 + (x_i - x_k)^2}} \cdot \frac{h_i + y}{\sqrt{(h_i + y)^2 + (x_i - x_k)^2}} dy \quad (2.18)$$

Obtém-se:

$$v_k = \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{(h_i + h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}{(h_i - h_k)^2 + (x_i - x_k)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.19)$$

Os elementos não-diagonais da matriz P , ficam assim:

$$P_{ik|k \neq i} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{\sqrt{(h_i + h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}}{\sqrt{(h_i - h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}} \right] = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{ki}}{d_{ki}} \quad (2.20)$$

A matriz C calcula-se, invertendo a matriz dos potenciais P .

Vamos agora analisar o campo magnético H , considerando que o condutor i é percorrido pela corrente i e a sua imagem pela corrente $-i$. Para um ponto (x,y) o campo magnético H , fica:

$$H(x,y) = \frac{1}{2\pi d_i} i e_{\phi d_i} - \frac{1}{2\pi D_i} i e_{\phi D_i} \quad (2.21)$$

No plano que contém o condutor i , $e_{\phi d_i} = -e_{\phi D_i} = -e_x$. O fluxo de B através da superfície representada na *figura 2.2*, em relação ao condutor i , é dada por:

$$\psi_i = \Delta z \mu_0 \left\{ \int_{r_i}^{h_i} \frac{i}{2\pi d_i} dd_i + \int_{h_i}^{2h_i} \frac{i}{2\pi D_i} dD_i \right\} \quad (2.22)$$

Daqui obtemos o coeficiente de auto-indução por unidade de comprimento, para os elementos da diagonal principal da matriz L :

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (2.23)$$

Procedendo de forma semelhante, para o condutor k , ficamos com:

$$\psi_k = \Delta z \mu_0 \left\{ \int_0^{h_k} \left[\frac{i(h_i - y)}{2\pi[(h_i - y)^2 + (x_i - x_k)^2]} + \frac{i(h_i + y)}{2\pi[(h_i + y)^2 + (x_i - x_k)^2]} \right] dy \right\} \quad (2.24)$$

Ficamos assim para os restantes elementos da matriz L :

$$L_{ki}|_{k \neq i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h_i + h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}}{\sqrt{(h_i - h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}} \right] \quad (2.25)$$

2.2 Linha com perdas

No caso de os condutores (metálicos e terra) serem imperfeitos, o campo electromagnético penetra no seu interior – efeito pelicular – originando quedas de tensão longitudinais. Deste modo, o campo eléctrico deixa ser transversal ao eixo da linha. A componente longitudinal do campo, dependente da frequência, é responsável pela distorção e atenuação das ondas durante a propagação.

As equações de propagação (2.12), deixam de ser válidas, no entanto para uma determinada gama de frequências pode-se desprezar a componente longitudinal da corrente de deslocamento face à corrente de condução. Assim podem usar as mesmas equações, mas acrescentando-se no cálculo dos parâmetros da linha os termos correctivos que traduzem a penetração do campo electromagnético nos condutores.

A matriz das impedâncias longitudinais $Z(\omega)$ é considerada como a soma de três parcelas [BARROS95], [BRAND06]:

$$Z(\omega) = j\omega L_e + \Delta Z_c(\omega) + \Delta Z_t(\omega) \quad (2.26)$$

em que:

L_e – matriz dos coeficientes de indução da linha sem perdas;

ΔZ_c – matriz de correcções devidas ao efeito pelicular nos condutores aéreos;

ΔZ_t – matriz de correcções devidas ao efeito pelicular na terra.

Os elementos da matriz das impedâncias que no caso da linha sem perdas são imaginários puros, passam agora a ter uma parte real, verificando-se assim o efeito de Joule em condutores não-ideais.

A penetração do campo é medida por δ , designado por profundidade de penetração:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (2.27)$$

Analisando a expressão (2.27), concluímos que a profundidade de penetração do campo electromagnético num meio bom condutor é inversamente proporcional à frequência, daí a designação adoptada de efeito pelicular.

As equações anteriores são aplicáveis a uma qualquer configuração de linha de transmissão de energia, permitindo calcular a penetração do campo tanto nos condutores aéreos como na terra.

O método empírico de Dubanton baseia-se no método das imagens, mas em que o plano de potencial nulo está a uma distância complexa \bar{p} da superfície real da terra (figura 2.4), com

$$\bar{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_t}} \quad (2.28)$$

em que σ_t representa a condutividade eléctrica da terra (Ωm^{-1}).

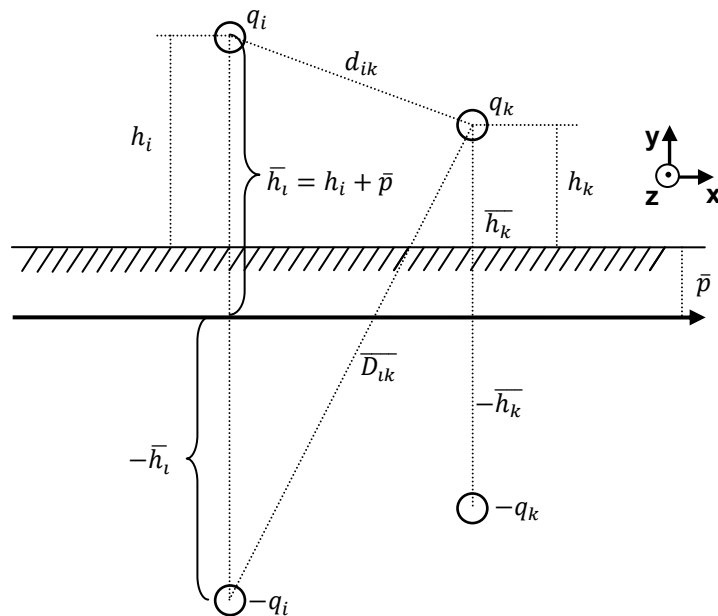


Figura 2.4 Representação do método de Dubanton

As entradas da matriz $\Delta Z_t(\omega)$ são dadas por [BRAND06], [DUBAN69]:

$$\Delta Z_t(\omega) = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \frac{\bar{D}_{ik}}{D_{ik}} \quad (2.29)$$

A matriz de correcções devidas ao efeito pelicular é uma matriz diagonal, se desprezarmos o efeito de proximidade entre os condutores, e pode ser determinada usando os resultados da teoria do efeito pelicular para condutores cilíndricos [BRAND06]. Calcula-se recorrendo a funções de Bessel, no entanto para as baixas frequências usadas neste trabalho (50Hz) a equação (2.30) é uma boa aproximação:

$$\Delta Z_c(\omega) = R_{DC} + j\omega \frac{\mu}{8\pi} \quad (2.30)$$

Geometria da catenária:

Os condutores da linha não estão, em todos os pontos, à mesma altura. Na realidade, descrevem periodicamente, uma catenária, em que a flecha depende das características individuais da linha e das condições ambientais. Os efeitos da catenária raramente são tidos em conta na literatura, sendo muitas vezes assumidos como desprezáveis. No entanto, o efeito da catenária é significativo na amplitude do campo magnético. A contribuição da catenária torna-se especialmente significativa para valores da flecha superiores a 10% da altura do condutor no poste [MAMISH96]. Este tipo de análise tem especial interesse para os casos de exposição profissional, em que as distâncias aos condutores são muito pequenas [ICNIRP98].

Ao longo de um vão d (distância entre dois postes) a distância dos condutores da linha ao solo, varia com z . A forma exacta de um condutor suspenso entre dois postes com a mesma altura, pode ser descrita através dos seguintes parâmetros: distância entre dois postes, d ; flecha, f ; altura mínima, h_{min} (meio-vão) e altura máxima, h_{max} (altura do poste), como ilustra a figura 2.5.

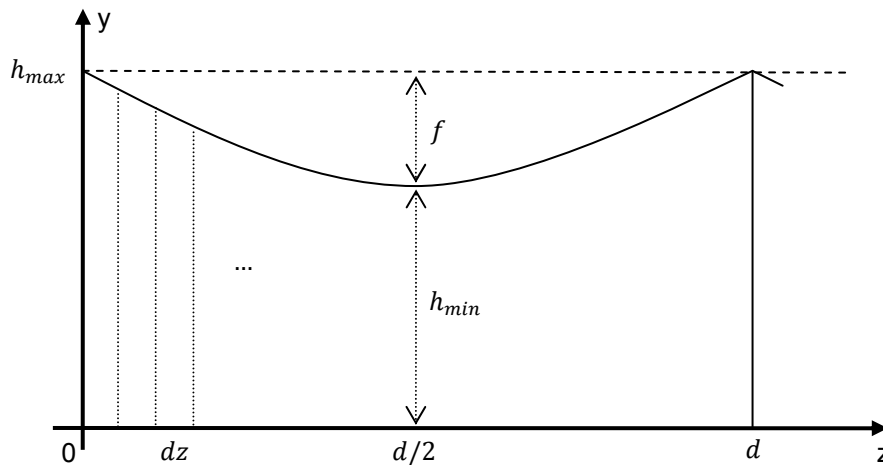


Figura 2.5 Variação da altura ao longo de um vão. Parâmetros da catenária.

Assim, no cálculo da matriz de impedâncias longitudinais Z , vamos ter em conta a variação da altura da linha ao longo de z . A expressão que nos dá a altura de cada condutor ao longo de z é [AMIRI06]:

$$y_k(z) = h_{min} + f \left(\frac{2z_i - d}{d} \right)^2 \quad (2.31)$$

em que os dois postes que delimitam o vão estão colocados em $z = 0$ e $z = d$, (ver figura 2.5), com

$$z_i = (i - 1)dz, \quad i = 1, \dots, N \quad (2.32)$$

Devido à flecha, iremos ter um novo comprimento dos condutores l' , que irá influenciar a matriz de correcções devidas ao efeito pelicular Z_c :

$$l' = n_v d \left(1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{d} \right)^2 \right) \quad (2.33)$$

onde n_v é o número de vãos em estudo.

3. Cálculo do campo electromagnético originado por linhas de transmissão de energia

Neste trabalho vamos estudar o campo a 50Hz, ou seja em regime quasi-estacionário, portanto o cálculo do campo eléctrico e magnético pode ser feito de forma independente.

3.1 Cálculo do campo magnético

Uma primeira abordagem ao cálculo do campo magnético leva-nos à Lei de Ampère. Esta diz-nos que, uma corrente I_k no ponto (x_k, y_k) origina um campo magnético no ponto P (x_p, y_p) com uma intensidade:

$$|\vec{H}_{kP}| = \frac{I_k}{2\pi d_{kP}} \quad [A/m] \quad (3.1)$$

O campo magnético originado por uma linha de transmissão de energia, está assim relacionado com a corrente eléctrica nos condutores. O vector \vec{H}_{kP} tem direcção perpendicular a \vec{d}_{kP} , como ilustra a *figura 3.1*. O módulo do vector do campo magnético \vec{H}_{kP} , varia sinusoidalmente no tempo, de acordo com a corrente I_k .

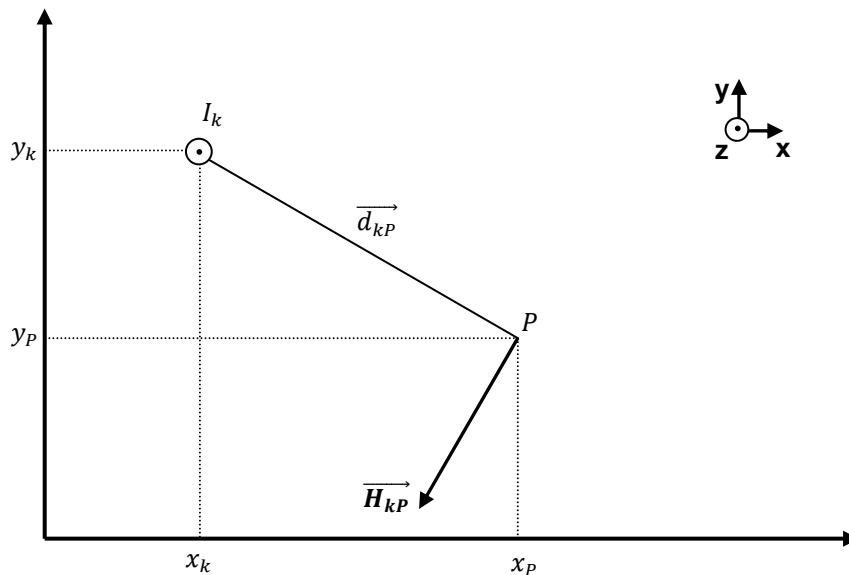


Figura 3.1 Representação da Lei de Ampère.

O cálculo do campo magnético implica a determinação das correntes em todos os condutores da linha, incluindo cabos de guarda e malha de mitigação (caso exista), bem como a repartição de correntes nos subcondutores que constituem as fases.

A amplitude complexa do campo de indução magnética \vec{B} , no espaço circundante de uma linha de transmissão aérea, é o somatório das contribuições de todos os condutores:

$$\vec{B} = \vec{B}_F + \vec{B}_G + \vec{B}_L \quad (3.2)$$

em que \vec{B}_F diz respeito às fases, \vec{B}_G aos cabos de guarda e \vec{B}_L à malha de mitigação.

Para o âmbito deste trabalho interessa-nos o cálculo do campo magnético no ponto onde este alcança o seu valor máximo, susceptível de causar efeitos na saúde pública. Assim vamos ilustrar o cálculo do campo magnético no ponto (x_p, y_p) originado por um condutor genérico (*figura 3.2*), em que:

$$\vec{r}_{kP} = (x_p - x_k)\vec{u}_x + (y_p - y_k)\vec{u}_y \Rightarrow r_{kP}^2 = (x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2 \quad (3.3)$$

$$\vec{r}'_{kP} = (x_p - x_k)\vec{u}_x + (y_p - \overline{y}'_k)\vec{u}_y \Rightarrow r'_{kP}{}^2 = (x_p - x_k)^2 + (y_p - \overline{y}'_k)^2 \quad (3.4)$$

$$\overline{y}'_k = -y_k - 2\overline{p} \quad (3.5)$$

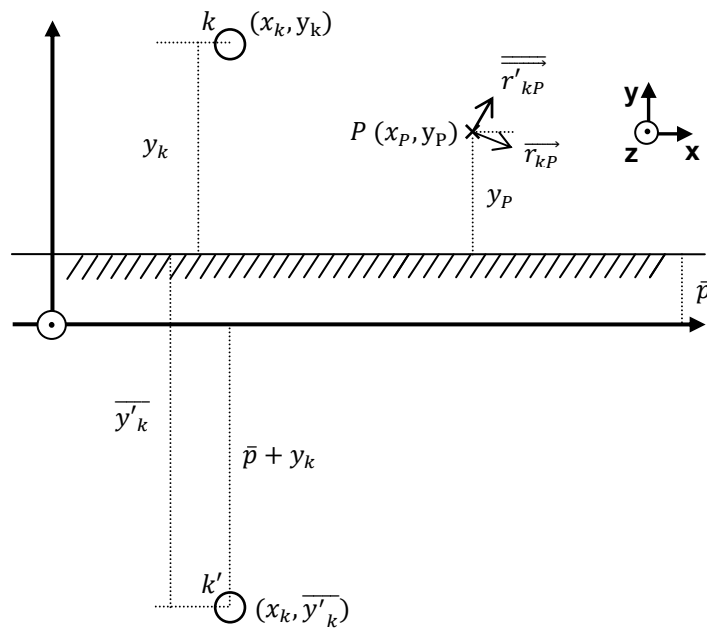


Figura 3.2 Especificação das coordenadas necessárias ao método de cálculo do campo magnético originado pelo condutor k no ponto P .

Assim, as correntes nos condutores k e k' (imagem de k), irão contribuir para o campo magnético no ponto P de coordenadas (x_p, y_p) através de:

$$\vec{H}_{kP} = \frac{\vec{I}_k \times \vec{r}_{kP}}{2\pi r_{kP}^2} - \frac{\vec{I}_k \times \vec{r}'_{kP}}{2\pi r'_{kP}{}^2}$$

$$\vec{H}_{kP} = \left[-\frac{y_p - y_k}{2\pi r_{kP}^2} \vec{I}_k + \frac{y_p - y'_k}{2\pi r'_{kP}{}^2} \vec{I}_k \right] \vec{u}_x + \left[\frac{x_p - x_k}{2\pi r_{kP}^2} \vec{I}_k - \frac{x_p - x_k}{2\pi r'_{kP}{}^2} \vec{I}_k \right] \vec{u}_y \quad (3.6)$$

$$\vec{H}_{kP} = (H_{kxr} + jH_{kxi})\vec{u}_x + (H_{kyr} + jH_{kyi})\vec{u}_y$$

Como medida das condições de exposição humana, o valor eficaz da densidade do fluxo magnético é acordado como padrão na literatura [CELO02]. Este valor é o que temos que ter em conta para comparar com os limites de referencia. Assim, para n_c condutores o valor eficaz do campo é dado por:

$$H_{ef} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kxr} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kxi} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kyr} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kyi} \right)^2} \quad (3.7)$$

O vector da densidade do fluxo magnético ou indução magnética \vec{B} , em função da intensidade do campo magnético \vec{H} é dado por:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3.8)$$

A componente z tem aqui especial importância, uma vez que devido ao facto de a linha descrever uma catenária, como foi descrito anteriormente (*figura 2.5*, eq. 2.31), a coordenada y dos condutores aéreos são funções de z . Assim sendo, para além de x_p e y_p , tem que ser especificada também a coordenada z_p .

Cálculo de todas as correntes do sistema:

Como foi mencionado, o conhecimento de todas as correntes (módulo e argumento) é um pré-requisito para o cálculo do campo magnético. Esta não é, no entanto, uma tarefa simples. Enquanto que a tensão da linha é conhecida com relativa precisão sem grandes variações ao longo do tempo, a corrente varia de forma considerável. Uma das razões para que isto suceda é a variação das exigências de energia eléctrica (aproximadamente proporcionais à corrente) que descreve ciclos diários e anuais. A variação diária ocorre conforme os padrões de actividade profissional e doméstica na área geográfica servida pela linha em causa. As variações anuais, seguem as alterações climáticas de que dependem as necessidades de aquecimento, ar condicionado, bem como a actividade cerâmica [OLSEN93a]. Tendo em conta esta imprevisibilidade dos valores instantâneos da corrente, o valor do campo magnético também irá variar ao longo do tempo. Não é assim possível usar um valor rigoroso para caracterizar o campo magnético da linha, com base numa determinada medição, pois esse valor vai ser diferente pouco tempo depois. Assim, o cálculo das correntes vai ser baseado nas “condições normais de funcionamento”. Para as correntes nas fases, temos:

$$I_f = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

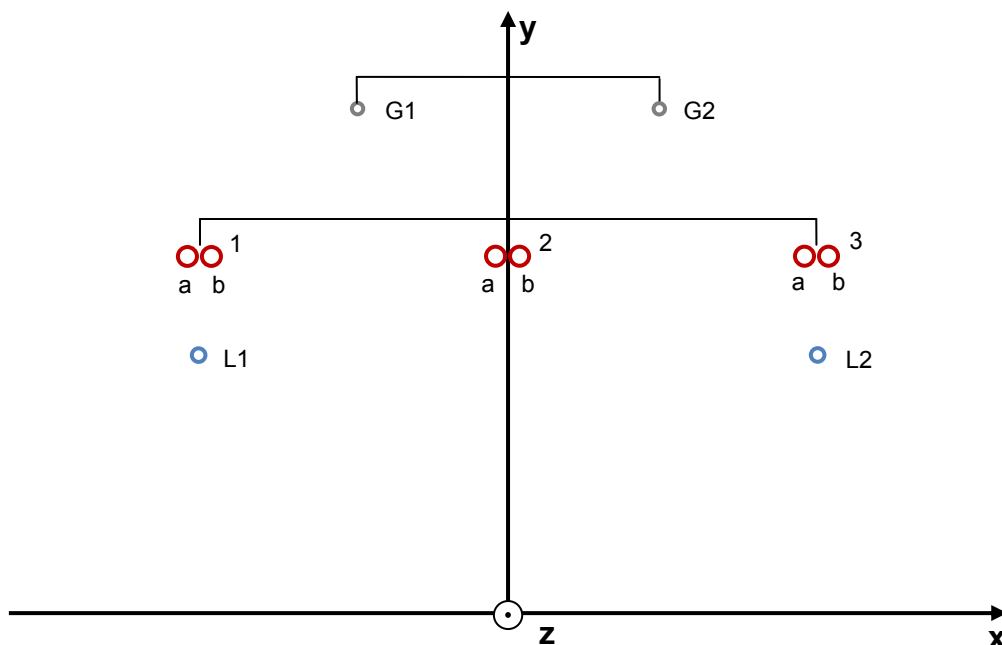


Figura 3.3 Geometria de uma linha de 400kV em esteira, com malha de mitigação presente

Tendo em conta as equações da linha, no domínio da frequência (2.12), vamos considerar os vectores \mathbf{V} e \mathbf{I} , que contêm, respectivamente, todas as tensões e correntes dos condutores da linha (figura 3.3):

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_G \\ V_L \end{bmatrix}; \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_G \\ I_L \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde os índices 1 a 3 representam os condutores de fase, o índice G representa os condutores de guarda e L os condutores da malha de mitigação. As correntes nas guardas, nos condutores de mitigação e nos sub-condutores de fase quando existem, são calculados com base nos valores pré-definidos para as correntes em (3.9). Para o cálculo das correntes é importante então destacar alguns aspectos:

- Para a frequência industrial de 50 Hz (comprimento de onda $\lambda = 6000 \text{ km}$), os efeitos de propagação de onda são insignificantes, uma vez que o comprimento da secção da linha em estudo é muito pequeno comparado com λ .
- Todas as correntes do sistema não dependem de z , ou seja, as correntes transversais de deslocamento entre condutores são desprezáveis. Isto equivale a igualar a zero a primeira equação de (2.12). Consideramos assim que, os campos eléctrico e magnético são transversais [BORGES95]. Esta é uma condição fundamental para a definição rigorosa da tensão v e corrente i numa secção da linha. A transversalidade dos campos é inteiramente compatível com as condições fronteira impostas por condutores perfeitos.

Conclui-se assim que para efeitos de cálculo do campo magnético, apenas a segunda equação de (2.12) é relevante, passando-se o contrário para o cálculo do campo eléctrico. A separação entre os efeitos eléctricos e magnéticos é uma aproximação adequada para regimes quasi-estacionários (50Hz), onde os fenómenos de propagação de onda são insignificantes.

- No caso de existir malha de mitigação, esta deve ter o comprimento equivalente a alguns vãos da linha. A malha de mitigação é uma malha fechada e pode ter ou não um condensador em série de impedância Z_C . Em (3.10) a matriz \mathbf{I}_L tem a seguinte forma:

$$\mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \end{bmatrix} = \mathbf{I}_L \mathbf{S}^T; \quad \mathbf{S} = [1 \ -1] \quad (3.11)$$

- O cabos de guarda são atravessados por um fluxo magnético não nulo, variante no tempo causado por todas as correntes do sistema. Assim, vamos ter $I_{G1} \neq I_{G2}$.
- Pela mesma razão, as correntes nos sub-condutores de fase vão ser diferentes ($I_a \neq I_b$).

Consideremos então o caso em que temos a malha de mitigação presente, e de comprimento l . Vamos analisar o troço da linha com extremidade próxima em $z = 0$ e extremidade distante em $z = l$. (em que l é um múltiplo do vão da linha d).

Calculando o integral de (2.12) entre $z = 0$ e $z = l$, ficamos com:

$$\mathbf{V}(l) - \mathbf{V}(0) = - \left(\int_{z=0}^{z=l} \bar{\mathbf{Z}}'(z) dz \right) \bar{\mathbf{I}} \quad (3.12)$$

em que $\bar{\mathbf{Z}}'$ é a impedância por unidade de comprimento ($\bar{\mathbf{Z}} = \bar{\mathbf{Z}}'d$), e $\bar{\mathbf{I}}$ assume-se constante ao longo de z (ausência dos efeitos de propagação de onda). Para o caso da linha representada na *figura 3.3*, desdobrando as submatrizes das tensões e correntes em (3.10), ficamos com os elementos relativos aos subcondutores de fase:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= \begin{bmatrix} V_{1a} \\ V_{1b} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} V_{2a} \\ V_{2b} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_3 = \begin{bmatrix} V_{3a} \\ V_{3b} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_G = \begin{bmatrix} V_{G1} \\ V_{G2} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} V_{L1} \\ V_{L2} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{I}_1 &= \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} I_{2a} \\ I_{2b} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_3 = \begin{bmatrix} I_{3a} \\ I_{3b} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_G = \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_L = \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

A equação em (3.12) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_G \\ \Delta V_L \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{11} & \mathbf{Z}_{12} & \mathbf{Z}_{13} & \mathbf{Z}_{1G} & \mathbf{Z}_{1L} \\ \mathbf{Z}_{21} & \mathbf{Z}_{22} & \mathbf{Z}_{23} & \mathbf{Z}_{2G} & \mathbf{Z}_{2L} \\ \mathbf{Z}_{31} & \mathbf{Z}_{32} & \mathbf{Z}_{33} & \mathbf{Z}_{3G} & \mathbf{Z}_{3L} \\ \mathbf{Z}_{G1} & \mathbf{Z}_{G2} & \mathbf{Z}_{G3} & \mathbf{Z}_{GG} & \mathbf{Z}_{GL} \\ \mathbf{Z}_{L1} & \mathbf{Z}_{L2} & \mathbf{Z}_{L3} & \mathbf{Z}_{LG} & \mathbf{Z}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_G \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{FF} & \mathbf{Z}_{FG} & \mathbf{Z}_{FL} \\ \mathbf{Z}_{GF} & \mathbf{Z}_{GG} & \mathbf{Z}_{GL} \\ \mathbf{Z}_{LF} & \mathbf{Z}_{LG} & \mathbf{Z}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_F \\ \mathbf{I}_G \\ \mathbf{I}_L \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Para o cálculo da impedância \mathbf{Z} , é usado um método que consiste em subdividir o trecho da linha em análise, num elevado número de pequenos segmentos uniformes, de comprimento Δl [BRAND06]. Assim, se cada vão estiver dividido em n_s segmentos, sendo l o trecho da linha em análise ($l = n_s d$), a matriz \mathbf{Z} é determinada da seguinte forma:

$$\mathbf{Z} = n_v \sum_{i=1}^{n_s} \mathbf{Z}'(z_i) \Delta l \quad (3.14)$$

em que $z_i = (i - 1)\Delta l$, com $i = 1, \dots, n_s$. O campo magnético produzido por cada elemento é calculado e somado vectorialmente ao resultado de todos os elementos.

Tendo em conta que os subcondutores de cada fase estão ligados um ao outro, e que os cabos de guarda estão ligados à terra (desprezando a resistência do poste), podemos afirmar que:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{ia}(0) = \mathbf{V}_{ib}(0) \\ \mathbf{V}_{ia}(l) = \mathbf{V}_{ib}(l) \\ \Delta V_G = 0 \\ \mathbf{I}_{ia} + \mathbf{I}_{ib} = \mathbf{I}_i \end{cases} \quad (3.15)$$

No que diz respeito à queda de tensão na malha de mitigação ΔV_L , analisando a *figura 3.4*, podemos concluir:

$$\begin{cases} V_{L1}(0) - V_{L2}(0) = -Z_C I \\ V_{L1}(l) = V_{L2}(l) \\ I_{L1} = -I_{L2} \end{cases} \quad (3.16)$$

onde Z_C é impedância do condensador em série incluído na malha de mitigação, dada por:

$$Z_C = jX_S = \frac{1}{j\omega C_S} \quad (3.17)$$

Se a malha estiver em curto-circuito, fica $Z_C = 0$. No caso de não termos malha de mitigação presente na geometria da linha, $I_L = 0$, e $Z_C = \infty$.

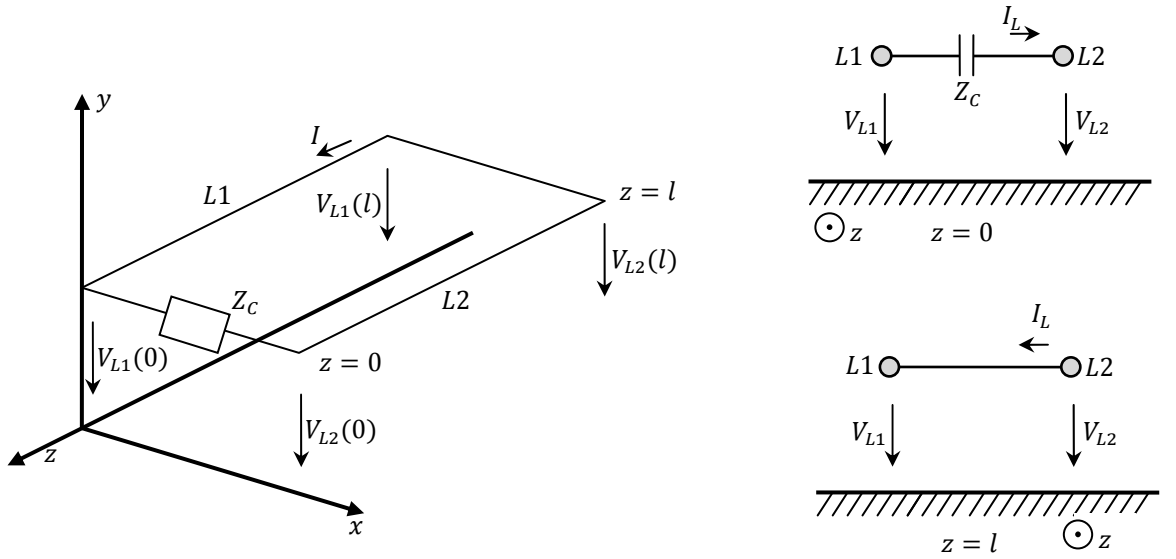


Figura 3.4 Representação geométrica das extremidades próxima e distante da malha de mitigação.

Estamos assim em condições de calcular todas as correntes do sistema a partir das considerações anteriores. Assim, a partir de (3.13) pudemos determinar, I_L , I_G e o vector das correntes nas fases geminadas I_f . Sendo $\Delta V_G = 0$ em (3.13), ficamos com:

$$I_G = Z_{GG}^{-1}(-Z_{GF}I_F - Z_{GL}I_L) \quad (3.18)$$

$$I_L = -\underbrace{S^T Y S Z_{LF}}_{K_{LF}} I_F - \underbrace{S^T Y S Z_{LG}}_{K_{LG}} I_G \quad (3.19)$$

em que:

$$Y = \frac{1}{(Z_C + S Z_{LL} S^T)} \quad (3.20)$$

Substituindo (3.18) em (3.19):

$$\mathbf{I}_L = -\boldsymbol{\alpha}\mathbf{K}_{LF}\mathbf{I}_F + \boldsymbol{\alpha}\mathbf{K}_{LG}\mathbf{Z}_{GG}^{-1}\mathbf{Z}_{GF}\mathbf{I}_F \quad (3.21)$$

com:

$$\boldsymbol{\alpha} = (\mathbf{I}_{id} - \mathbf{K}_{LG}\mathbf{Z}_{GG}^{-1}\mathbf{Z}_{GL})^{-1} \quad (3.22)$$

De (3.13) retiramos:

$$\Delta\mathbf{V}_F = -(\mathbf{Z}_{FF}\mathbf{I}_F + \mathbf{Z}_{FG}\mathbf{I}_G + \mathbf{Z}_{FL}\mathbf{I}_L)$$

Substituindo pelas expressões em (3.18) e (3.21), ficamos com:

$$\begin{bmatrix} V_{1a}(l) - V_{1a}(0) \\ V_{1b}(l) - V_{1b}(0) \\ V_{2a}(l) - V_{2a}(0) \\ V_{2b}(l) - V_{2b}(0) \\ V_{3a}(l) - V_{3a}(0) \\ V_{3b}(l) - V_{3b}(0) \end{bmatrix} = -[\mathbf{Z}_{eq}] \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{3a} \\ I_{3b} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Em que:

$$\mathbf{Z}_{eq} = -\mathbf{Z}_{FF} + \mathbf{Z}_{FG}\mathbf{Z}_{GG}^{-1}(\mathbf{Z}_{GF} - \mathbf{Z}_{GL}\boldsymbol{\alpha}\mathbf{K}_{LF} + \mathbf{Z}_{GL}\boldsymbol{\alpha}\mathbf{K}_{LG}\mathbf{Z}_{GG}^{-1}\mathbf{Z}_{GF}) + \mathbf{Z}_{FL}\boldsymbol{\alpha}(\mathbf{K}_{LF} - \mathbf{K}_{LG}\mathbf{Z}_{GG}^{-1}\mathbf{Z}_{GF}) \quad (3.24)$$

Reescrevendo (3.23):

$$\begin{bmatrix} V_{1a}(l) - V_{1a}(0) \\ V_{1b}(l) - V_{1b}(0) \\ V_{2a}(l) - V_{2a}(0) \\ V_{2b}(l) - V_{2b}(0) \\ V_{3a}(l) - V_{3a}(0) \\ V_{3b}(l) - V_{3b}(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} & Z_{eq12} & Z_{eq13} & Z_{eq14} & Z_{eq15} & Z_{eq16} \\ Z_{eq21} & Z_{eq22} & Z_{eq23} & Z_{eq24} & Z_{eq25} & Z_{eq26} \\ Z_{eq31} & Z_{eq32} & Z_{eq33} & Z_{eq34} & Z_{eq35} & Z_{eq36} \\ Z_{eq41} & Z_{eq42} & Z_{eq43} & Z_{eq44} & Z_{eq45} & Z_{eq46} \\ Z_{eq51} & Z_{eq52} & Z_{eq53} & Z_{eq54} & Z_{eq55} & Z_{eq56} \\ Z_{eq61} & Z_{eq62} & Z_{eq63} & Z_{eq64} & Z_{eq65} & Z_{eq66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{3a} \\ I_{3b} \end{bmatrix}$$

Multiplicando (3.23) por \mathbf{S}_1 , em que,

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

obtêm-se,

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{eq11} - Z_{eq21} & Z_{eq12} - Z_{eq22} & Z_{eq13} - Z_{eq23} \\ Z_{eq31} - Z_{eq41} & Z_{eq32} - Z_{eq42} & Z_{eq33} - Z_{eq43} \dots \\ Z_{eq51} - Z_{eq61} & Z_{eq52} - Z_{eq62} & Z_{eq53} - Z_{eq63} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\begin{matrix} Z_{eq14} - Z_{eq24} & Z_{eq15} - Z_{eq25} & Z_{eq16} - Z_{eq26} \\ \dots Z_{eq34} - Z_{eq44} & Z_{eq35} - Z_{eq45} & Z_{eq36} - Z_{eq46} \\ Z_{eq54} - Z_{eq64} & Z_{eq55} - Z_{eq65} & Z_{eq56} - Z_{eq66} \end{matrix} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{2a} \\ I_{2b} \\ I_{3a} \\ I_{3b} \end{bmatrix}$$

Ficamos assim com um sistema de 3 equações a 6 incógnitas. De relembrar, no entanto, que recorrendo à 4ª equação de (3.15), obtemos as restantes 3 equações que nos permitem resolver o sistema:

$$\begin{cases} I_{1a} + I_{1b} = I_1 \\ I_{2a} + I_{2b} = I_2 \\ I_{3a} + I_{3b} = I_3 \end{cases}$$

em que I_1 , I_2 e I_3 são os valores conhecidos para as correntes em cada uma das fases. Recorrendo ao Matlab, resolvemos assim o sistema de 6 equações a 6 incógnitas, obtendo assim as correntes nas fases geminadas. A partir destas, calculamos as correntes na malha de mitigação e de seguida nas guardas.

3.2 Cálculo do campo eléctrico

Neste trabalho, vamos considerar o cálculo do campo eléctrico de uma forma aproximada admitindo que o campo resulta de cargas filiformes colocadas a uma distância fixa do solo, correspondente à altura média dos condutores ao solo.

O vector campo eléctrico define-se pelas suas componentes no espaço ao longo dos três eixos ortogonais. Cada componente no espaço pode ser expressa pelo valor eficaz e direcção:

$$\vec{E} = e_x(t)\vec{u}_x + e_y(t)\vec{u}_y \quad (3.33)$$

onde \vec{u}_x e \vec{u}_y são os vectores directores ao longo de x e y respectivamente, e $e_x(t)$ e $e_y(t)$ são funções do tempo.

Para o cálculo do campo eléctrico o procedimento adoptado é semelhante ao campo magnético. O campo eléctrico na proximidade das linhas de transmissão é calculado assumindo que não existe carga em espaço livre [GEC82]. A terra assume-se como condutora perfeita, uma vez que o tempo necessário para que as cargas se redistribuam na superfície da terra, quando o campo aplicado se altera, é muito pequeno (0.1 a 100 ns) comparado com o período de frequência.

Nos condutores as cargas q , são determinadas a partir das tensões e dos coeficientes de potencial de Maxwell [GEC82]:

$$\mathbf{q} = \mathbf{P}^{-1}\mathbf{V} \quad (3.34)$$

onde \mathbf{P} é a matriz de coeficientes de potencial ((2.17) e (2.20)), sendo $\mathbf{P}^{-1} = \mathbf{C}$ [BORGES95], \mathbf{q} é o vector coluna das cargas e \mathbf{V} o vector das tensões de cada condutor. As tensões nas fases são especificadas, no entanto, as tensões nos restantes condutores, são, à partida, desconhecidas. Para as tensões nas guardas, tendo em conta que os cabos estão ligados ao poste, e desprezando a resistência deste como já vimos anteriormente, ficamos com $\Delta V_G = 0$. Desdobrando (3.34), ficamos com:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{q}_3 \\ \mathbf{q}_G \\ \mathbf{q}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} & \mathbf{C}_{13} & \mathbf{C}_{1G} & \mathbf{C}_{1L} \\ \mathbf{C}_{21} & \mathbf{C}_{22} & \mathbf{C}_{23} & \mathbf{C}_{2G} & \mathbf{C}_{2L} \\ \mathbf{C}_{31} & \mathbf{C}_{32} & \mathbf{C}_{33} & \mathbf{C}_{3G} & \mathbf{C}_{3L} \\ \mathbf{C}_{G1} & \mathbf{C}_{G2} & \mathbf{C}_{G3} & \mathbf{C}_{GG} & \mathbf{C}_{GL} \\ \mathbf{C}_{L1} & \mathbf{C}_{L2} & \mathbf{C}_{L3} & \mathbf{C}_{LG} & \mathbf{C}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \mathbf{V}_3 \\ \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{FF} & \mathbf{C}_{FG} & \mathbf{C}_{FL} \\ \mathbf{C}_{GF} & \mathbf{C}_{GG} & \mathbf{C}_{GL} \\ \mathbf{C}_{LF} & \mathbf{C}_{LG} & \mathbf{C}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_F \\ \mathbf{V}_G \\ \mathbf{V}_L \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Considerando a impedância Z_C da malha de mitigação, sabemos que:

$$\Delta \mathbf{V}_L = \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{V}_{L1} \\ \Delta \mathbf{V}_{L2} \end{bmatrix}; \mathbf{V}_{L2}(0) = \mathbf{V}_{L1}(0) + Z_C I_L \quad (3.36)$$

Através da ultima equação de (3.35), ficamos com:

$$[1 \ 1] \begin{bmatrix} \mathbf{q}_{L1} \\ \mathbf{q}_{L2} \end{bmatrix} = [1 \ 1][\mathbf{C}_{LF}][\mathbf{V}_F] + [1 \ 1][\mathbf{C}_{LL}] \left(\begin{bmatrix} 0 \\ Z_C I_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \mathbf{V}_{L1} \right) \quad (3.37)$$

$$\mathbf{V}_{L1} = -[1 \ 1][\mathbf{C}_{LL}] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}^{-1} \left([1 \ 1][\mathbf{C}_{LF}][\mathbf{V}_F] + [1 \ 1][\mathbf{C}_{LL}] \begin{bmatrix} 0 \\ Z_C I_L \end{bmatrix} \right) \quad (3.38)$$

Ficamos assim com o valor de todas as tensões conhecidas para resolver o sistema em (3.36).

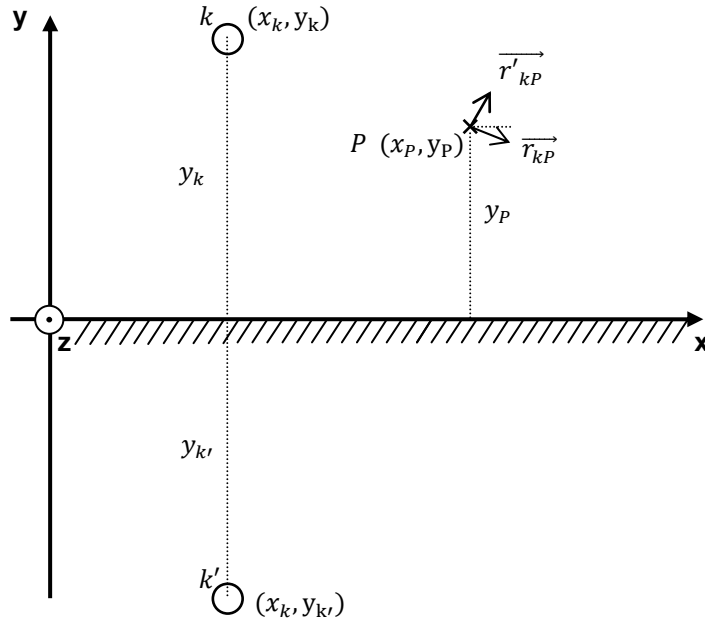


Figura 3.5 Especificação das coordenadas necessárias ao método de cálculo do campo eléctrico originado pelo condutor k no ponto P .

Resolvendo (3.35) e uma vez conhecida a carga em cada condutor, o campo eléctrico no ponto $P(x_P, y_P)$, devido às cargas situadas em k e k' (imagem de k) é dado por (figura 3.5):

$$\vec{E}_{kP} = \frac{\bar{q}_k}{2\pi \varepsilon_0 r_{kP}} \vec{u}_k - \frac{\bar{q}_k}{2\pi \varepsilon_0 r'_{k'P}} \vec{u}_{k'} \quad (3.39)$$

com r_{kP} dado por (3.3) e $r'_{k'P}$ por (3.40):

$$r'_{k'P} = \sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P - y'_{k'})^2} \quad (3.40)$$

Os vectores \vec{u}_k e $\vec{u}_{k'}$ são assim:

$$\vec{u}_k = \frac{x_P - x_k}{\sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P - y_k)^2}} \vec{u}_x + \frac{y_P - y_k}{\sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P - y_k)^2}} \vec{u}_y \quad (3.41)$$

$$\vec{u}_{k'} = \frac{x_P - x_k}{\sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P - y_{k'})^2}} \vec{u}_x + \frac{y_P - y_{k'}}{\sqrt{(x_P - x_k)^2 + (y_P - y_{k'})^2}} \vec{u}_y \quad (3.42)$$

Desenvolvendo (3.39), ficamos com:

$$\vec{\bar{E}}_{kP} = \frac{\bar{q}_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{x_P - x_k}{r_{kP}^2} - \frac{x_P - x_{k'}}{r_{k'P}^2} \right] \vec{u}_x + \frac{\bar{q}_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{y_P - y_k}{r_{kP}^2} - \frac{y_P - y_{k'}}{r_{k'P}^2} \right] \vec{u}_y \quad (3.43)$$

$$\vec{\bar{E}}_{kP} = (E_{kxr} + jE_{kxi})\vec{u}_x + (E_{kyr} + jE_{kyi})\vec{u}_y \quad (3.44)$$

De forma análoga ao campo magnético, para n_c condutores o valor eficaz do campo é dado por:

$$E_{ef} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n_c} E_{kxr} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} E_{kxi} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} E_{kyr} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} E_{kyi} \right)^2} \quad (3.45)$$

4. Resultados de simulação

Neste capítulo vamos usar o programa desenvolvido para o cálculo do campo magnético e eléctrico no estudo de diversas configurações de linha, fazendo uso da malha de mitigação (em curto-circuito ou com condensador em série) como solução para redução do campo.

Primeiro vamos estudar a linha de circuito simples em esteira (caso base), verificando a influência da malha de mitigação em curto-circuito e com condensador em série. Posteriormente estudaremos a influência da geometria da linha no campo, bem como o estudo de linhas de circuito duplo.

4.1 Campo Magnético

Tendo em vista a consolidação de um roteiro de implementação baseado na metodologia e no programa de cálculo do campo electromagnético em linhas de transmissão de energia desenvolvido neste trabalho, são aqui analisados os resultados obtidos.

4.1.1 Caso base

A *figura 4.1* ilustra uma das configurações mais usadas de uma linha de 400kV de circuito simples: a linha em esteira. Para além dos dois condutores por fase estão presentes dois condutores de guarda, considerando a não uniformidade da linha (catenária). Esta configuração vai ser usada como caso base para efeitos de comparação.

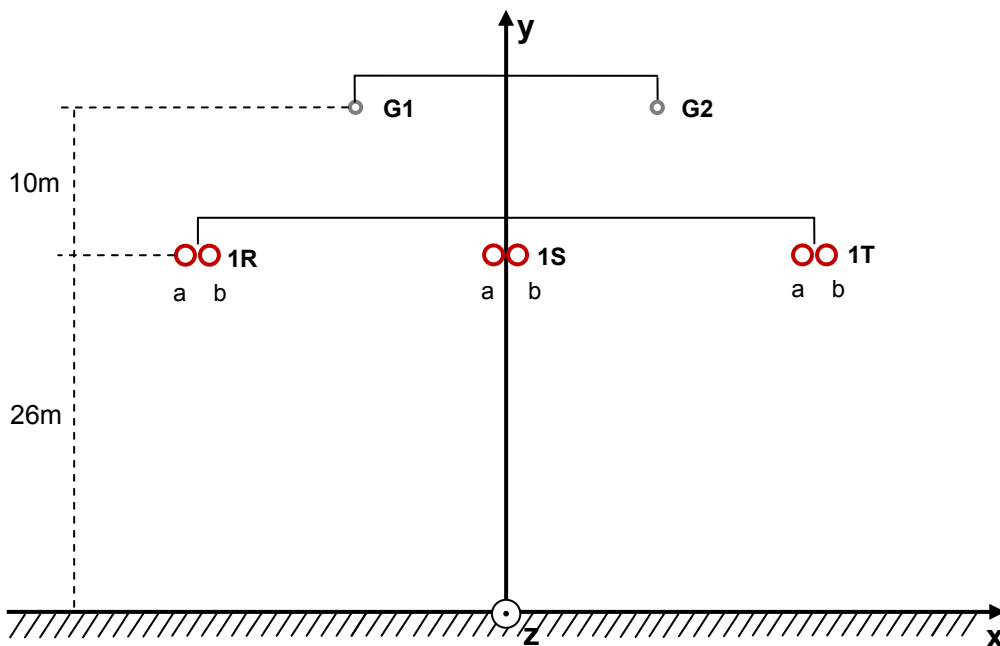


Figura 4.1 Geometria de uma linha em esteira de 400kV, vista no poste ($z=0$)

Na *tabela 4.1* estão resumidas as características dos condutores. A distância entre dois postes consecutivos (vão) é de $d = 300m$. A resistividade do solo considerada ρ é de $100 \Omega m$. Para uma linha de $400kV$, $S = 1400 MVA$, o vector das correntes nas fases I_f é definido pelas correntes sinusoidais a $50Hz$, com $2kA$ de valor eficaz e desfasadas de 120° :

$$I_f = \begin{bmatrix} I_{1R} \\ I_{1S} \\ I_{1T} \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot 2 \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-\frac{2\pi}{3}} \\ e^{+\frac{j2\pi}{3}} \end{bmatrix} kA \quad (4.1)$$

Nº Conductor	Diâmetro (mm)	Coordenada X no poste (m)	Coordenada Y no poste (m)	Flecha (m)	Resistência Linear a 20°C (mΩ/km)
1R-a	31.8	-12.2	26	12	57.3
1R-b	31.8	-11.8	26	12	57.3
1S-a	31.8	-0.2	26	12	57.3
1S-b	31.8	0.2	26	12	57.3
1T-a	31.8	11.8	26	12	57.3
1T-b	31.8	12.2	26	12	57.3
G1	14.6	-8	36	9	372
G2	14.6	8	36	9	372

Tabela 4.1 Características de todos os condutores da linha.

Tendo como ponto de observação do campo, o ponto correspondente à posição do cérebro humano, de coordenadas $x_p = 0$ e $y_p = 1.8m$, obtemos para a intensidade do campo magnético:

$$H = 25.6 A/m \quad (4.2)$$

a que corresponde um campo de indução magnética de:

$$B_{std} = 32.16 \mu T \quad (4.3)$$

De modo a demonstrar as diferenças obtidas com a linha não uniforme e a linha com altura média, vamos comparar as duas situações. A altura média do condutor k define-se da seguinte forma:

$$y_k = \frac{(h_k)_{max} + 2(h_k)_{min}}{3} \quad (4.4)$$

Assim usando os valores da flecha da *tabela 4.1*, ficamos com os condutores de fase colocados a uma altura média $h_{m_Fases} = 18m$ e os cabos de guarda em $h_{m_Guardas} = 30m$. Para o mesmo ponto de observação obtemos agora:

$$H = 17.4 A/m \quad (4.5)$$

a que corresponde um campo de indução magnética de:

$$B = 21.85 \mu T \quad (4.6)$$

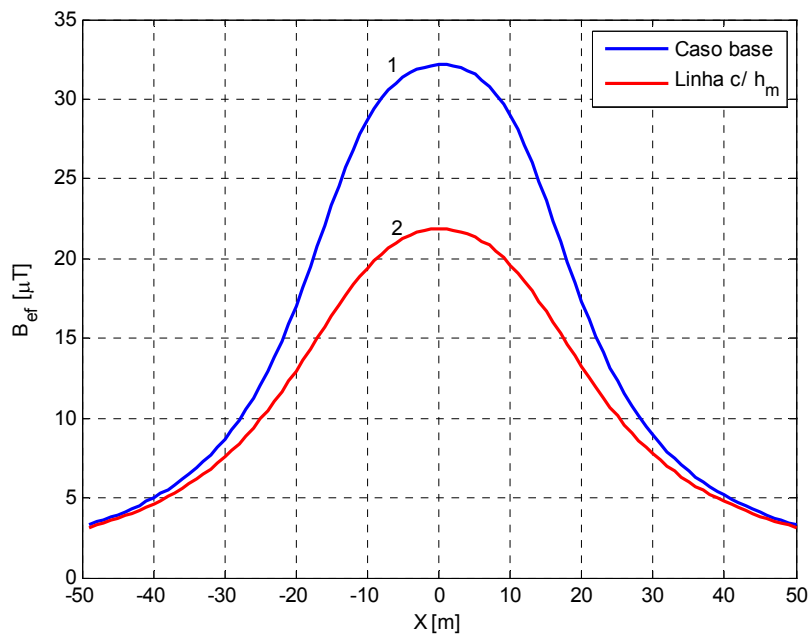


Figura 4.2 Representação transversal da variação do campo de indução magnética B , com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$). A curva 1 representa o caso base, com a linha não uniforme. A curva 2 representa a linha com altura média.

Nas *figuras 4.2 e 4.3* estão representadas as variações do campo B com as distâncias em x e z , respectivamente. É bem patente que o caso relativo à altura média se trata de uma abordagem simplista. Os valores do campo B sofrem grandes diferenças quando se faz uso da linha não uniforme. O uso da altura média faz uma estimativa do campo por defeito, o que pode desencadear futuros problemas de dimensionamento.

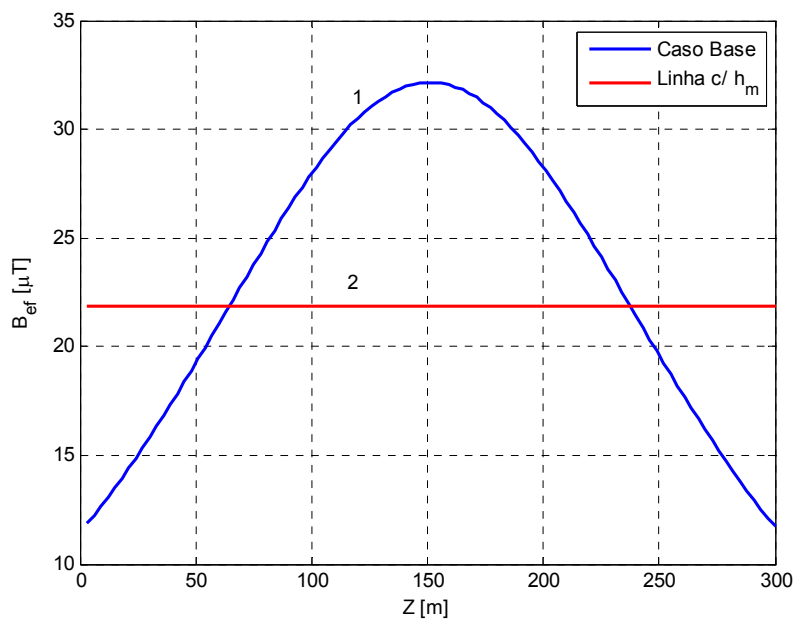


Figura 4.3 Representação transversal da variação do campo de indução magnética B , com a distância em z ($y = 1.8m, x = 0m, z \in [0m; 300m]$). A curva 1 representa o caso base, com a linha não uniforme. A curva 2 representa a linha com altura média.

4.1.2 Influência da malha de mitigação

Vamos agora introduzir a malha de mitigação no estudo e verificar o seu efeito. Na *figura 4.4* está representada a sua colocação geométrica na linha. Na *tabela 4.2* estão resumidas as características dos condutores da malha de mitigação.

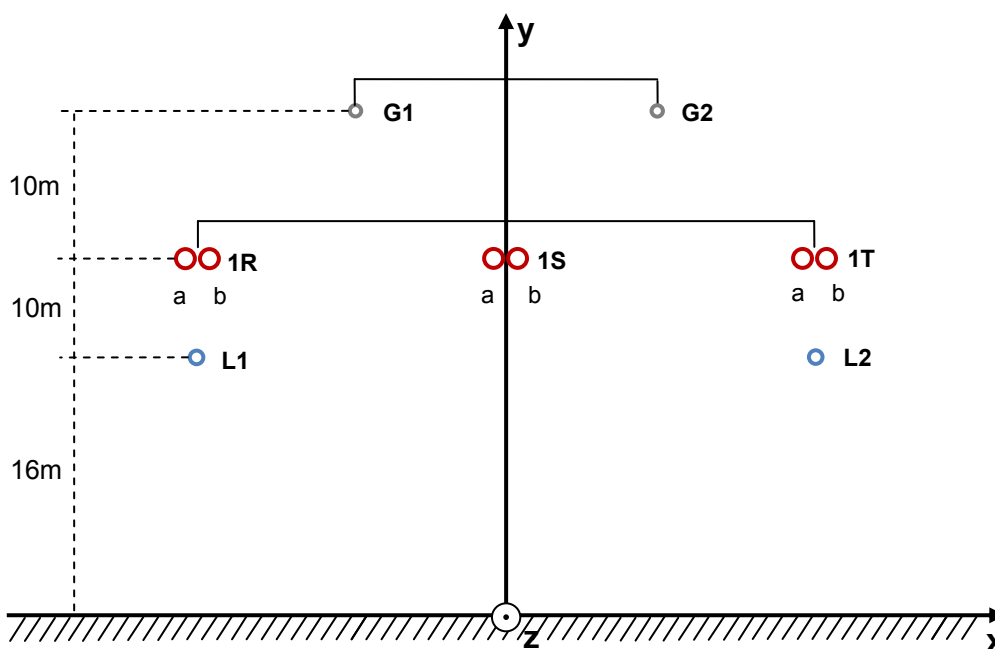


Figura 4.4 Representação geométrica da malha de mitigação na linha de 400kV em esteira ($z=0$).

Nº Conductor	Diâmetro (mm)	Coordenada X no poste (m)	Coordenada Y no poste (m)	Flecha (m)	Resistência Linear a 20°C (mΩ/km)
L1	22.4	-12	16	9	131
L2	22.4	12	16	9	131

Tabela 4.2 Características dos condutores da malha de mitigação.

Na *tabela 4.3* são apresentadas as amplitudes complexas das correntes de todos os condutores, relativos à linha representada pela *figura 4.4* e pela *tabela 4.2* considerando duas situações. Primeiro, sem malha de mitigação presente; e segundo, com malha de mitigação em curto-circuito ($Z_C = 0$).

Conductor	Amplitude complexa da corrente, sem malha de mitigação	Amplitude complexa da corrente, com malha de mitigação em CC
1Ra	994.3 - j5.6	994.8 - j5.6
1Rb	1005.7 + j5.6	1005.2 + j5.6
1Sa	-515.1 - j861.6	-513.6 - j 861.7
1Sb	-484.9 - j870.4	-486.4 - j870.4
1Ta	-502 + j873.8	-501.5 + j873.7
1Tb	-498 + j858.3	-498.5 + j858.3
G1	-104.7 + j6.9	-97.3 + j9.7
G2	108.5 + j31.9	101.1 + j29.1
L1	0	-232.4 + j65.8
L2	0	232.4 - j65.8

Tabela 4.3 Amplitudes complexas da corrente de todos os condutores, sem malha incluída e com malha em curto-circuito.

Procedendo da mesma forma obtêm-se para a situação com malha de mitigação em curto-circuito:

$$B_{rms} = 26.73 \mu T = 0.83 B_{std} \quad (4.7)$$

Em (4.7), verificamos a eficácia da técnica da malha de mitigação. Com a presença da malha, colocada a 10m dos condutores de fase obtemos uma redução de 17% no valor do campo de indução magnética no ponto em análise. Para a mesma configuração da linha, em [BRAND06], são obtidos resultados idênticos.

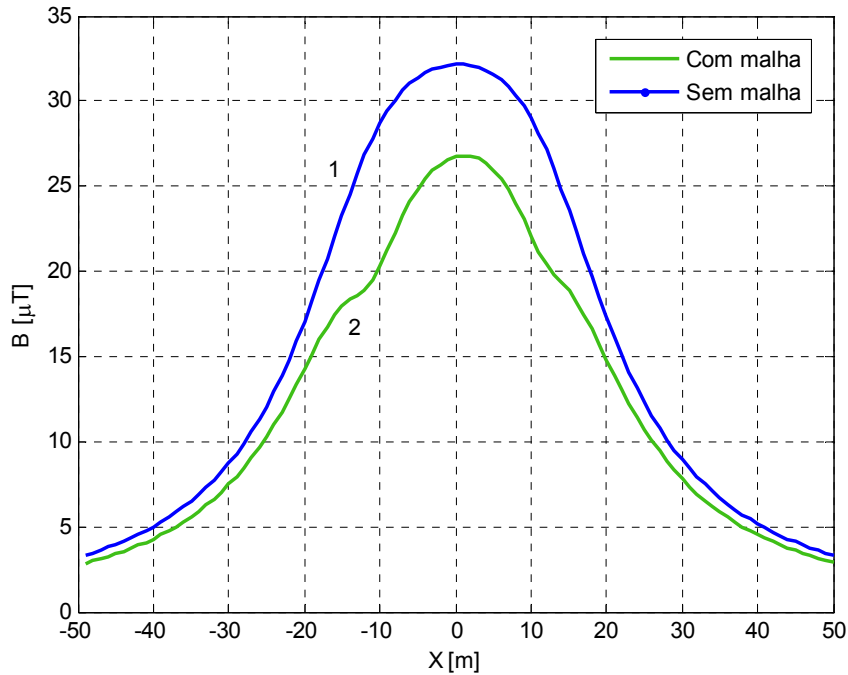


Figura 4.5 Representação transversal da variação do campo de indução magnética B , com a distância em x . ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$)

Na figura 4.5 estão representadas as curvas da variação do campo ao longo da coordenada x , considerando $y = 1.8m$ e $z = 150m$. A curva 1 (azul) corresponde à linha sem malha de mitigação e a curva 2 (verde) à situação com malha. Como se pode observar a redução do campo é notória para todos os pontos. De assinalar, que na curva relativa ao campo mitigado, verifica-se uma redução mais acentuada no condutor em $x = -12m$ do que em $x = 12m$. Isto acontece porque a corrente na malha em L1, está praticamente em oposição de fase à corrente do condutor 1. Em L2, esse fenómeno já não é tão favorecedor da redução do campo como em L1.

Se as correntes induzidas nos condutores da malha, tiverem módulo e ângulo de fase “correctos”, geram campos magnéticos que anulam parcialmente o campo originado pela linha de transmissão [SHPER96].

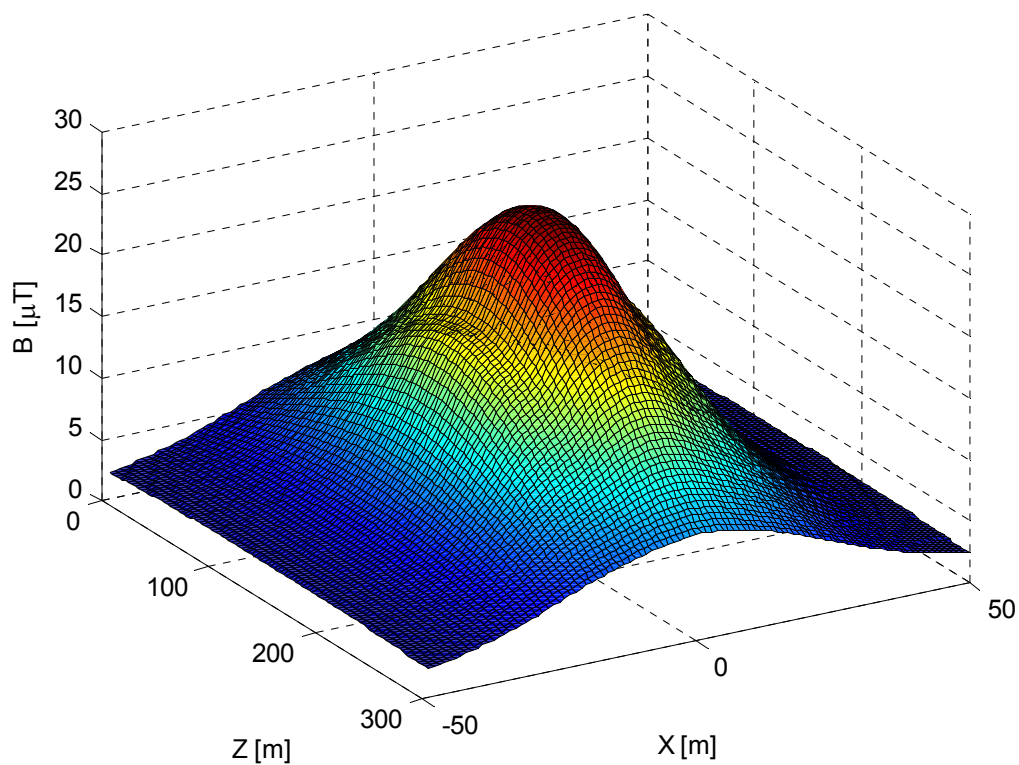


Figura 4.6 Representação da variação do campo de indução magnética B ao longo do espaço (entre dois postes consecutivos) para um $y = 1.8m$ (malha em curto-circuito).

Na *figura 4.6*, está representada a vista a 3 dimensões da variação do campo com x e z , onde pudemos verificar a influência da malha de mitigação nos valores do campo magnético originado pela linha. É também notória a variação do campo entre dois postes consecutivos, verificando-se, como seria de prever, o máximo a meio vão.

Usando a mesma altura da malha ($y = 16m$), vamos variar a distância dos condutores da malha ao eixo do poste ($x = 0m$) – *figura 4.7*.

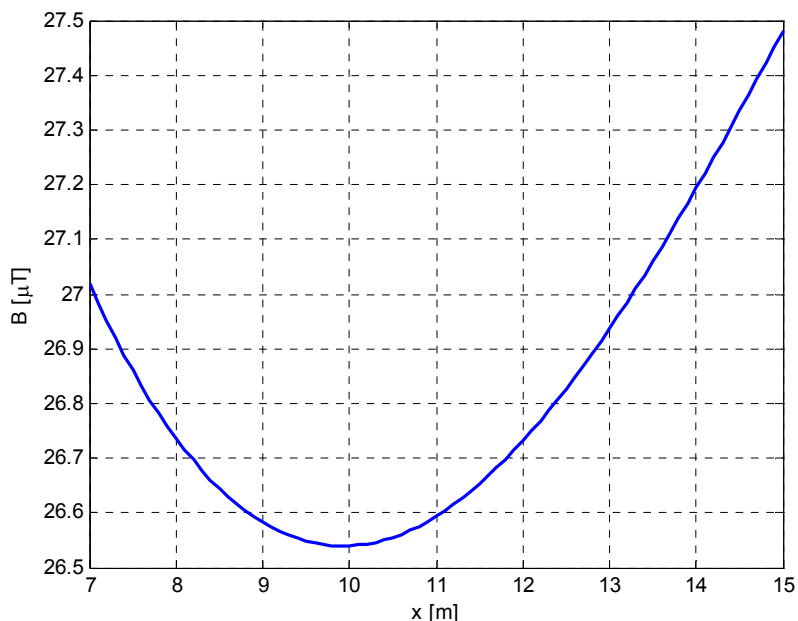


Figura 4.7 Representação da variação do campo de indução magnética B , com a posição em x do condutor L2 da malha de mitigação (mantendo a simetria em relação ao poste, $L1=-L2$).

O valor mínimo do campo é obtido com os condutores colocados a 10m do eixo do poste. Isto acontece pois os condutores de guarda localizados em $x = -8$ e $x = 8m$ induzem um campo magnético próximo do centro do poste ($x = 0m$). Aproximar os condutores da malha do centro do poste em 2m, reduz muito ligeiramente o campo no centro do corredor da linha. Como foi dito anteriormente para este estudo, interessa-nos, sobretudo, mitigar o campo localizado debaixo da linha, onde são atingidos os valores mais preocupantes. Para além disso, colocar a malha a distâncias mais afastadas do centro do poste, com vista a uma possível redução do campo para uma localização específica, iria expandir o corredor da linha (ROW), o que traria problemas, não só de estrutura (suporte), mas também legais, como foi visto anteriormente. Assim, vamos então, colocar a malha nesta nova posição (*figura 4.8*).

Assim, para a malha colocada, em $x = -10m$ e $x = 10m$ com $y = 16m$ (no poste), obtemos:

$$B_{rms} = 26.54 \mu T \quad (4.6)$$

A posição da malha, está, sujeita a restrições significativas no que diz respeito ao isolamento eléctrico. No entanto, essas limitações não influenciam de forma muito significativa, a eficácia da malha de mitigação como solução de redução do campo. Na realidade, a localização da malha passiva, em relação aos condutores de fase, determina o módulo e o ângulo de fase da corrente induzida. Consequentemente, quanto mais curta for a distância entre a malha e os condutores de fase, mais elevado será o módulo da corrente induzida. Por outro lado, variando a localização dos condutores da malha, mas mantendo a distância equivalente entre a malha e os condutores de fase, irá influenciar o ângulo de fase da corrente induzida.

Para além da localização da malha de mitigação, o seu efeito redutor do campo depende fortemente das características dos condutores, tanto da malha como dos condutores de fase. As indutâncias mútuas entre a malha e as fases, a indutância da malha e a resistência linear dos condutores que a constituem são determinantes no grau de mitigação. A variação da indutância e da resistência linear, afectam as correntes na malha de forma semelhante. A indutância pode ser compensada com uma capacidade em série, induzindo maiores correntes na malha, podendo a componente do campo magnético originado pela malha ser superior à originada pelas correntes das fases. A resistência linear dos condutores da malha afecta principalmente o ângulo de fase das correntes induzidas.

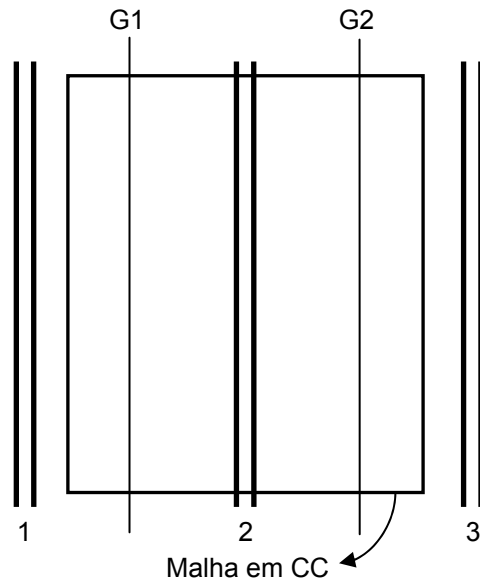


Figura 4.8 Vista aérea da configuração da linha com a malha colocada em $x_{L1} = -10m$ e $x_{L2} = 10m$.

Inserindo na malha um condensador em série escolhido adequadamente pode reduzir a intensidade do campo magnético no ponto em análise [BRAND06],[SHPER96],[MEMAR96],[WALL93]. O condensador pode ser inserido no circuito de mitigação com uma reactância negativa de modo a compensar a reactância da malha. De modo a determinar o valor ideal para a capacidade a inserir na malha, para a mesma localização da malha ($x_{L1} = -10m$; $x_{L2} = 10m$; $y = 16m$) vamos fazer variar os valores da reactância X_s no programa e analisar os resultados:

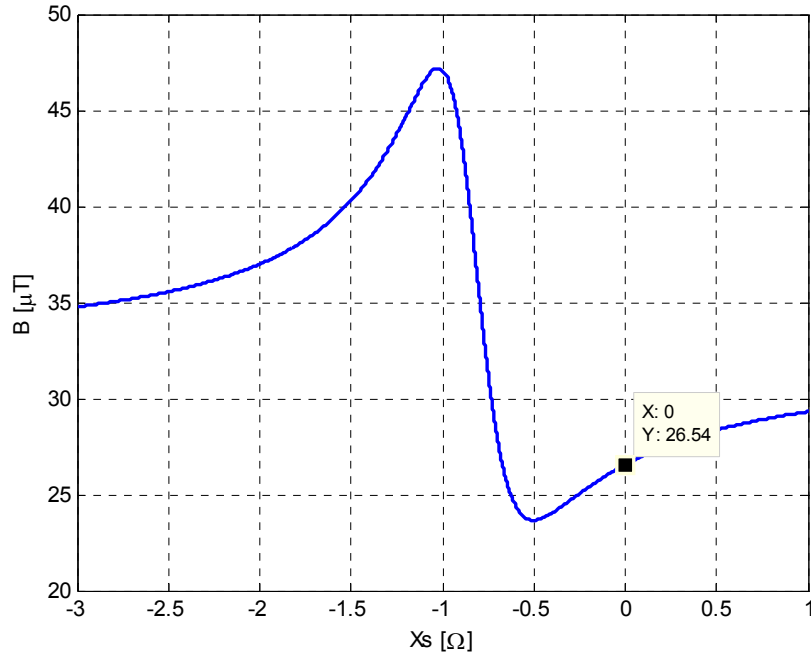


Figura 4.9 Campo de indução magnética B em função da reactância X_s do condensador inserido na malha de mitigação. O ponto assinalado corresponde à situação da malha em curto-circuito.

Na figura 4.9, considerando $Z_c = jX_s$, fazemos variar a reactância X_s entre -3 e 1Ω. Tendo em conta que $X_s = -\frac{1}{2\pi f C_s}$ verificamos pela figura que a situação mais favorável ocorre para:

$$X_s = -0.501\Omega; C_s = 6.35mF; B_{rms} = 23.67\mu T = 0.74B_{std} \quad (4.7)$$

Para a situação mais favorável obtemos então uma redução de 12% em relação à malha em curto-circuito, e de 35% em relação à linha sem mitigação. No entanto, fazendo a leitura do gráfico, percebemos que existem, inclusivamente, valores de C_s , para os quais os valores do campo aumentam em relação à situação com $C_s = \infty$. A escolha da capacidade tem, então, que obedecer a critérios cuidadosos. Para o pior caso obtemos:

$$X_s = -1.023\Omega; C_s = 3.11mF; B_{rms} = 47.19\mu T = 1.46B_{std} \quad (4.8)$$

A solução do condensador em série na malha possui assim algumas condicionantes. A redução do campo, em relação à solução curto-circuitada, é relativamente pequena e tendo em conta que estamos a falar de um condensador de elevada capacidade, o factor económico começa a ter um peso elevado na escolha desta solução. Para além disso, a colocação do condensador na malha não se prevê uma tarefa fácil, tornando provavelmente esta solução ainda mais dispendiosa. Por outro lado, como foi referido, um erro na escolha da capacidade a instalar pode-se reflectir numa diferença de cerca de $25\mu T$ no valor do campo B .

Na *tabela 4.4* são apresentadas as amplitudes complexas de todas as correntes do sistema, para as três situações avaliadas, malha em curto-circuito, malha com condensador em série de $6.35mF$ (caso mais favorável) e malha com condensador com $C_s = 3.11mF$ (situação mais desfavorável). Os resultados confirmam os valores obtidos em [BRAND06].

<i>Condutor</i>	<i>Malha de mitigação com condensador</i> $C_s = 6.35mF$	<i>Malha de mitigação com condensador</i> $C_s = 3.11mF$	<i>Malha de mitigação em curto-circuito</i>
1Ra	994.6 - j5.5	994.2 - j5.2	994.5 - j5.6
1Rb	1005.4 + j5.5	1005.8 + j5.2	1005.5 + j5.6
1Sa	-512.1 - j860.8	-516.4 - j856.9	-513.6 - j 861.7
1Sb	-487.9 - j871.3	-483.6 - j875.1	-486.4 - j870.4
1Ta	-501.7 + j873.8	-502.1 + j874.1	-501.8 + j873.8
1Tb	-498.3 + j858.2	-497.9 + j857.9	-498.2 + j858.3
G1	-94.1 + j15.3	-117.9 + j23.7	-98.6 + j9.3
G2	97.9 + j23.5	121.7 + j15.1	102.4 + j29.5
L1	-458.1-j13.9	19.6-j724.9	-215.5 + j59.7
L2	458.1+j13.9	-19.6+j724.9	215.5 - j59.7

Tabela 4.4 Amplitudes complexas das correntes nos condutores, para a malha com condensador em série.

A *figura 4.10* ilustra a variação do campo magnético ao longo de um plano transversal, para $z = 150m$, para as três situações analisadas anteriormente: Linha sem mitigação, com malha em curto-circuito e com condensador em série, para o caso mais favorável. Analisando o gráfico ficamos com uma imagem da distribuição do campo ao longo do espaço. De notar que, para a malha com condensador em série, os valores do campo experimentam maiores variações para curtas distancias no espaço.

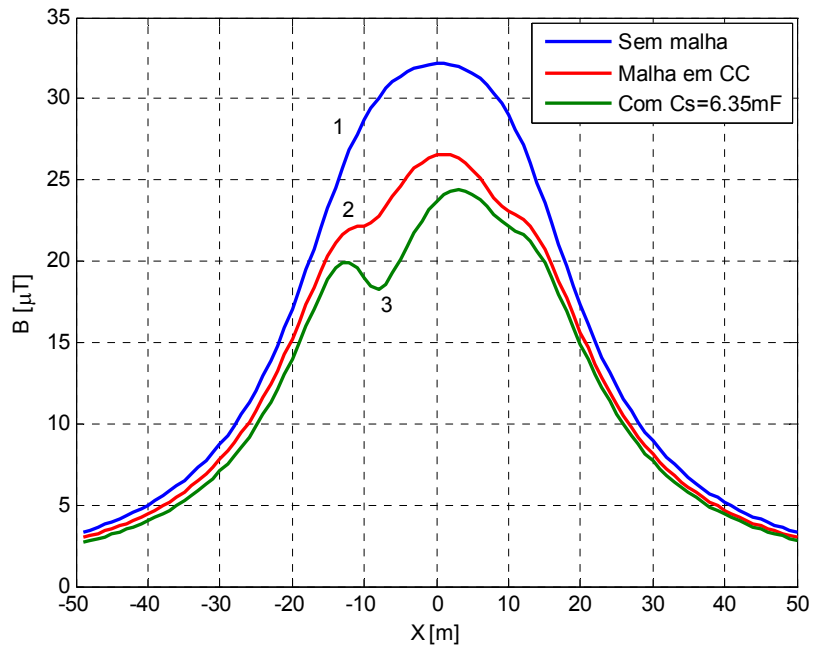


Figura 4.10 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$). A curva 1 (azul) representa a situação sem mitigação; a curva 2 (vermelho) corresponde à linha com malha de mitigação em curto-circuito; e a curva 3 corresponde à melhor solução com condensador em série.

Para as mesmas três situações, a *figura 4.11* ilustra a variação do campo de indução magnética B ao longo de um vão. É notória a redução causada pelo circuito de mitigação em curto-circuito (curva 2) e com condensador em série (curva 3) principalmente junto da fase 1 devido à corrente com ângulo de fase nulo.

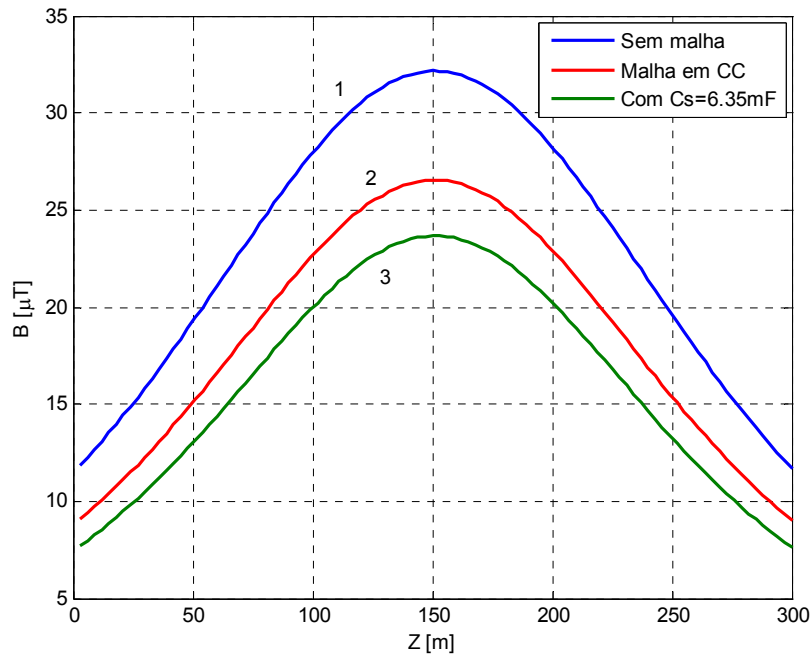


Figura 4.11 Representação da variação do campo magnético ao longo de um vão ($y = 1.8m$, $x = 0m$, $z \in [0; 300m]$). A curva 1 (azul) representa a situação sem mitigação; a curva 2 (vermelho) corresponde à linha com malha de mitigação em curto-circuito; e a curva 3 (verde) corresponde à melhor solução com condensador em série.

Em [SHPER96] são analisadas outras soluções que fazem uso de condensadores em série, nomeadamente uma malha de 3 “pernas” ou o uso de duas malhas sobrepostas, de modo a obter um efeito de simetria na redução do campo. Estas soluções são determinadas recorrendo a software de análise do campo magnético a duas e a três dimensões, e não serão por isso, usadas aqui.

Vamos agora variar a resistência linear dos condutores que formam a malha e analisar os resultados. Para isso vamos usar quatro novos valores para a resistência linear e para cada um encontrar o dimensionamento correcto para o condensador a ser usado. Na *tabela 4.5* estão os resultados obtidos fazendo variar a resistência linear dos condutores da malha. Os valores usados para as resistências lineares de cada condutor foram os mesmo usados em [SHPER96]. Usando o programa, para cada valor da resistência foi obtido o valor óptimo para o condensador em série inserido na malha e a respectiva redução do campo em comparação ao valor obtido com a malha em curto-circuito. Na primeira coluna da tabela são apresentados os resultados para o condutor da malha usado até aqui (condutor ACSR “Hen” de diâmetro externo 2.24cm e resistência linear 0.131Ω/km [MEMAR96]).

Os valores óptimos das capacidades diminuem à medida que a resistência linear diminui. Diminuindo a resistência dos condutores e o respectivo valor optimizado para o condensador em série, obtemos melhorias significativas na mitigação do campo magnético, como pudemos observar na *figura 4.12*. Para a resistência de 0.028Ω/km obtemos uma redução de 35% no valor do campo em comparação com o valor obtido com a malha em curto-circuito e de 47% em comparação com a linha sem

mitigação. Não são obtidas diferenças significativas no valor do campo, com a malha em curto-circuito, reduzindo a resistência linear dos condutores, no entanto a alteração da resistência em sintonia com a escolha correcta do condensador produz reduções assinaláveis no campo magnético.

Resistência linear [Ω/km]	0.131	0.074	0.062	0.043	0.028
B_{rms} em CC [μT]	26.54	26.23	26.19	26.13	26.10
C_s ideal [mF]	6.354	5.432	5.296	5.109	5.005
B_{rms} ideal [μT]	23.67	20.45	19.55	18.05	16.93
Redução ideal [%]	26%	36%	39%	44%	47%

Tabela 4.5 Variação do campo com a resistência linear dos condutores da malha, para o mesmo ponto de observação do campo ($x = 0m, y = 1.8m, z = 150m$).

A figura 4.12 ilustra a distribuição do campo comparando as duas situações, com $R = 0.131\Omega/km$ e $C_s = 6.354mF$ (curva 1) e $R = 0.028\Omega/km$ e $C_s = 5.005mF$ (curva 2). É notória a redução do campo, principalmente no centro do corredor, onde, para a curva 2, o pico do campo é “desviado” para a direita. O mínimo do campo é obtido para $x = -6m$ ($B_{rms} = 13.43\mu T$), sendo agora o máximo “empurrado” para $x = 12m$ ($B_{rms} = 19.6\mu T$). Com esta solução os níveis de intensidade do campo mantêm-se sempre abaixo dos valores obtidos para $R = 0.131\Omega/km$ e $C_s = 6.354mF$.

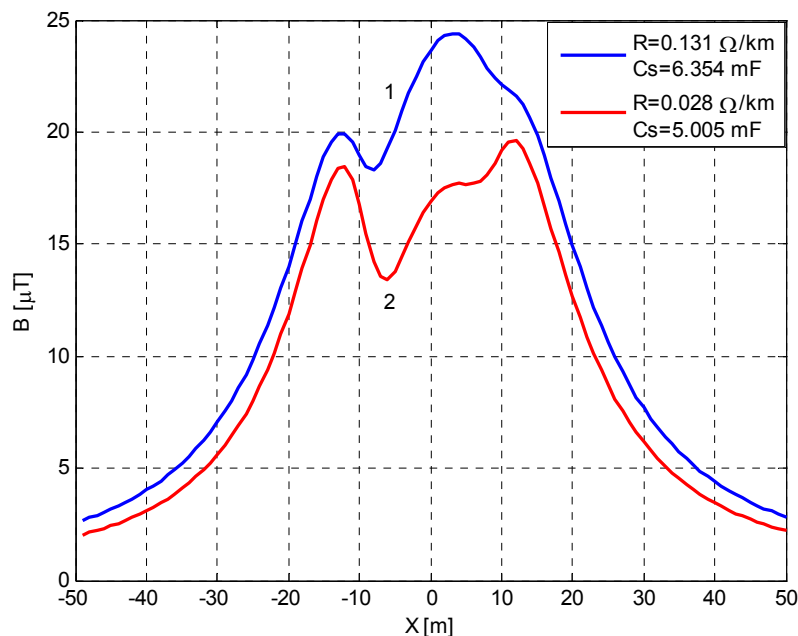


Figura 4.12 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m, z = 150m, x \in [-50m; 50m]$). A curva 1 (azul) representa a situação com malha de mitigação com os parâmetros $R = 0.131\Omega/km$ e $C_s = 6.354mF$; a curva 2 (vermelho) corresponde à linha com malha de mitigação de menor resistência linear $R = 0.028\Omega/km$ e $C_s = 5.005mF$.

As correntes no condensador em série, para uma configuração ideal, dependem da carga na linha. Assim, estes devem estar preparados para resistir às tensões em estado estacionário, originadas pelas situações de carga máxima na linha. Em caso de falha no sistema, as correntes na malha aumentam significativamente e o condensador fica exposto a transitórios. Embora a maioria das situações de curto-circuito tenham uma duração muito limitada, os condensadores devem estar protegidos durante este período. Com a exceção do caso em que o comprimento da malha seja muito pequeno, será na generalidade, uma solução mais económica limitar a tensão no condensador do que avaliar o seu comportamento em caso de falha [WALL93]. Uma opção possível é a aplicação de varistores (metal-óxido) em paralelo com o condensador. Os varistores têm provado a sua eficácia na protecção de condensadores em série na ocorrência de falhas [WALL93].

Na *figura 4.13* está representado o contorno da intensidade do campo medida a meio vão ($z = 150\text{m}$) para um plano transversal. As curvas 1 a 4 definem o limite de referência para o campo de indução magnética de $100\mu\text{T}$ para 50Hz para a exposição do público em geral da ICNIRP [ICNIRP98]. As curvas sobrepostas foram obtidas usando o programa elaborado configurado para as situações analisadas anteriormente: linha sem mitigação; com malha em curto-circuito; malha com condensador em série de $C_s = 6.354\text{mF}$ e resistência linear $R = 0.131\Omega/\text{km}$; malha com condensador em série de $C_s = 5.005\text{mF}$ e resistência linear $R = 0.028\Omega/\text{km}$.

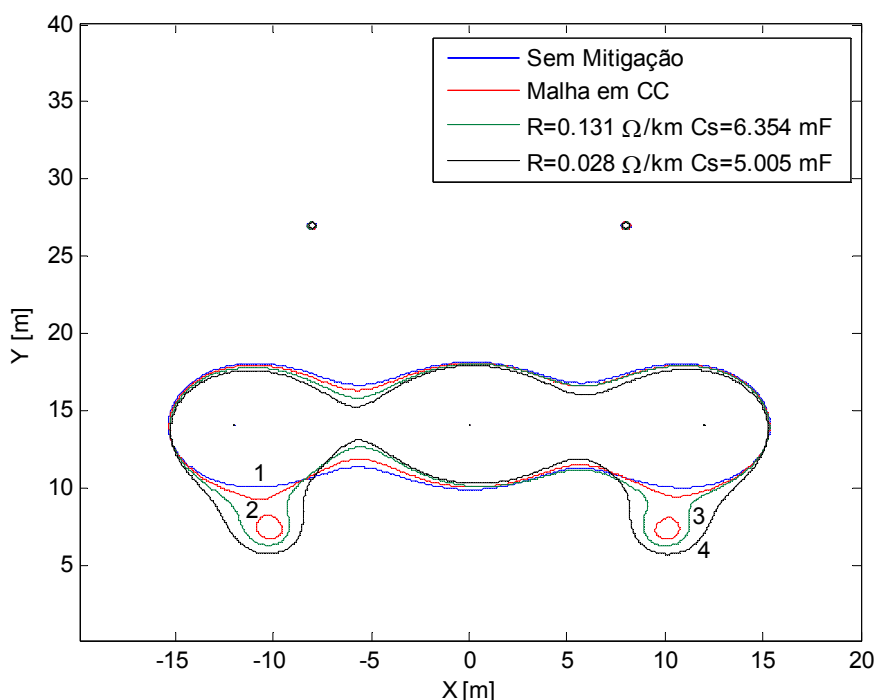
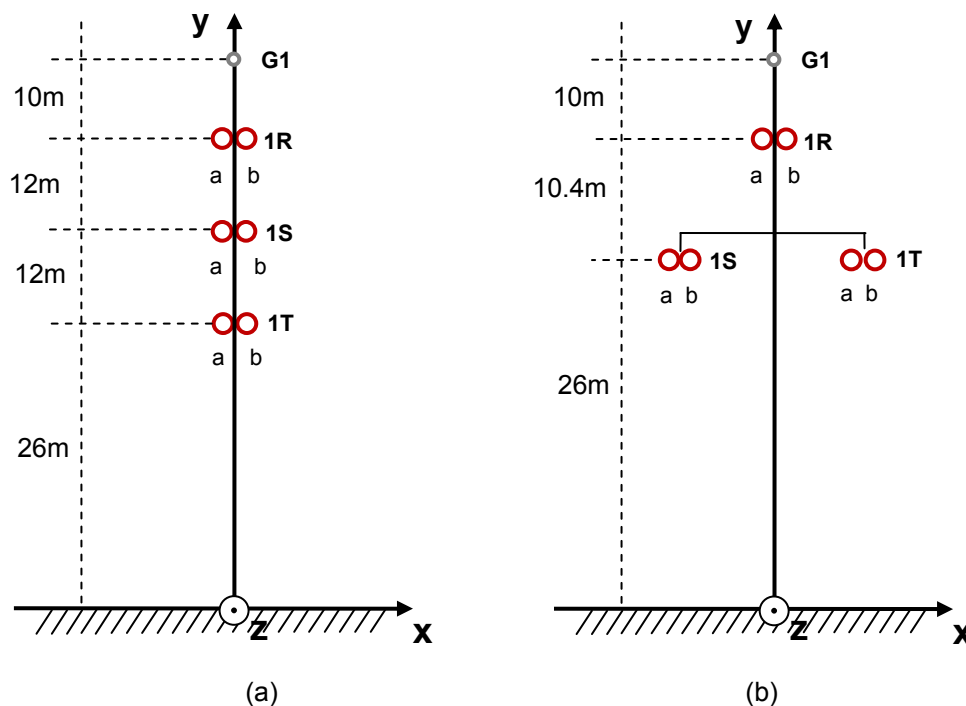


Figura 4.13 Plano transversal com o contorno da intensidade do campo B_{rms} medido a meio vão. As curvas correspondem ao nível crítico de $100\mu\text{T}$. A curva 1 (azul) corresponde à situação sem mitigação; a curva 2 (vermelho) está associada à malha em curto-circuito; a curva 3 (verde) corresponde à malha com $R = 0.131\Omega/\text{km}$ e $C_s = 6.354\text{mF}$; e a curva 4 (preto) corresponde a $R = 0.028\Omega/\text{km}$ e $C_s = 5.005\text{mF}$.

Analisando a figura, repara-se que, a região onde o nível de $100\mu T$ é excedido (interior do contorno) é, predominantemente, a zona circundante aos condutores de fase. É, no entanto, notório que, a presença da malha de mitigação expande a zona onde o nível de referência é ultrapassado, para junto dos condutores da malha e à volta destes, aproximando assim, ligeiramente, a zona onde os valores limite são excedidos do solo. Este aspecto tem particular interesse para os trabalhadores de manutenção das linhas, uma vez que são eles que habitam as áreas expandidas pela malha de mitigação. De destacar também que, as maiores áreas onde o limite é excedido são as que correspondem às soluções mais eficazes de mitigação para o ponto de observação do campo, correspondente à posição do cérebro humano. Este aspecto constitui uma ligeira desvantagem da técnica da malha de mitigação.

4.1.3 Influência da geometria

A distribuição do campo magnético na vizinhança da linha depende de inúmeros factores, como foi visto anteriormente, sendo um deles a geometria da linha. A forma como estão dispostos os condutores no ar, determina a distribuição das correntes e, por sua vez, do campo magnético. Analisada a geometria mais comum de circuito simples, vamos agora analisar três outras configurações; vertical, em triângulo e triângulo invertido. De modo a compararmos situações análogas, vamos manter os parâmetros dos condutores, a resistividade do solo, a corrente nas fases, as flechas e as alturas ao solo dos condutores inferiores.



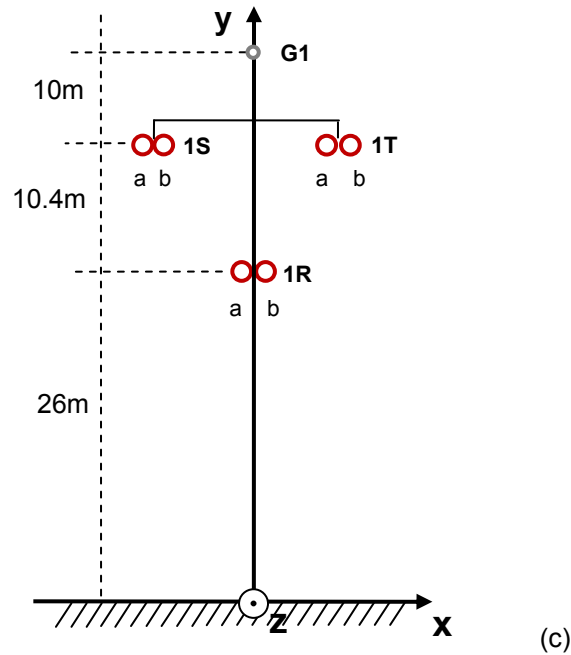


Figura 4.14 Representação geométrica das três configurações de linha analisadas, vistas do poste ($z=0$). (a) Linha na vertical; (b) Linha em triângulo; (c) Linha em triângulo invertido.

Usando o mesmo ponto de observação do campo usado para a linha em esteira ($x = 0m$, $y = 1.8m$, $z = 150m$), os valores obtidos para o campo magnético, através do programa elaborado, são apresentados na tabela 4.6.

	<i>Esteira</i>	<i>Vertical</i>	<i>Triângulo</i>	<i>Triângulo Invertido</i>
Campo H [A/m]	25.6	15.85	19.32	14.54
Campo B [μT]	32.16	19.92	24.28	18.27

Tabela 4.6 Variação do campo para diferentes configurações da linha, para o mesmo ponto de observação do campo ($x = 0m$, $y = 1.8m$, $z = 150m$).

A representação transversal do campo magnético para as quatro diferentes configurações de linha estão ilustradas na *figura 4.15*. De notar pela figura que a geometria em esteira origina o campo magnético mais elevado em todos os pontos do gráfico, e por outro lado, a configuração em triângulo invertido apresenta o perfil com os valores de campo magnético mais reduzidos, com um valor máximo de $18.27\mu T$. A redução é mais significativa, especialmente, no centro da linha. O facto de as distâncias ao solo de cada condutor serem iguais para a geometria em esteira revela-se importante no valor elevado para o campo magnético desta geometria.

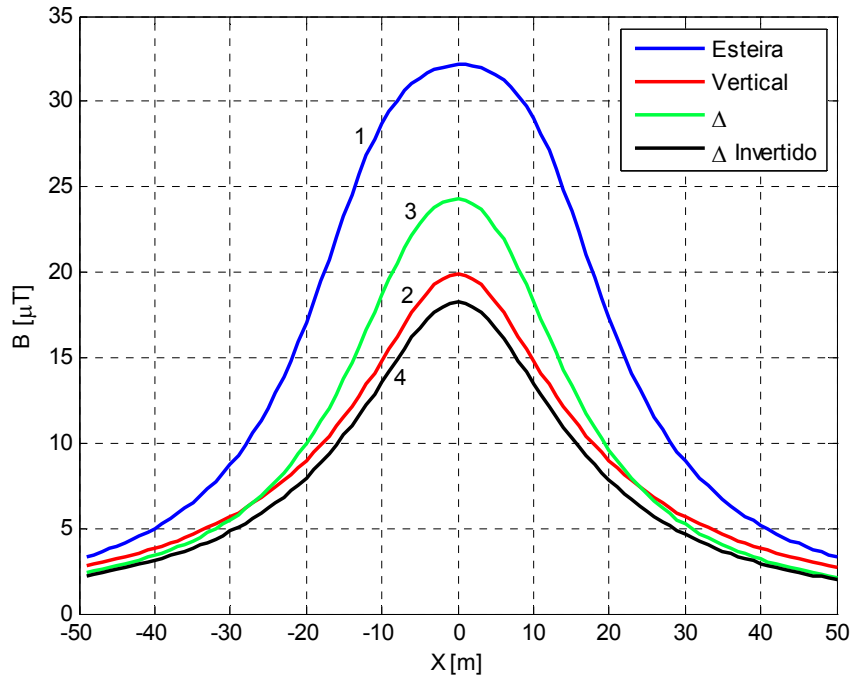


Figura 4.15 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$) para as 4 geometrias analisadas: curva 1 (azul) – Linha em esteira; curva 2 (vermelho) – Linha na vertical; curva 3 (verde) – Linha em triângulo; curva 4 (preto) – Linha em triângulo invertido.

A redução significativa do campo magnético originado por linhas de transmissão de energia, pode ser obtida, sobretudo, de duas formas, nomeadamente, a reconfiguração geométrica da linha e a instalação de uma malha dentro dos limites do corredor da linha. Nesta última solução, cada condutor de fase induz uma corrente, com uma componente de direção oposta no condutor da malha paralela à linha, de modo a que a corrente resultante crie um campo magnético que cancela parcialmente o campo originado pela linha. O grau de eficácia da malha de mitigação na redução da intensidade do campo magnético para uma determinada área, depende, entre outros, da geometria da malha e do módulo e ângulo de fase da corrente induzida.

A corrente induzida na malha de mitigação, sendo proporcional às correntes nas fases, contribui para a redução do campo independentemente da carga da linha. No caso de a malha não fornecer a redução do campo pretendida, ou necessária, para um determinado local, devido a correntes de baixa intensidade, a sua indutância pode ser compensada, em parte, por um condensador em série. Este condensador vai aumentar a corrente na malha, melhorando a eficácia desta para algumas zonas na vizinhança da linha de transmissão.

4.1.4 Análise de circuitos duplos

Quando é necessário aumentar a capacidade de transporte, as alternativas são a utilização de mais do que um circuito por poste ou aumento da tensão. Para circuitos múltiplos a geometria mais comum é a da linha na vertical, com um circuito de cada lado do poste (*figura 4.16*).

4.1.4.1 Caso base

Analogamente ao circuito simples, vamos analisar o campo magnético para três configurações diferentes com duplo circuito: vertical, em triângulo e triângulo invertido. A configuração geométrica da linha na vertical está representada na *figura 4.16*. Esta configuração de linha é muito usada em Portugal. Para cada circuito foi usada a mesma corrente do que no caso anterior, com a seguinte ordem de ângulos de fase:

$$\begin{cases} R \rightarrow 0^\circ \\ S \rightarrow -120^\circ \\ T \rightarrow 120^\circ \end{cases}$$

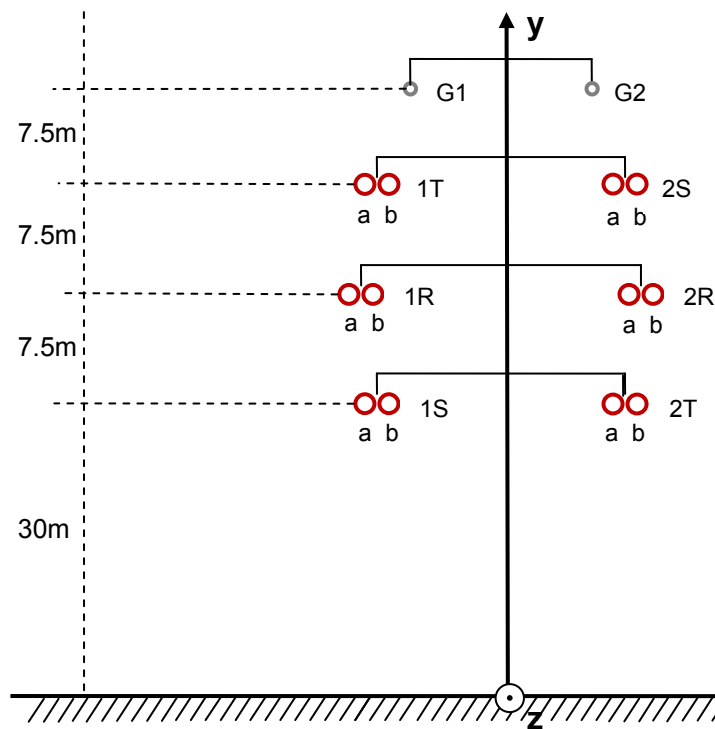


Figura 4.16 Configuração geométrica de uma linha de duplo circuito de 400kV.

Analogamente à linha de circuito simples, na *tabela 4.6* estão resumidas as características dos condutores. Os parâmetros resistividade do solo e comprimento do vão foram deixados intactos.

Nº Circuito	Nº Condutor	Diâmetro (mm)	Coordenada X no poste (m)	Coordenada Y no poste (m)	Flecha (m)	Resistência Linear a 20°C (mΩ/km)
1	R-a	31.8	-8.2	37.5	8	57.3
1	R-b	31.8	-7.8	37.5	8	57.3
1	S-a	31.8	-7.7	30	8	57.3
1	S-b	31.8	-7.3	30	8	57.3
1	T-a	31.8	-7.7	45	8	57.3
1	T-b	31.8	-7.3	45	8	57.3
2	R-a	31.8	8.2	37.5	8	57.3
2	R-b	31.8	7.8	37.5	8	57.3
2	S-a	31.8	7.7	45	8	57.3
2	S-b	31.8	7.3	45	8	57.3
2	T-a	31.8	7.7	30	8	57.3
2	T-b	31.8	7.3	30	8	57.3
	G1	14.6	-6	52.5	5	372
	G2	14.6	6	52.5	5	372

Tabela 4.7 Características de todos os condutores da linha de duplo circuito.

Para o mesmo ponto de observação anterior ($x = 0m$, $y = 1.8m$, $z = 150m$) , obtemos agora um campo magnético não mitigado de:

$$H = 5.89 A/m; B_{rms} = 7.40\mu T \quad (4.9)$$

Verificamos desde logo, para o ponto de observação, um valor substancialmente reduzido comparado com os $32.16 \mu T$, nas mesmas circunstâncias, para a linha em esteira de circuito simples. Na *tabela 4.8* são apresentadas as amplitudes complexas das correntes em todos os condutores, para esta configuração.

<i>Nº do circuito</i>	<i>Condutor</i>	<i>Amplitude complexa da corrente, sem malha de mitigação</i>
1	R-a	1000.1 + 0.1i
1	R-b	999.9 - 0.1i
1	S-a	-501.6 – 863.1i
1	S-b	-498.4 – 869.0i
1	T-a	-500.0 + 862.8i
1	T-b	-500.0 + 869.2i
2	R-a	999.8 – 0.0i
2	R-b	1000.2 + 0.0i
2	S-a	-498.6 – 868.9i
2	S-b	-501.4 – 863.1i
2	T-a	-500.2 + 869.3i
2	T-b	-499.8 + 862.7i
	G1	58.7 - 52.7i
	G2	-31.9 + 64.5i

Tabela 4.8 Amplitudes complexas das correntes nos condutores, para a linha de duplo circuito na vertical.

Na *figura 4.17* são comparadas as duas configurações, circuito simples em esteira e duplo circuito na vertical, no que respeita ao campo magnético. Com a linha de duplo circuito obtêm-se valores para o centro da linha cerca de 5 vezes menores comparados com a linha de circuito simples em esteira. A razão está na disposição dos condutores da linha pois as fases S e T estão em posições diferentes em cada um dos circuitos.

Na *figura 4.18* está representado o contorno da intensidade do campo medida a meio vão ($z = 150\text{m}$) para um plano transversal, no que respeita à mesma configuração de linha. A curva a azul corresponde ao limite de referência para o campo de indução magnética de $100\mu\text{T}$ para 50Hz. No seu interior os $100\mu\text{T}$ são ultrapassados. Comparando com a *figura 4.13*, verifica-se que os valores críticos de $100\mu\text{T}$ estão, agora, bem mais distantes do solo, bem como do centro da linha ($x = 0$). Esta é, também, uma das vantagens da geometria de duplo circuito na vertical.

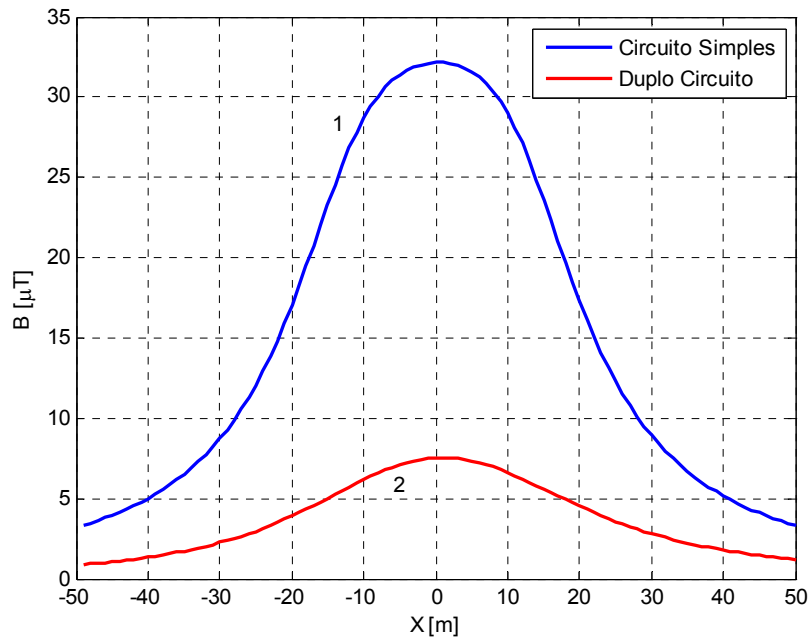


Figura 4.17 Representação transversal da variação do campo com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$), para a linha de circuito simples caracterizada pela tabela 4.1 e figura 4.1 (sem mitigação) – curva 1 e para a linha de duplo circuito, com geometria vertical caracterizada pela tabela 4.7 e pela figura 4.16.

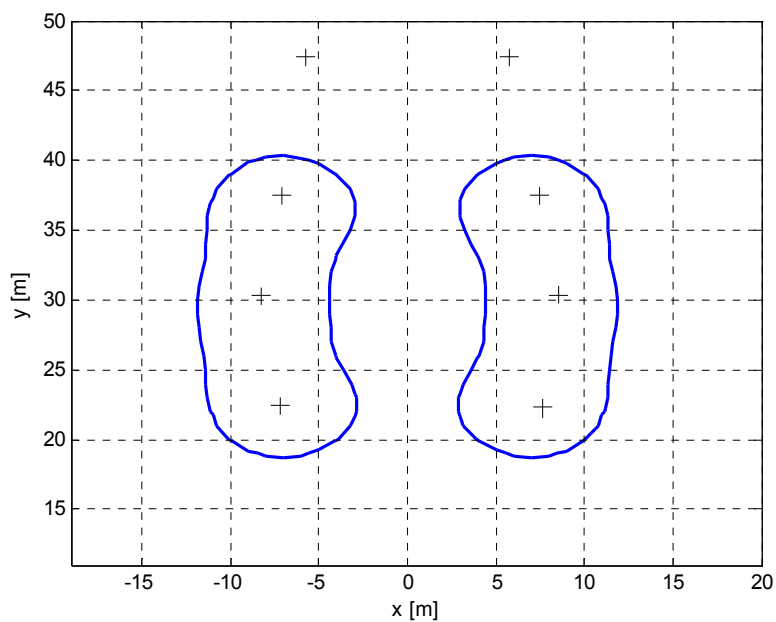
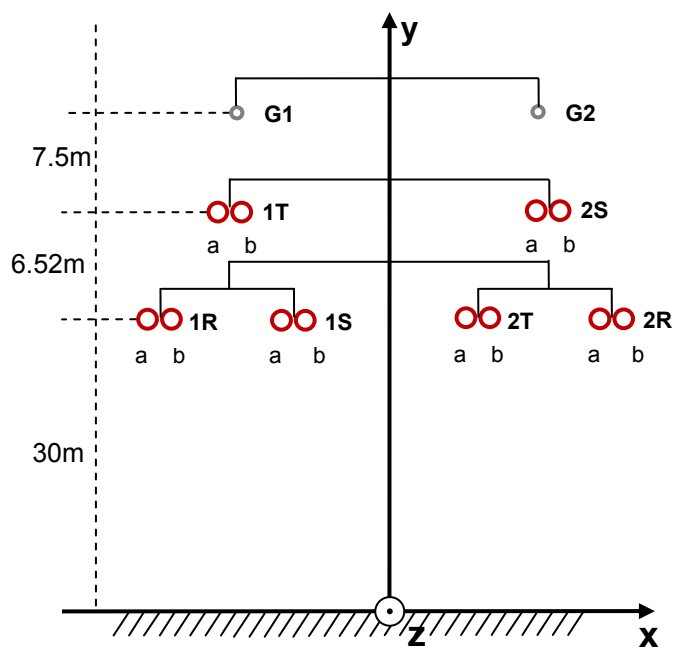
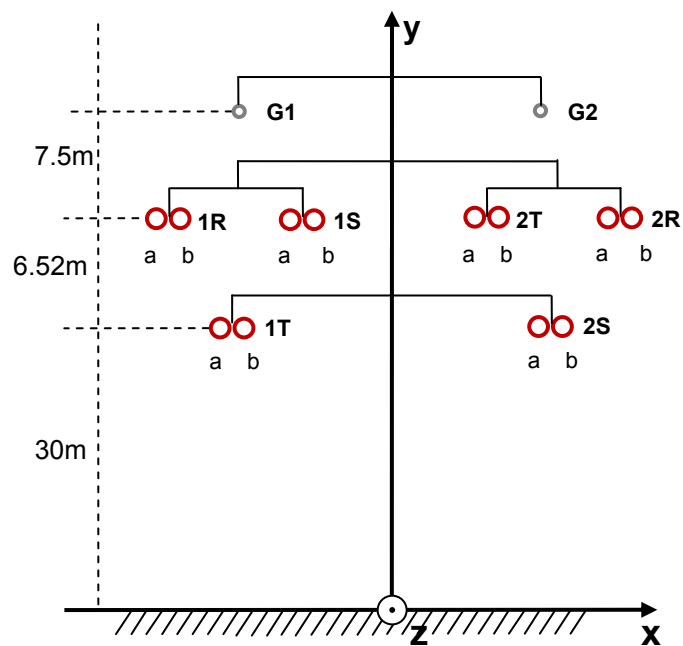


Figura 4.18 Plano transversal com o contorno da intensidade do campo B_{rms} medido a meio vão, para a linha de duplo circuito na vertical. A curva corresponde ao nível crítico de $100\mu T$

Vamos agora comparar a configuração na vertical com duas outras geometrias de linha de duplo circuito. Os parâmetros dos condutores foram mantidos de modo a otimizar o grau de comparação. Na figura 4.19 estão representadas as geometrias de duplo circuito em triângulo e triângulo invertido.



(a)



(b)

Figura 4.19 Representação geométrica da linha de duplo circuito em triângulo (a) e em triângulo invertido (b), vistas do poste ($z=0$).

Os resultados obtidos para o ponto de observação estão sumarizados na *tabela 4.9*. O valor mínimo do campo magnético é obtido para geometria em triângulo. Na *figura 4.20* estão representados os perfis relativos ao campo magnético para as três geometrias, verificando-se que a linha em triângulo apresenta os valores mais baixos do campo para o centro da linha, no entanto para zonas mais afastadas do centro do corredor a geometria na vertical obtém campos mais reduzidos. Apesar de

originarem um campo mais reduzido no centro da linha, estas duas configurações de linha são mais desvantajosas do que a configuração típica na vertical no que respeita à estabilidade da linha, pelo facto dos condutores estarem dispostos com distâncias mais afastadas ao centro do poste.

	Duplo Circuito Vertical	Duplo Circuito Triângulo	Duplo Circuito Triângulo Invertido
Campo H [A/m]	5.89	3.67	8.04
Campo B [μT]	7.40	4.62	10.11

Tabela 4.9 Variação do campo para diferentes configurações da linha de duplo circuito, para o mesmo ponto de observação do campo ($x = 0m, y = 1.8m, z = 150m$).

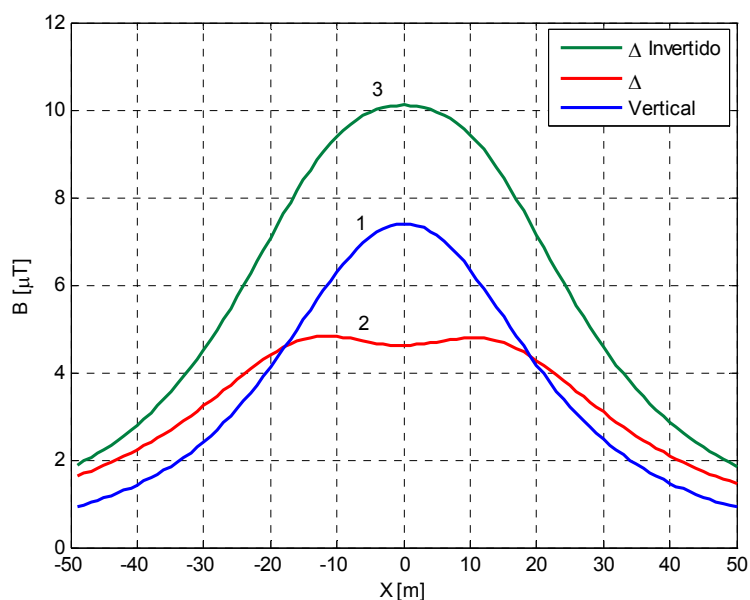


Figura 4.20 Representação transversal da variação do campo magnético com a distância em x ($y = 1.8m, z = 150m, x \in [-50m; 50m]$) para as 3 geometrias de duplo circuito : curva 1 (azul) – Linha na vertical; curva 2 (vermelho) – Linha em triângulo; curva 3 (verde) – Linha em triângulo invertido.

As linhas de duplo circuito verificam assim os menores campos magnéticos constituindo assim uma boa solução de mitigação. No entanto, no caso do corredor, onde a redução do campo é necessária, não justificar carga para uma linha de duplo circuito, esta não será certamente uma opção a seguir.

4.2 Campo Eléctrico

Uma vez que à frequência de 50Hz (regime quasi-estacionário), os campos eléctrico e magnético se podem considerar independentes, a abordagem tecnológica para redução dos campos é diferente. Se a carga for constante, para a mesma potência transmitida, ao diminuirmos a tensão estamos a aumentar o campo magnético e a reduzir o campo eléctrico. Ao contrário, se aumentarmos o nível de tensão, mantendo a potência transmitida, obtemos campos magnéticos mais reduzidos (uma vez que os condutores são percorridos por correntes menos elevadas) e maiores campos eléctricos [WASHI92]. Ao contrário do que acontece para o campo magnético, em relação ao cálculo do campo eléctrico as oscilações de carga não tem um efeito significativo, uma vez que a tensão na linha permanece, praticamente, constante. Por outro lado, os edifícios e a vegetação têm uma forte influência nos valores do campo eléctrico ao contrário do que acontece para o campo magnético [EMF93], [MALT93]. Neste trabalho não temos em conta a influência dos objectos, no entanto em [SUOJA00], [BETOL07] são estudados os efeitos de objectos, nomeadamente de árvores e vegetação no comportamento do campo eléctrico junto de linhas de 400kV.

4.2.1 Caso base

Usando o método de cálculo desenvolvido no capítulo 3.2, através do programa elaborado para o cálculo do campo eléctrico e magnético vamos então analisar a variação do campo eléctrico na vizinhança da linha em esteira caracterizada pela *figura 4.1* e *tabela 4.1*.

Mantendo como ponto de observação o ponto P, caracterizado pelas coordenadas, $x_p = 0m$, $y_p = 1.8m$, $z_p = 150m$, para a linha em esteira de 400kV da *figura 4.1* obtemos:

$$E = 0.65 \text{ kV/m} \quad (4.10)$$

Como foi referido no capítulo 3.2, no cálculo do campo eléctrico foi desprezado o efeito da catenária, uma vez que para um perfil do campo a meio vão, a diferença entre calcular o campo usando a altura média ou usando a catenária é inferior a 1% [GEC82].

O valor obtido de 0.65 kV/m está bem abaixo do limites de referencia da ICNIRP, no entanto através do perfil lateral do campo, ilustrado na *figura 4.23*, verificamos que, ao contrário do campo magnético, o valor máximo do campo eléctrico não se situa a meio do corredor, mas sim junto da margem deste. Para a geometria em esteira, os valores máximos situam-se até fora do limite das fases. Através da *figura 4.21* verificamos que o máximo valor do campo eléctrico verifica-se para $x = -15m$ e $x = 15m$, onde se obtém:

$$E = 1.38 \text{ kV/m} \quad (4.11)$$

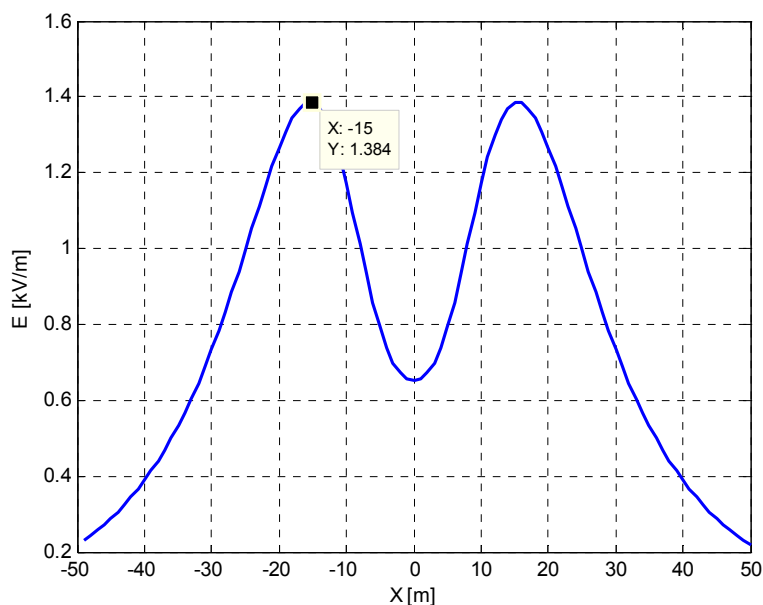


Figura 4.21 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , com a distância em x ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$). O ponto assinalado representa o valor máximo do campo E obtido.

Tal como o campo magnético, o campo eléctrico também depende, substancialmente, dos parâmetros geométricos e da configuração da linha. Alterações na geometria da linha podem afectar o campo eléctrico na vizinhança da linha de forma diferente do que o campo fora dos limites do corredor. Para as configurações da *figura 4.14*, na *tabela 4.10* estão apresentados os resultados para o campo eléctrico medido no ponto P e no ponto onde o campo é máximo, em comparação com a linha em esteira.

	<i>Esteira</i>	<i>Vertical</i>	<i>Triângulo</i>	<i>Triângulo Invertido</i>
Campo E no ponto P [kV/m]	0.65	1.52	0.88	1.27
Campo E_{max} [kV/m]	1.38	1.52	1.16	1.27

Tabela 4.10 Valores obtidos para o campo eléctrico para diferentes geometrias.

Para a configuração na vertical e em triângulo invertido o ponto P corresponde ao ponto onde o valor é máximo (*figura 4.22*). A geometria que apresenta valores máximos mais baixos é a geometria em triângulo, sendo a que apresenta valores mais elevados a linha na vertical. No entanto para zonas mais afastadas do centro do corredor, a linha na vertical obtém os valores mais reduzidos (a partir de $x = -20m$ e $x = 20m$) e a linha em esteira, pela disposição dos condutores na horizontal obtém os valores mais elevados. De notar, que a linha na vertical é que dispõe os condutores a alturas mais elevadas, requerendo postes de elevadas dimensões.

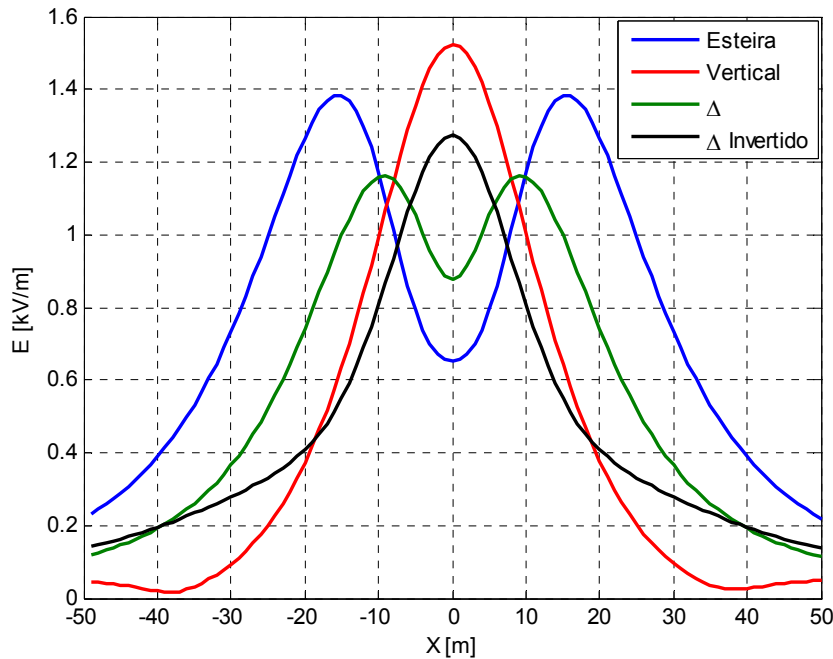


Figura 4.22 Representação transversal da variação do campo eléctrico E para diferentes geometrias ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$).

Procedendo da mesma forma para as diferentes geometrias, mas usando apenas um condutor por fase obtemos os resultados da *tabela 4.11*. O campo eléctrico aumenta ligeiramente, como seria de esperar, uma vez que as cargas se distribuem pela superfície de um condutor apenas. No entanto, as diferenças de valores são mínimas.

	<i>Esteira</i>	<i>Vertical</i>	<i>Triângulo</i>	<i>Triângulo Invertido</i>
Campo E no ponto P [kV/m]	1.18	2.29	1.44	1.88
Campo E_{max} [kV/m]	2.17	2.29	1.76	1.88

Tabela 4.11 Valores obtidos para o campo eléctrico para as diferentes geometrias, usando um condutor por fase.

Usando a geometria de linha em esteira da *figura 4.1*, retirando os cabos de guarda vamos fazer variar a distancia entre condutores e verificar os efeitos nos valores do campo eléctrico. Os cabos de guarda praticamente não influenciam o valor do campo eléctrico junto ao solo. Devido à sua localização acima dos condutores de fase, a presença dos cabos de guarda causam uma redução de 1 a 2% do campo eléctrico no solo [GEC82]. Sendo D_c a distância entre condutores na geometria em esteira (*figura 4.23*), na *figura 4.24* é ilustrada a variação do campo com D_c . Quanto menor é a distancia entre condutores menor é o campo eléctrico originado pela linha. A compactação da linha

pode assim diminuir o campo eléctrico junto ao solo, no entanto a aproximação dos condutores pode afectar negativamente o efeito de coroa e consequentemente as perdas da linha. Uma solução pode passar pelo aumento do diâmetro dos condutores ou do número de condutores por fase.

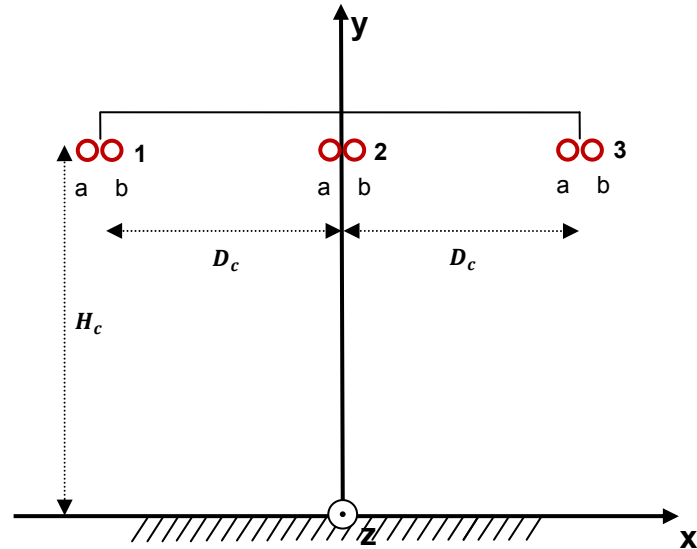


Figura 4.23 Representação geométrica da distância D_c e H_c na geometria em esteira.

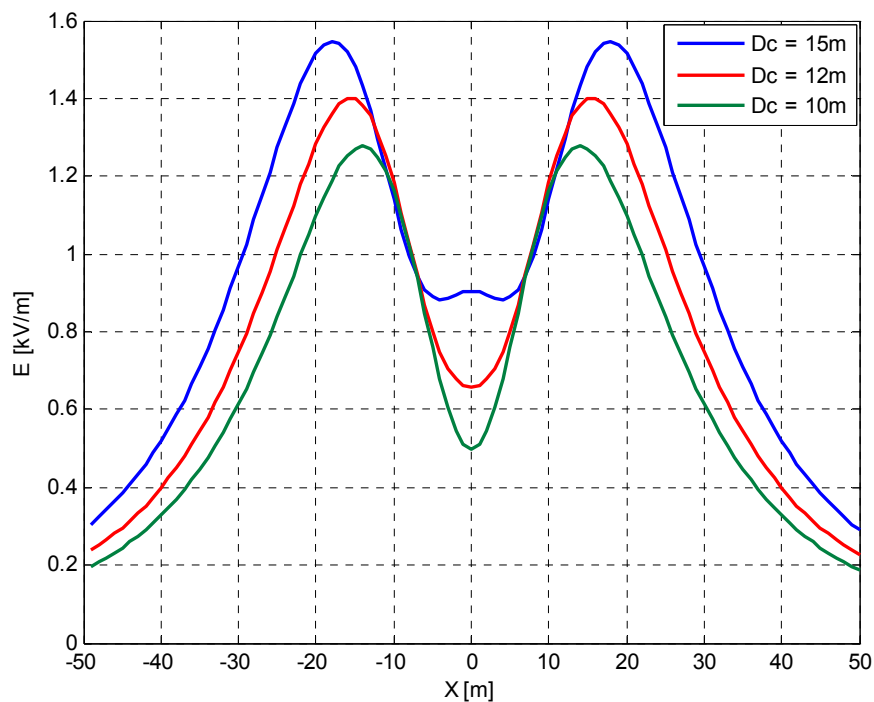


Figura 4.24 Representação transversal da variação do campo eléctrico E fazendo variar a distância entre condutores para a geometria em esteira ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$).

Na figura 4.25 está representada a variação do campo eléctrico E com a distância dos condutores ao chão H_c para a geometria em esteira com $D_c = 12m$, ilustrada na figura 4.23. Aumentando a distância

dos condutores ao solo verifica-se, assim, ser a forma mais eficaz de reduzir o campo eléctrico junto do solo. No entanto, aumentar a altura dos condutores implica aumentar a altura dos postes ou aumentar o número de postes. De notar, porém, que para zonas afastadas do centro do corredor a linha mais próxima do solo obtém campos eléctricos mais reduzidos. Esta não é, portanto, uma solução a ter em conta se o intuito for reduzir o campo para zonas distanciadas do centro do corredor.

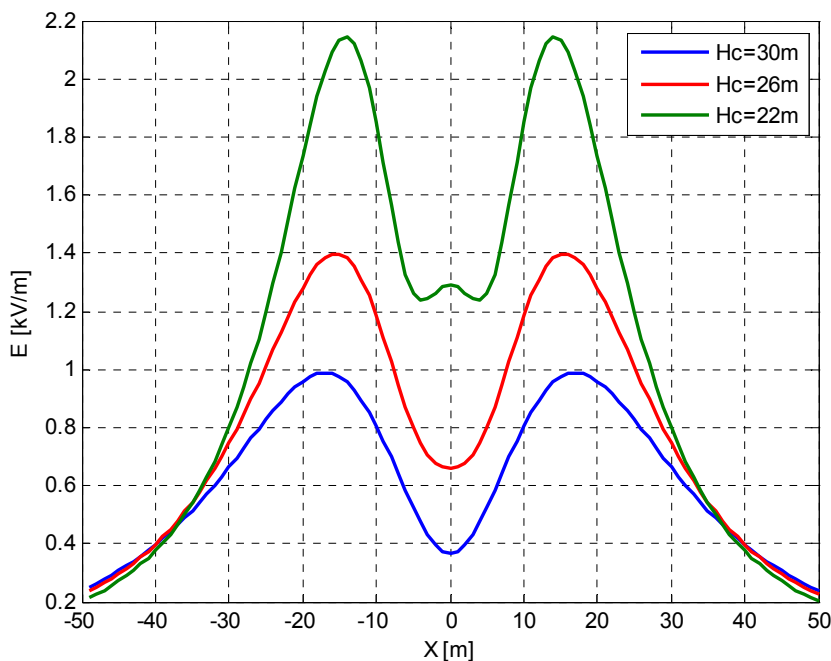


Figura 4.25 Representação transversal da variação do campo eléctrico E fazendo variar a distância dos condutores ao solo para a geometria em esteira ($y = 1.8m$, $z = 150m$, $x \in [-50m; 50m]$).

Na figura 4.26 estão representados os níveis limite da ICNIRP [ICNIRP98] para o campo eléctrico, para a linha caracterizada pela tabela 4.1 em esteira. Os valores para o público em geral só são ultrapassados junto dos condutores. O valor de $5kV/m$ mais próximo do solo situa-se a $13m$ de altura.

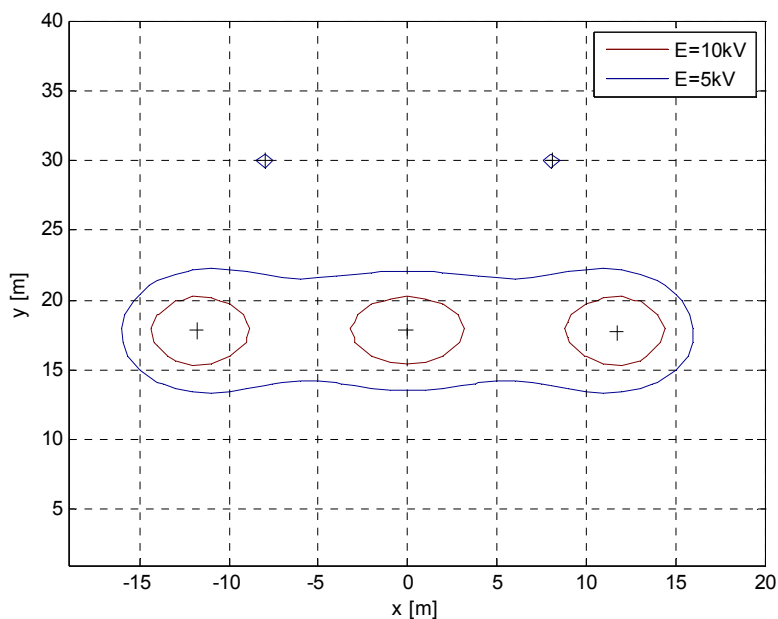


Figura 4.26 Plano transversal com o contorno da intensidade do campo E para a linha em esteira caracterizada pela tabela 4.1 e pela figura 4.1. As curvas correspondem aos níveis críticos da ICNIRP. O contorno a azul corresponde ao nível para o público de 5kV/m; o contorno a castanho corresponde ao nível para os trabalhadores de 10kV/m.

No Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão [DECR92], é referida uma distância mínima dos condutores aos edifícios. Em relação às coberturas, chaminés e todas as partes salientes susceptíveis de ser normalmente escaladas por pessoas, os condutores deverão ficar a uma distância D , em metros, na situação de flecha máxima:

$$D = 3.0 + 0.0075U \quad (4.12)$$

em que U , em kV, é a tensão nominal da linha.

Para o nível de tensão de 400kV ficamos assim com uma distância mínima de 6m. Verificamos assim que para esta linha, um edifício cumpre a lei com 12m de altura. Tendo em conta que para 13m já temos níveis do campo eléctrico superiores a 5kV/m, esta regra está no limiar de garantir a protecção da população no que respeita ao campo eléctrico.

4.2.2 Análise de Circuitos Duplos

Para a configuração de duplo circuito da *figura 4.16*, com os parâmetros da *tabela 4.7*, o campo eléctrico no ponto P ($x_p = 0m, y_p = 1.8m, z_p = 150m$) obtido é:

$$E = 0.73 \text{ kV/m} \quad (4.13)$$

Na *figura 4.28* está ilustrado o perfil do campo eléctrico para a linha de duplo circuito da *figura 4.16* bem como para diferentes configurações das fases, mantendo o circuito 1 (esquerda) com a mesma configuração. Na *figura 4.27* estão representadas todas as configurações, sendo a configuração da *figura 4.16* ilustrada em 5. Na configuração 6 apenas o circuito 1 está electrificado estando o circuito 2 ligado à terra.

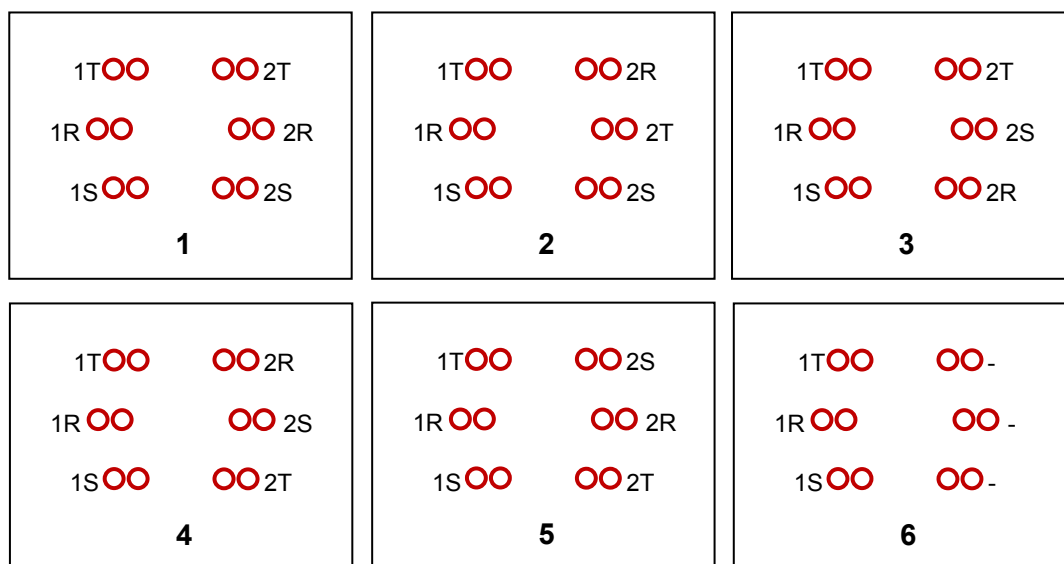


Figura 4.27 Sequência das fases na geometria de duplo circuito aplicada na *figura 4.29*.

A configuração 1, correspondente a ter os condutores com a mesma fase na mesma direcção, obtém o campo eléctrico mais elevado junto ao solo, correspondendo ao um campo eléctrico na superfície dos condutores mais baixo. Por outro lado, a configuração 5, correspondente à típica geometria de duplo circuito (*figura 4.16*), obtém os valores mais elevados do campo eléctrico nos condutores e mais baixos no ponto de observação a 1.8m do solo. A configuração 6 obtém um campo eléctrico mais elevado que a configuração 5 junto ao solo, estando o pico do campo eléctrico deslocado para a esquerda (junto do circuito electrificado) em comparação com as restantes configurações, como seria de esperar.

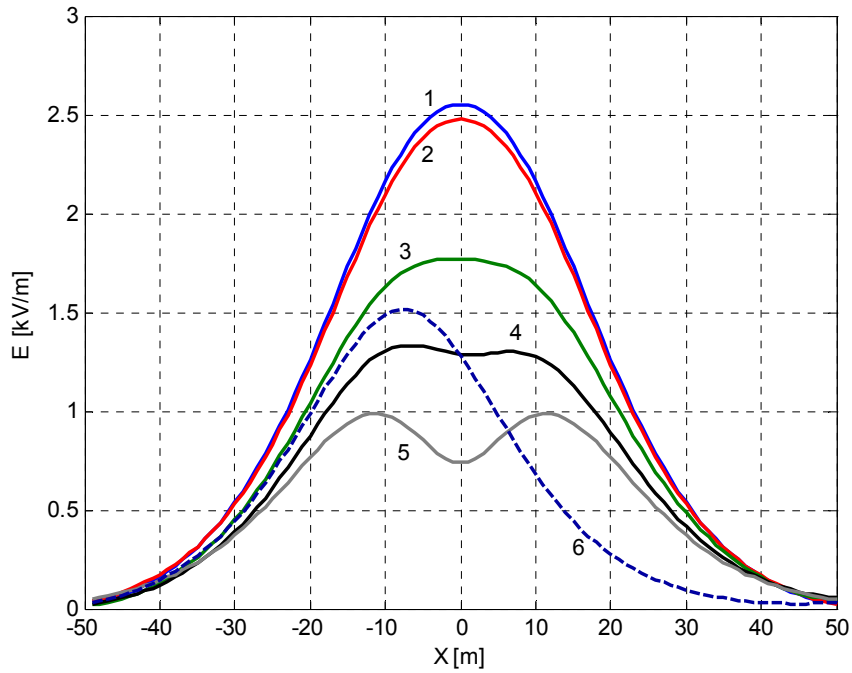


Figura 4.28 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , para a geometria típica de duplo circuito da figura 4.16 e para os diferentes arranjos da figura 4.27.

Para a geometria da figura 4.19-a), duplo circuito em triângulo, é feita uma análise semelhante à anterior. Na figura 4.29 estão representadas as seis configurações possíveis para o circuito 2, mantendo o circuito 1 na sua posição original. A configuração da figura 4.19-a) corresponde ao arranjo 5 da figura 4.29. Tal como na situação anterior a configuração 6 corresponde ao circuito 2 ligado à terra.

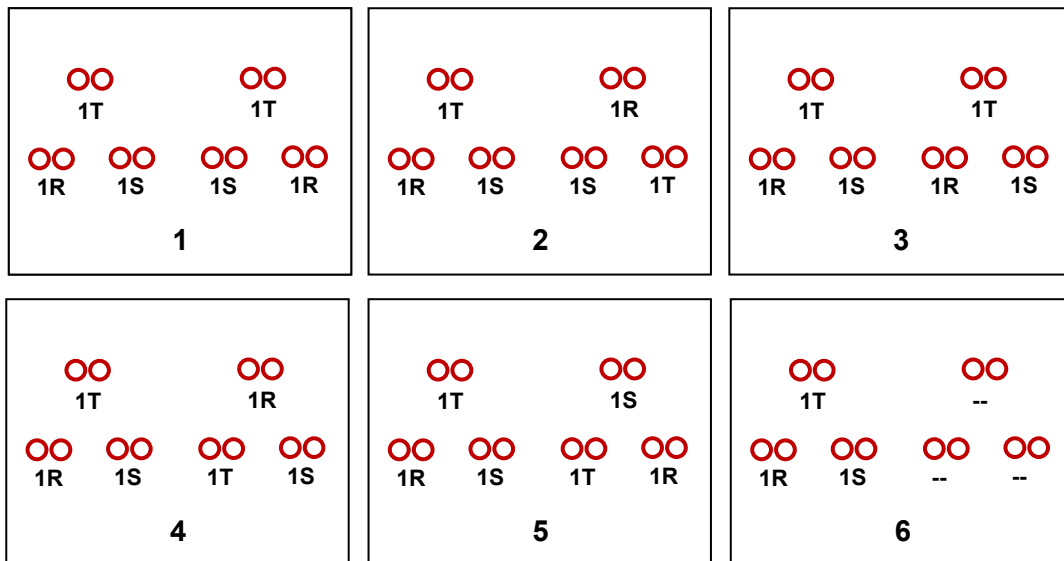


Figura 4.29 Sequência das fases na geometria de duplo circuito aplicada na figura 4.19 – a).

Analisando a *figura 4.30*, em comparação com a configuração típica da linha de duplo circuito na vertical, verificam-se valores mais reduzidos para o campo eléctrico, em todas as configurações da *figura 4.29*. O valor máximo do campo, obtido pela configuração 1 é de 1.237kV/m. Tal como na situação anterior a configuração 5 é que obtém os valores mais reduzidos do campo eléctrico em todo o espectro analisado. Para $x = 0m$ obtém-se $E = 0.095 kV/m$, um valor inferior a 2% da referencia da ICNIRP.

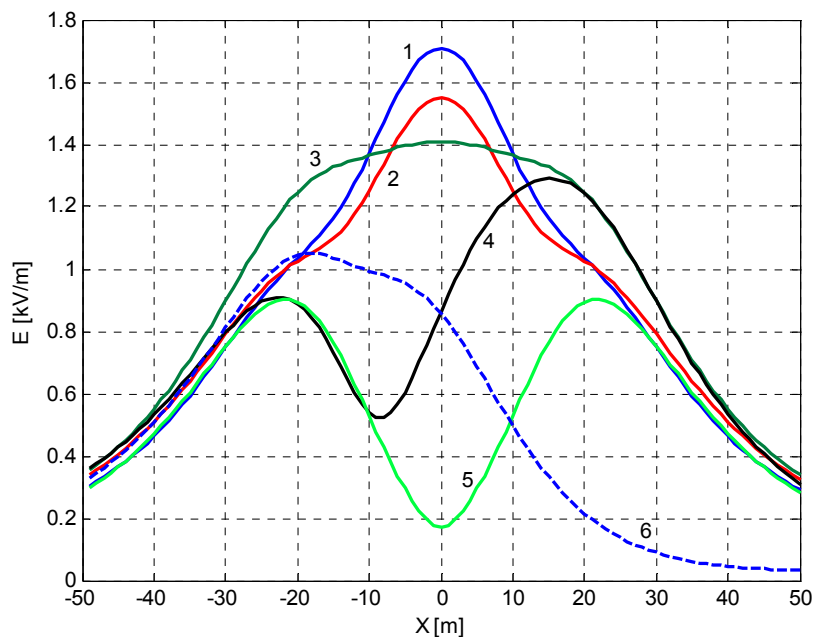


Figura 4.30 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , para a geometria de duplo circuito da *figura 4.19-a*) em triângulo, para as diferentes geometrias da *figura 4.29*.

Para a geometria da *figura 4.19-b*), a *figura 4.31* ilustra as diferentes configurações para o mesmo procedimento das duas geometrias anteriores.

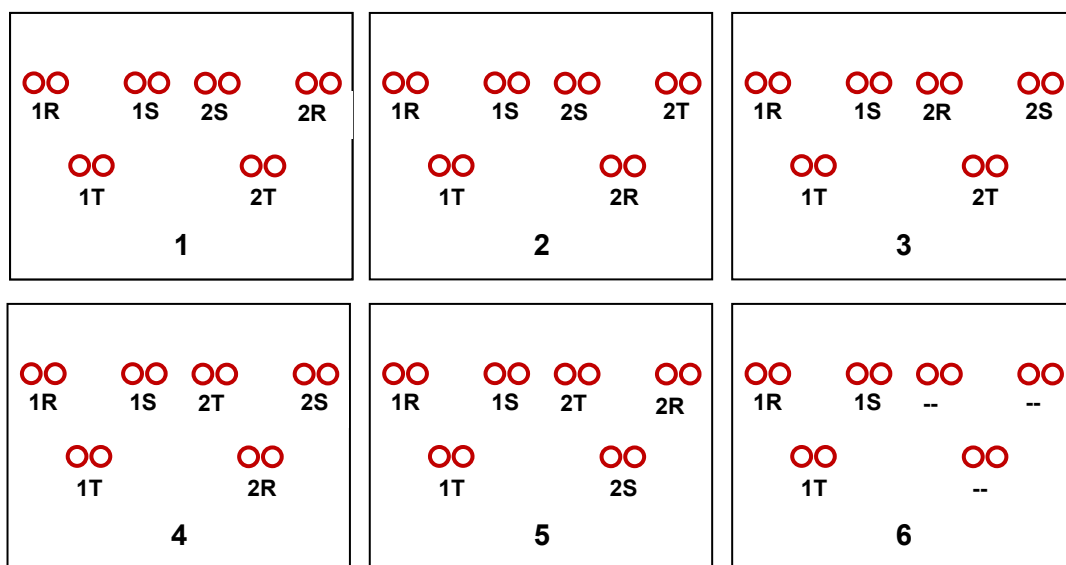


Figura 4.31 Sequência das fases na geometria de duplo circuito aplicada na *figura 4.22* – *b*).

Na *figura 4.32* estão ilustradas as variações do campo eléctrico para a geometria de duplo circuito em triângulo invertido (*figura 4.19 – b*). Na generalidade os resultados são semelhantes aos obtidos para a geometria anterior, no entanto para esta geometria a configuração 2 (*figura 4.31*) é a que apresenta o valor mais reduzido do campo E (0.43 kV/m), sendo no entanto mais elevado do que o mínimo obtido para a geometria de duplo circuito em triângulo.

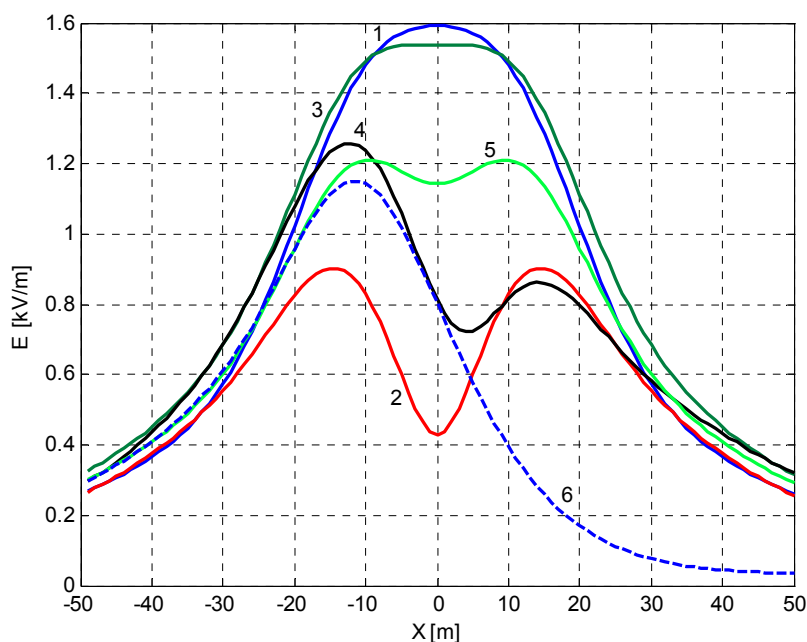


Figura 4.32 Representação transversal da variação do campo eléctrico E , para a geometria de duplo circuito da *figura 4.19-b*) em triângulo invertido, para as diferentes geometrias da *figura 4.31*.

Fazendo um paralelismo com a análise do campo magnético, de notar que as configurações de duplo circuito no que diz respeito ao campo eléctrico, não trazem benefícios significativos, sendo que para a configuração tradicional de duplo circuito na vertical até são obtidos valores um pouco mais elevados. Isto deve-se ao facto das correntes em oposição de fase não obterem um efeito positivo no campo eléctrico como o fazem para o campo magnético.

Conclusões

Os procedimentos analíticos de cálculo dos campos eléctrico e magnético produzidos pelas linhas de transmissão de energia utilizam modelos relativamente simples e elementares. Nos dias que correm, aproveitando o desenvolvimento da tecnologia e das capacidades computacionais de processamento, neste trabalho foi concebido um programa de cálculo do campo eléctrico e magnético originado por linhas de transmissão de energia. Usando como ferramenta de cálculo o programa concebido para o efeito, foram calculados os campos eléctrico e magnético para diferentes tipos de linha, bem como para diferentes geometrias, tendo sido obtidos resultados numéricos e gráficos, não apenas para um ponto específico no espaço, equivalente à altura de um ser humano, mas também para perfis transversais e longitudinais da linha ao longo de uma direcção. Foi analisada em pormenor a técnica da malha de mitigação como solução de redução do campo magnético, em curto-circuito e com condensador em série.

As principais conclusões retiradas dos estudos realizados podem dividir-se em dois pontos fundamentais:

1. Influência da geometria

- A geometria em esteira é a que obtêm o campo magnético mais elevado e o campo eléctrico mais baixo para o ponto de observação analisado.
- As linhas de duplo circuito apresentam os campos magnéticos mais reduzidos. No que respeita ao campo eléctrico não trazem melhorias significativas. No entanto, no que toca ao campo eléctrico, a sequência das fases é importante nos resultados obtidos para o centro da linha, verificando-se diversas assimetrias no perfil do campo eléctrico para diferentes sequências de fases.

Verifica-se assim, que as linhas de circuito simples originam campos mais elevados do que as linhas de duplo circuito para uma capacidade de transporte menor, no entanto, como foi referido anteriormente, nem sempre as linhas de duplo circuito são uma solução compensadora do ponto de vista económico.

2. Influência da malha de mitigação na redução do campo magnético

- Quando bem dimensionada, a malha de mitigação em curto-circuito pode ser bastante eficaz.
- O uso do condensador em série, quando bem escolhido, reduz ligeiramente os valores do campo magnético. No entanto, tendo em conta as elevadas capacidades em causa e as dificuldades no suporte, esta torna-se uma solução menos interessante do ponto de vista económico. Para além deste aspecto, um erro na escolha do condensador pode aumentar o valor do campo magnético para níveis preocupantes.
- A eficácia do uso do condensador aumenta à medida que a resistência da malha diminui.
- Variações na resistência dos condutores da malha provocam assimetrias no perfil transversal do campo magnético.

No que respeita à implementação da malha de mitigação, com ou sem condensador em série, é viável do ponto de vista estrutural. No entanto os custos de implementação *versus* os benefícios desta técnica de mitigação são indetermináveis nesta altura devido à incerteza associada aos efeitos na saúde. É difícil justificar custos de mitigação dos campos quando os riscos para a saúde da exposição a CEMs não estão definidos de forma evidente.

Neste trabalho deu-se particular relevância à técnica da malha de mitigação, no entanto como proposta para trabalhos futuros deve-se explorar as restantes técnicas de mitigação do campo propostas na literatura, bem como a aposta na descoberta de novas geometrias que levem à redução dos campos, nomeadamente as que fazem uso de linhas compactas. No que diz respeito à análise do campo eléctrico, a abordagem efectuada neste trabalho, como foi dito anteriormente, não entrou em conta com certos factores como a não-uniformidade da linha, ou a influência da vegetação/obstáculos nos valores obtidos. Um estudo mais aprofundado do campo eléctrico, que tenha em conta com estes factores, fica assim sugerido como um próximo tópico a ser examinado.

É de grande interesse entre os cientistas, governos e populações em geral, a compreensão e a redução dos campos eléctrico e magnético no ambiente que nos rodeia. É, assim, esperado um crescimento exponencial do conhecimento nesta importante área nos próximos anos.

Referências

- [COMAR00] “Possible health hazards from exposure to power-frequency electric and magnetic fields - A COMAR technical information statement”, *IEEE Eng. Med. Biol.*, vol.19, no.1, pp.131-137, Jan./Feb. 2000.
- [ICNIRP98] International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300Ghz)”, *Health Phys.*, vol.74, no.4, pp. 494-522, Apr. 1998.
- [CARST95] E. L. Carstensen, “Magnetic fields and câncer” *IEEE Eng. Biol.*, pp. 362-369, Jul./Aug. 1995.
- [DGS07] “Relatório do Grupo de Trabalho Interministerial sobre a Exposição da População aos Campos Electromagnéticos”, *Ministério da Saúde, Direcção-Geral da Saúde, Divisão da Saúde Ambiental*, Lisboa, Agosto 2007.
- [WHO02] “Establishing a Dialogue on Risks from Electromagnetic Fields”, *World Health Organization*, 2002, <http://www.who.int/peh-emf/en/>
- [BRAND06] J. A. Brandão Faria e M. E. Almeida, “Accurate Calculation of Magnetic-Field Intensity due to Overhead Power Lines with or without Mitigation Loops with or without Capacitor Compensation”, *IEEE*, Jan. 2006
- [SUOJA00] Suojanen, M., Vehmaskoski, J., Kuusiluoma, S., Trygg, P., Korpinen, L., “Effect of spruce forest on electric fields caused by 400 kV transmission lines”, *IEEE Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000*, vol.3, pp. 1401-1405, Apr./Jul. 2000.
- [BETOL07] G. Betolaza, J. S. Gallino, “The Finite Elements Method applied to Electromagnetic Compatibility Study”, *CIREN 19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, May 2007.
- [SHPER96] A. B. Shperling, L. Menemenlis-Hopkins, B. Fardanesh, B. Clairmont, and D. Childs, “Reduction of Magnetic Fields from Transmission Lines using Passive Loops”, *CIGRE International Conference*, Report 36-103, Paris, 1996.
- [WASHI92] Electric Transmission Research Needs Task Force, “Electric and Magnetic Field Reduction: Research Needs”, *Report prepared for the State of Washington, USA*, Jan. 1992.

[BARROS95] M. T. Correia de Barros, “Deformação de Sobretensões em Linhas de Transmissão de Energia”, *Lição de Síntese*, IST, UTL, Lisboa, Dez. 1995.

[NEVES90] M. V. Guerreiro Neves, “Cálculo de Transitórios em Linhas de Transmissão de Energia baseado no Emprego de um Esquema Equivalente por Troços – Comparação com o Método da Transformada de Laplace”, *IST, UTL*, Lisboa, Abril 1990.

[DUBAN69] C. Dubanton, “Calcul approché des parametres primaires et secondaires d’une ligne de transport”, *EDF Bulletin de la Direction des etudes et Recherches*, no. 1, pp. 53-62, 1969.

[MAMISH96] A.V. Mamishev, R.D. Nevels, B.D. Russell, “Effects of Conductor Sag on Spartial Distribution of Power Line Magnetic Field” *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol.11, no.3, July 1996.

[AMIRI06] R. Amiri, H. Hadi, M. Marich, “The influence of Sag in the Electric Field calculation around High Voltage Overhead transmission lines”, *IEEE 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 206-209, 2006.

[OLSEN93a] R. G. Olsen, “Electromagnetic Fields from Power Lines”, *IEEE Electromagnetic Compatibility*, pp. 138-143, Apr. 1993.

[BORGES95] J. F. Borges da Silva, “Electrotecnicia Teórica”, *IST, UTL*, Lisboa, 1995.

[CELO02] S. Celozzi, “Active compensaton and partial shields for the power-frequency magnetic field reduction”, in *2002 Int. Symp. Electromagnetic Compatibility*, vol.1, pp. 222-226, 2002.

[GEC82] General Electric Company, “Transmission Line Reference Book: 345kV and above”, 2nd ed., *Electric Power Research Institute*, 1982.

[OLSEN93b] R.G.Olsen, V.L.Chartier, “The performance of reduced magnetic field power lines - Theory and measurements on na operating line”, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol.8, no.3, July 1993.

[MEMAR96] A.R. Memari and W. Janischewskyj, “Mitigation of magnetic field near power lines”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol.11, no-3, pp. 1577-1586, July 1996.

[WALL93] R.A. Walling, J. J. Paserba, C.W. Burns, “Series-Capacitor compensated shield scheme for enhanced mitigation of transmission lines magnetic fields”, *IEEE Trans. Power Del.*, vol.8, no.1, pp. 461-468, Jan. 1993.

[EMF93] <http://infoventures.com/emf/state/md/sect9.html>

[MALT93] L. Maltin, "A practical guide to shielding of DC and low frequency magnetic fields", *Bioelectromagnetics Society, 15th Annual Meeting*, 13-17 June, Los Angeles, 1993.

[DECR92] "Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão", *Decreto Regulamentar n° 1/92, de 18 de Fevereiro*, Lisboa, 1992.

Anexos

Influência da resistividade do solo:

As correntes induzidas pelos campos magnéticos originados pelas linhas de transmissão de energia podem escoar-se com maior ou menor facilidade para a terra, dependendo da resistividade do solo. Assim quanto mais condutor for o solo menor será o campo magnético à sua superfície.

No estudo efectuado neste trabalho foi usada uma resistividade média do solo de $100 \Omega m$. Na *figura 0.1* está ilustrada a variação do campo de indução magnética B , com a resistividade média do solo ρ , para a linha em esteira da *tabela 4.1*, com malha de mitigação incluída.

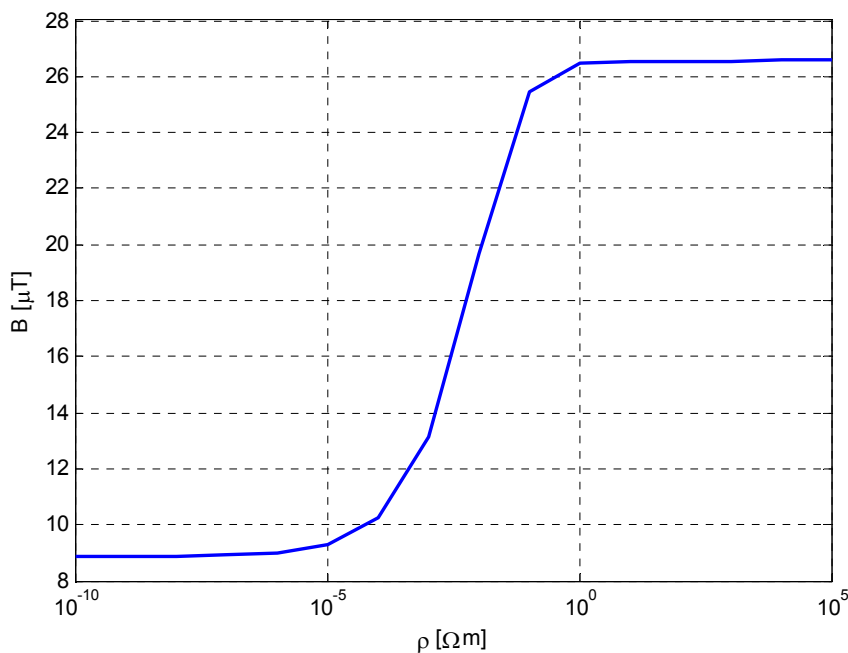


Figura 0.1 *Influência da resistividade da terra no campo magnético B_{rms} (linha em esteira).*

Através da figura, verificamos que a resistividade do solo apenas começa a ter uma influência significativa no campo magnético a partir de valores próximos de zero ($\rho = 0.01 \Omega m$). Este parâmetro não é, assim, peremptório no que respeita ao cálculo do campo magnético, uma vez que a maioria dos solos apresenta resistividades da ordem 10-1000 Ωm [OLSEN93b].

Manual do programa:

Na *figura 0.2* está representada a janela de interface gráfico do programa concebido para cálculo do campo electromagnético em linhas aéreas de transmissão de energia.

No lado esquerdo escolhemos a geometria da linha: circuito simples ou duplo circuito; 1 ou 2 cabos de guarda; a presença da malha de mitigação e o número de condutores por fase. Caso seja seleccionada a opção de 2 condutores por fase, aparecerá uma nova caixa onde será definida a distância entre os condutores da mesma fase.

Cálculo do campo electromagnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia

Geometria

Duplo Circuito:

Numero de cabos de guarda:

Malha de mitigação:

Nº de condutores por fase:

Distancia entre condutores (m):

Características

	Flecha (m)	Diametro Ext. (m)	Resist. Linear (ohm/m)
Fases	8	31.8e-3	0.0573e-3
Guardas	5	14.6e-3	0.372e-3
Malha Mitigação	5	22.4e-3	0.131e-3

Tensão Nominal da linha (kV):

Cond.	Nº Circ.	X Poste (m)	Y Poste (m)	Corrente Nominal (A)	e j
R	1	-8	37.5	2000	0
S	1	-7.5	30	2000	-120
T	1	-7.5	45	2000	120
R	2	8	37.5	2000	0
S	2	7.5	45	2000	-120
T	2	7.5	30	2000	120
g1		-6	52.5		
g2		6	52.5		
m1		-12	16		
m2		12	16		

Comprimento do vão (m): Nº de vãos:

Reactância Xs incluída na malha de mitigação (ohm): (Zc = jXs)

Resistividade da terra (ohm.m):

Campo Magnético

Ponto de análise do campo: X(m): Y(m): Z(m):

Intensidade do campo magnetico: H = A/m

Campo de indução magnética: B = microT

Gráfico 2D (Variação de B com a distância em X)

Gráfico 3D (variação de B com as distâncias X e Z)

Campo Eléctrico

Intensidade do campo Eléctrico: E = kV/m

Gráfico 2D (Variação do campo E com a distância X)

Calcular
Fechar

Figura 0.2 Interface gráfico do programa de cálculo do campo eléctrico e magnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia

Na caixa “Características” são introduzidos os parâmetros relativos às características dos condutores: flecha (em metros); diâmetro externo (em metros); e a resistência linear dos condutores (em Ω/m). Depois de introduzida a geometria, os módulos e argumentos das correntes, bem como o comprimento do vão e o numero de vãos em análise, podemos escolher as coordenadas X, Y e Z do

ponto onde vai ser calculado o campo. Pressionando o botão “Calcular” obtemos os valores relativos ao campo magnético e ao campo eléctrico (ver *figura 0.3*).

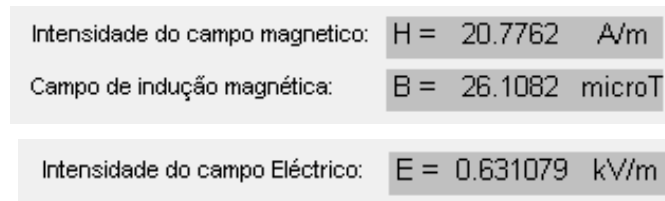


Figura 0.3 Apresentação dos valores obtidos pelo programa

Accionando a opção “Gráfico 2D: Variação de B com a distância em X” obtemos o gráfico com a representação transversal do campo de indução magnética B com $x \in [-50m; 50m]$, e y e z definidos pelo ponto de análise do campo. Com a opção “Gráfico 2D: Variação de E com a distância em X” activada, obtemos o mesmo gráfico mas para a variação do campo eléctrico E. A opção “Gráfico 3D: Variação de B com as distâncias X e Z” abre uma janela com a variação do campo B no espaço com $x \in [-50m; 50m]$, $z \in [0m; 300m]$ e x definido pelo ponto de análise do campo