

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



As Linhas de Alta Tensão e a Saúde Pública

Pedro Gonzaga Paulino Mendes

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

Orientador: Prof. Dr. Hélder Filipe Duarte Leite

Setembro 2010

Resumo

Os Campos Electromagnéticos existem em estado natural no corpo humano e noutros seres vivos, tendo o campo geomagnético a que todos estão expostos uma intensidade superior à da esmagadora maioria das fontes artificiais. Contudo, a partir de certo nível de intensidade, os campos electromagnéticos de origem artificial são capazes de afectar alguns processos fisiológicos do corpo humano, efeitos que levaram a comunidade internacional a instituir limites protectores da saúde pública. Existem defensores que afirmam que os campos electromagnéticos podem ter efeitos crónicos causadores de um aumento da incidência de leucemia infantil linfoblástica aguda, suspeitas estas, que parte da comunidade científica generalizou a um elevado número de patologias e de perigo para a saúde pública, embora reconhecesse que a observação de uma associação persistente, através de estudos epidemiológicos, entre a proximidade de linhas eléctricas e a leucemia infantil, não tem explicação física ou fisiológica experimentalmente comprovada. É objectivo deste estudo fazer uma revisão da literatura criteriosa dos últimos desenvolvimentos da influência das linhas de alta tensão na saúde pública e ajudar no desenvolvimento de procedimentos técnico-científicos que procurem soluções que permitam reduzir eficazmente os campos eléctricos e magnéticos.

Abstract

Electromagnetic fields exist in the natural state in the human body and other living beings, and the geomagnetic field to which all are exposed to have a higher intensity than the overwhelming majority of artificial sources. However, from a certain intensity level, electromagnetic fields of artificial origin are able to affect some physiological processes of the human body, effects that have led the international community to impose protective limits of public health. There are some scientists, who claim that electromagnetic fields can have chronic effects that cause an increased incidence of childhood acute leukemia, these suspicions, which the scientific community has generalized to a large number of diseases and danger to public health, while recognizing that the observation of a persistent association through epidemiological studies, between the proximity of power lines and childhood leukemia, have no physical or physiological explanation experimentally proven. The aim of this study make a judicious literature review of recent developments of the influence of power lines on public health and help to develop technical and scientific procedures to seek solutions that will effectively reduce the electric and magnetic fields.

Agradecimentos

Esta monografia não teria sido possível sem o suporte e carinho de um conjunto de pessoas que gostaria de mencionar e agradecer.

Á minha namorada, pela compreensão, paciência e conforto nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos, a todos eles, pela amizade e apoio incondicional.

Ao meu orientador, o Professor Doutor Hélder Leite, pela sua perseverança e pela confiança depositada em mim em todas as fases deste trabalho.

Por fim, á minha família, em especial aos meus pais e irmãs, pela dedicação constante, carinho e confiança demonstrada durante todo o meu percurso de formação. A eles expresso o meu eterno agradecimento.

Obrigado a todos!

Índice

Resumo	iii
Abstract.....	v
Agradecimentos	vii
Índice.....	ix
Índice de figuras	xiii
Lista de tabelas	xvii
Abreviaturas e Símbolos	xix
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 - Enquadramento da dissertação.....	1
1.2 - Motivação e Objectivos	2
1.3 - Estrutura da dissertação.....	2
Capítulo 2	5
Campo Eléctrico, Campo Magnético e a Saúde	5
2.1 - O Campo Eléctrico	5
2.1.1 - Lei de Coulomb.....	5
2.1.2 - O princípio de sobreposição das cargas.....	6
2.1.3 - O Campo eléctrico.....	7
2.2 - O Campo magnético	7
2.2.1 - Definição do campo magnético	7
2.2.2 - Força magnética sobre uma corrente eléctrica	8
2.3 - Campos Electromagnéticos de Extremamente Baixa Frequência e a Saúde (CEMEBF)	9
2.4 - A posição das principais organizações mundiais responsáveis pela saúde pública em relação aos campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEMEBF)	10
2.4.1- A posição da Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação Não Ionizante (ICNIRP) em 1998 [3]	10
2.4.2- A Recomendação Europeia 519/EC de 1999 e Directiva 2004/40/EC	12
2.4.3- A portaria portuguesa 1421 de 2004	13
2.4.4- A norma norte-americana IEEE C95.6 de 2002 [6]	13
2.4.5- A classificação da Agência Internacional para a Investigação do Cancro (IARC) em 2002	14

2.5 - Estudos sobre os efeitos do Campo Electromagnético de Extremamente Baixa Frequência (CEMEBF) na saúde: Revisão da Literatura	15
2.5.1 - Mecanismos biofísicos [6] [10]	15
i) - Campos magnéticos induzidos.....	16
ii) - Radicais livres	16
iii) - Magnetite	16
2.5.2 - Estudos laboratoriais <i>in vitro</i>	17
2.5.3 - Estudos laboratoriais <i>in vivo</i> [10].....	18
2.5.4 - Estudos epidemiológicos	19
i) - Estudos Norte Americanos de leucemia infantil.....	20
ii) - Estudos Europeus de leucemia infantil.....	23
2.6 - As recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2007	27
2.7 - Sumário.....	29
Capítulo 3	31
Campo electromagnético emitido por cabos subterrâneos e linhas de corrente continua: revisão da literatura.....	31
3.1 - Cabos subterrâneos	31
3.1.1 - Campo eléctrico em cabos subterrâneos.....	32
3.1.2 - Campo magnético em cabos subterrâneos.....	33
3.2 - Linhas HVDC	34
3.2.1 - Campo eléctrico em linhas HVDC.....	38
3.2.2 - Campo eléctrico em Linhas HVDC	38
3.3 - Sumário.....	39
Capítulo 4	41
Equações para o cálculo do campo eléctrico e campo magnético em linhas aéreas de transmissão de energia	41
4.1 - Equações da linha de transmissão.....	41
4.1.1 - A influência da terra: cálculo dos parâmetros C e L.....	44
4.1.2 - Geometria da catenária	46
4.2 - Equações para o cálculo do campo eléctrico em linhas aéreas de transmissão de energia	47
4.3 - Equações para o cálculo do campo magnético em linhas aéreas de transmissão de energia	49
4.4 - Sumário.....	51
Capítulo 5	53
Simulação do campo eléctrico e magnético em linhas aéreas de transmissão de energia	53
5.1 - Campo eléctrico originado por uma linha aérea de 400KV.....	53
5.1.1 - Influência da geometria da linha no cálculo do campo eléctrico.....	55
5.1.2 - A influência da da distância entre condutores de fase no cálculo do campo eléctrico	59
5.1.3 - A influência da distância ao solo dos condutores de fase no cálculo do campo eléctrico	60
5.1.4 - A influência do número de condutores de fase no cálculo do campo eléctrico	61
5.1.5 - Influência da tensão nominal no cálculo do campo eléctrico	62
5.2 - Campo magnético originado por uma linha aérea de 400KV.....	63
5.2.1 - Influência da geometria da linha no cálculo do campo magnético.....	66
5.2.2 - A influência da da distância entre condutores de fase no cálculo do campo magnético.....	68
5.2.3 - A influência da distância ao solo dos condutores de fase no cálculo do campo magnético.....	69
5.2.4 - A influência do número de condutores de fase no cálculo do campo magnético.....	70

5.2.5 - Influência da tensão nominal no cálculo do campo magnético.....	71
5.3 - Sumário	71
Capítulo 6.....	73
Conclusões e Trabalhos futuros	73
6.1 - Conclusões	73
6.2 - Trabalhos futuros	75
Anexos	77
Anexo A - Lei nº 30/2010	77
Referências Bibliográficas.....	79

Índice de figuras

Figura 2.1 - Forças sobre a carga q'	6
Figura 2.2 - Força magnética sobre uma carga.	8
Figura 2.3 - Segmento de um fio condutor com corrente j	8
Figura 2.4 - Níveis de referência do campo magnético em função da frequência. A cheio, o nível de referência para o público em geral, a tracejado o nível de referência para os trabalhadores do sector eléctrico [3].	11
Figura 2.5 - Níveis de referência do campo eléctrico em função da frequência. A cheio, os níveis de referência para o público em geral, a tracejado os níveis de referência para os trabalhadores do sector eléctrico [3].	12
Figura 3.1 - Construção de um cabo subterrâneo revestido por polietileno reticulado (XPLE)	32
Figura 3.2 - Valores típicos do campo magnético para cabos subterrâneos de 400Kv. A azul: cabos subterrâneos enterrados a uma profundidade de 1 metro [17].	33
Figura 3.3 - Valores típicos do campo magnético para cabos subterrâneos de 400Kv, enterrados a diferentes profundidades. A azul: cabos subterrâneos enterrados ao nível da superfície. A verde: cabo subterrâneo enterrado a uma distância não superior a 0,5 metros da superfície. A vermelho: cabo subterrâneo enterrado a uma distância superior a 0,5 metros da superfície [18].	34
Figura 3.4 - Central hidroeléctrica de Itaipu.	35
Figura 3.5 - Esquema unifilar de um STCC unifilar [15].	36
Figura 3.6 - Comparação do custo de investimento de uma linha em corrente alternada e corrente contínua em função do seu comprimento [15]	38
Figura 4.1 - Linha multifilar na presença da terra	42
Figura 4.2 - Superfície para determinação da corrente ao longo da linha.	42
Figura 4.3 - Parâmetros geométricos de uma linha de transmissão multifilar.	44
Figura 4.4 - Parâmetros da catenária	47
Figura 4.5 - Coordenadas necessárias ao cálculo do campo eléctrico originado por um condutor num ponto genérico P (x_p, y_p)	48
Figura 4.6 - Coordenadas necessárias para o cálculo do campo magnético originado pelo condutor genérico K no ponto P	50
Figura 5.1 - Geometria de uma linha aérea em esteira (caso base), vista no poste ($z=0$)	54
Figura 5.2 - Variação do campo eléctrico E com a distância X ($x \in [-50m; 50m]$, $y = 1,75m$), para uma linha aérea em esteira (caso base)	55

Figura 5.3 - Representação geométrica da linha com disposição vertical, vista do poste ($z=0$).....	56
Figura 5.4 - Representação geométrica da uma linha em triângulo, vista do poste ($z=0$).	57
Figura 5.5 - Representação geométrica da uma linha em triângulo invertido, vista do poste ($z=0$)	57
Figura 5.6 - Representação da variação do campo eléctrico E para diferentes geometrias ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$)	58
Figura 5.7 - Representação da distância D na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo eléctrico.	59
Figura 5.8 - Representação da variação do campo eléctrico E com a distância D ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira	59
Figura 5.9 - Representação da distância H na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo eléctrico.	60
Figura 5.10 - Representação da variação do campo eléctrico E com a altura H ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira	61
Figura 5.11 - Representação da variação do campo eléctrico E para diferentes geometrias, com um condutor por fase ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).....	62
Figura 5.12 - Representação da variação do campo eléctrico E para diferentes níveis de tensão nominal, para a linha em esteira ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$)	62
Figura 5.13 - Geometria de uma linha aérea em esteira, sem condutores de guarda (caso base), vista no poste ($z=0$)	63
Figura 5.14 - Variação do campo de indução magnética B com a distância X ($x \in [-50m; 50m]$, $y = 1,75m$), para uma linha aérea em esteira (caso base)	64
Figura 5.15 - Comparação entre a variação do campo de indução magnética B com a distância x ($x \in [-50m; 50m]$, $y = 1,75m$), considerando a linha não uniforme (catenária) e a linha com altura média, para uma linha em esteira	64
Figura 5.16 - Representação da variação do campo de indução magnética B com a distância z ($x = 0m$, $y = 1,75m$, $z \in [-50m; 50m]$), considerando a linha não uniforme (catenária) e a linha com altura média.....	65
Figura 5.17 - Representação geométrica das diferentes configurações de linha em análise, vista do poste ($z=0$). a) Linha na vertical; b) Linha em triângulo; c) Linha em triângulo invertido.....	66
Figura 5.18 - Representação da variação do campo de indução magnética B para diferentes geometrias ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).....	67
Figura 5.19 - Representação da distância D na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo magnético.....	68
Figura 5.20 - Representação da variação do campo de indução magnética B com a distância D ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira.....	68
Figura 5.21 - Representação da distância H na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo magnético.....	69

Figura 5.22 - Representação da variação do campo de indução magnética B com a altura H ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira	69
Figura 5.23 - Representação da variação do campo de indução magnética B para diferentes geometrias, com um condutor por fase ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).....	70
Figura 5.24 - Representação da variação do campo de indução magnética B para diferentes níveis de tensão nominal, para a linha em esteira ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).....	71

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Limites de referência definidos pelo IEEE [6].	14
Tabela 2.2 - Classificação da IARC quanto á carcinogenicidade de determinados agentes [7] [8] [9]	15
Tabela 2.3 - Resultados do estudo de London & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10]	21
Tabela 2.4 - Resultados do estudo de London & al, utilizando o método <i>wire codes</i> , para um grau de confiança de 95% [10].	21
Tabela 2.5 - Resultados do estudo de Martha Linet & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 24 horas, para um grau de confiança de 95 [10].	22
Tabela 2.6 - Resultados do estudo de Martha Linet & al, recorrendo ao método <i>wire codes</i> , para um grau de confiança de 95% [10].	22
Tabela 2.7 - Resultados do estudo de McBride & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 48 horas, para um grau de confiança de 95% [10].	23
Tabela 2.8 - Resultados do estudo de McBride & al, recorrendo ao método <i>wire codes</i> , para um grau de confiança de 95% [10].	23
Tabela 2.9 - Resultados do estudo de Feychting & Ahlbom, com base no cálculo do campo magnético, através de informação histórica das cargas das linhas, para um grau de confiança de 95% [10]	24
Tabela 2.10 - Resultados do estudo de Nielsen & Shulgen, com base no cálculo do campo magnético, através de informação histórica das cargas das linhas, para um grau de confiança de 95% [10]	24
Tabela 2.11 - Resultados do estudo de Tynes & Haldorsen, com base no cálculo do campo magnético, através de informação histórica das cargas das linhas, para um grau de confiança de 95% [10]	25
Tabela 2.12 - Resultados do estudo de Michaelis & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10]	25
Tabela 2.13 - Resultados do estudo da UKCCSI, com base em medição directa do campo magnético durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10]	26
Tabela 2.14 - Resultados do estudo de Schüz & al, com base em medição directa do campo magnético durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10]	26
Tabela 5.1 - Características dos condutores da linha.....	54
Tabela 5.2 - Valores do campo eléctrico obtidos para diferentes geometrias	58
Tabela 5.3 - Valores do campo eléctrico obtidos para diferentes geometrias com 1 condutor por fase	61

Tabela 5.4 - Valores do campo de indução magnética obtidos para diferentes geometrias	67
Tabela 5.5 - Valores do campo de indução magnética obtidos para diferentes geometrias com 1 condutor por fase.....	70

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

CEM	Campos electromagnéticos
CEMEBF	Campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência
DGS	Direcção-Geral da Saúde
EBF	Extremamente baixas frequências
HCC	<i>High current configuration</i>
IARC	Agência Internacional para a Investigação do Cancro
ICNIRP	Comissão Internacional de Protecção contra a radiação não ionizante
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronics Engineers</i>
LILA	Leucemia infantil linfoblástica aguda
LCC	<i>Low current configuration</i>
OMS	Organização Mundial da Saúde
RSLEAT	Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão
SI	Sistema Internacional
STCC	Sistema de transmissão em corrente contínua
UKCCSI	Estudo para o cancro no Reino Unido

Lista de símbolos

q	carga eléctrica
K	constante de proporcionalidade
$F_{1(2)}$	Força sobre a partícula 1 devida á partícula 2
$F_{2(1)}$	Força sobre a partícula 2 devida á partícula 1
r_{12}	Distância entre duas partículas carregadas
\hat{r}_{12}	Vector unitário da direcção de 1 para 2
E	Campo eléctrico
B	Campo de indução magnética
H	Intensidade do campo magnético
v	Velocidade do campo magnético
V	Tensão eléctrica
I	Corrente eléctrica
S	Potência aparente
E_{ef}	Valor eficaz do eléctrico
B_{ef}	Valor eficaz do campo de indução magnética

L	Indutância
C	Capacidade
ω	velocidade angular
f	flecha
d	distância entre dois postes consecutivos
μ_0	Permeabilidade do vazio
ϵ_0	Permissividade do vazio
σ_t	Condutividade eléctrica da terra

Capítulo 1

Introdução

1.1 - Enquadramento da dissertação

A energia eléctrica tem vindo a ser utilizada, com grande vantagem para o Homem, há mais de 100 anos. A sua utilização generalizada está indiscutivelmente na base dos maiores e mais rápidos progressos a que humanidade alguma vez assistiu nos domínios científico, tecnológico económico e social. Poderá afirmar-se, sem receio de exagero, que a utilização generalizada da energia eléctrica representa um virar de página civilizacional impar na história da humanidade.

Á produção, transmissão e utilização da energia eléctrica está associada a geração de campos eléctricos e magnéticos (CEM). De um modo geral a electricidade é fornecida como corrente alternada, no caso de Portugal a uma frequência de 50 Hertz (Hz). Essa frequência coloca os campos gerados pela produção, transmissão e utilização da energia eléctrica no intervalo das extremamente baixas frequências (EBF).

O ser humano encontra-se frequentemente exposto a este tipo de campos, campos electromagnéticos de extremamente baixas frequências (CEMEBF, de 3Hz a 3 kHz), quer no contacto diário com equipamentos eléctricos domésticos e profissionais, quer através das linhas de distribuição e transporte de energia eléctrica. Até, aproximadamente, à década de oitenta do século passado, a principal preocupação relativa aos potenciais efeitos adversos decorrentes da utilização da electricidade concentrava-se, quase exclusivamente, nos riscos de electrocussão associados ao eventual contacto directo ou de incêndio resultante de equipamentos ou instalações defeituosas.

O interesse e preocupação com os CEMEBF foi catalisado pela publicação de um relatório com os resultados de uma investigação epidemiológica realizada numa região dos EUA em 1979 que apontava para uma possível associação entre o cancro infantil e a proximidade das casas com linhas de distribuição de energia. Na sequência da divulgação deste relatório, surgiram suspeitas, em alguns países, de que os CEMEBF poderiam ter efeitos crónicos causadores de um aumento de incidência de leucemia infantil linfoblástica aguda, suspeitas que alguma comunidade científica generalizou a um elevado número de patologias, com o consequente alarme público sobre este tema. Nos anos seguintes na década de 80, e especialmente na de 90, foram realizadas dezenas de estudos epidemiológicos, tanto na

Europa do Norte como na América, alguns de grande envergadura, e também milhares de experiências de natureza laboratorial.

Apesar da diversidade e inconsistência entre as conclusões de alguns dos estudos, a importância destes foi reconhecida pela comunidade internacional, que tem procurado, por um princípio de prudência, instituir limites protectores para a saúde pública.

Sendo generalizadamente reconhecida a existência de um problema de opinião pública nesta matéria é também identificado pela comunidade internacional, nomeadamente pela Organização Mundial de Saúde (OMS), a necessidade de que as entidades responsáveis invistam cuidadosamente na comunicação social, promovendo o aprofundamento, melhor conhecimento e o esclarecimento de todos os aspectos desta temática.

1.2 - Motivação e Objectivos

Este trabalho vai ser dividido em duas partes distintas.

A primeira tem como objectivo fazer uma revisão criteriosa dos últimos desenvolvimentos da influência das linhas de alta tensão na saúde pública, nomeadamente, dar a conhecer a posição das organizações que regem a saúde pública mundial face aos campos electromagnéticos, os estudos efectuados sobre o impacto dos campos originados pelas linhas na saúde, e as medidas de precaução e monitorização adoptadas pelos governos.

A segunda tem como objectivo ajudar no desenvolvimento de procedimentos técnico-científicos que procurem soluções que permitam reduzir eficazmente os campos eléctricos e magnéticos nas linhas, fazendo uma revisão das principais tecnologias de transmissão e dos campos eléctrico e magnético associados. Neste contexto vai ser desenvolvida uma metodologia de cálculo, baseada em equações do campo eléctrico e magnético em condutores e de modelos de configuração de linhas de transmissão, que permite analisar em termos gráficos e numéricos o comportamento do campo eléctrico e magnético na vizinhança de linhas aéreas de alta tensão com diferentes parâmetros geométricos e perfis de tensão.

1.3 - Estrutura da dissertação

A estrutura desta dissertação está organizada em 6 capítulos, tendo como intuito apresentar de forma cuidada cada um dos assuntos a desenvolver. No início desta monografia é apresentado um resumo e um *abstract* onde é feita uma súmula do alcance deste trabalho.

O primeiro capítulo corresponde ao capítulo introdutório, onde se pretende dar a conhecer o alcance dos assuntos a debater, a motivação para a escolha do tema, bem como os seus desafios e uma contextualização na actualidade, da sua relevância.

No segundo capítulo são apresentados os conceitos de campo eléctrico, campo magnético, as problemáticas associadas a estes tipos de campos e a posição das organizações mundiais face á problemática existente.

No terceiro capítulo são apresentadas duas tecnologias de transmissão de energia: cabos subterrâneos de corrente alternada e linhas de corrente contínua (HVDC) no que diz respeito aos campos magnético e eléctrico emitidos por estas.

No capítulo 4 são estudadas as equações que permitem o cálculo eléctrico e magnético em linhas aéreas de transmissão de energia em corrente alternada.

No quinto capítulo é apresentada uma simulação do campo eléctrico e magnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia em corrente alternada, recorrendo a uma metodologia especialmente criada para este trabalho.

O capítulo 6 é o capítulo final, onde se dão a conhecer as principais conclusões deste trabalho de investigação e onde são feitas algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros sobre o tema.

Os anexos complementares á monografia e as referências bibliográficas utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho são apresentados no final.

Capítulo 2

Campo Eléctrico, Campo Magnético e a Saúde

O campo eléctrico e magnético estão presentes no dia-a-dia do ser humano através do uso que se faz da electricidade. Os campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEMEBF), originados por linhas de distribuição e transmissão de energia eléctrica, tem sido apontados por diversos investigadores como potenciais causadores de doenças, nomeadamente, o cancro em várias das suas formas.

Neste capítulo pretende-se dar a conhecer a posição dos principais organismos mundiais responsáveis pela saúde e dos governos face à possível ameaça dos CEMEBF.

2.1 - O Campo Eléctrico

Neste subcapítulo vão-se introduzir alguns conceitos da teoria clássica do electromagnetismo, mais concretamente, dos conceitos que dão origem ao campo eléctrico.

2.1.1 - Lei de Coulomb

A carga eléctrica é uma propriedade da matéria e existe armazenada em grande quantidade nos corpos existentes ao nosso redor. Os átomos são a menor porção em que se pode dividir a matéria e são constituídos por uma nuvem de electrões e por um núcleo, que por sua vez é constituído por protões e neutrões.

Os electrões possuem carga eléctrica negativa, os protões carga eléctrica positiva sendo que os neutrões não têm carga eléctrica. A combinação destas cargas determina a polarização de um corpo. Assim um corpo com mais protões do que electrões tem carga eléctrica positiva, da mesma forma que um corpo com mais electrões do que protões possui carga eléctrica negativa.

Segundo Charles Augustin de Coulomb [1], o módulo da força entre duas cargas eléctricas pontuais (q_1 e q_2) é directamente proporcional ao produto dos valores absolutos das duas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância r entre eles. Esta força pode ser

atractiva ou repulsiva dependendo do sinal das cargas. É atractiva se as cargas tiverem sinais opostos. É repulsiva se as cargas tiverem o mesmo sinal.

A Lei de Coulomb [1] pode ser definida pela seguinte expressão:

$$F_{2(1)} = k \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \hat{r}_{12} = -F_{1(2)} \quad (\text{Eq.2.1})$$

onde $F_{1(2)}$ é a força sobre a partícula 1, devida à partícula 2, r_{12} é a distância entre as duas partículas carregadas, \hat{r}_{12} é vector unitário da direcção de 1 para 2 e k é a constante de proporcionalidade que depende da unidade de carga eléctrica. Como no Sistema Internacional (SI) a unidade de carga eléctrica é o Coulomb, a constante de proporcionalidade é escrita da seguinte forma:

$$k \equiv \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 10^{-7} c^2 \text{ N.m}^2/\text{C}^2 \quad (\text{Eq.2.2})$$

onde c é o valor numérico da velocidade da luz no vácuo e ϵ_0 a permissividade do vazio. As forças de interacção entre duas cargas [1], em newton (N) são calculadas da seguinte forma:

$$F_{2(1)} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(r_{12})^2} \hat{r}_{12} = -F_{1(2)} \quad (\text{Eq.2.3})$$

Em que $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ (F/m)}$

2.1.2 - O princípio de sobreposição de cargas

O princípio da sobreposição aplica-se à situação em que existe mais de duas cargas eléctricas no vazio. Neste caso a força electrostática que actua sobre cada uma das cargas é a soma vectorial das suas interacções com todas as outras cargas, obtidas aplicando a cada par a lei de Coulomb.

Assim a força electrostática aplicada a uma carga i é dada por [1]:

$$F_i = \sum_{j \neq i} F_{i(j)} = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j \neq i} \frac{q_j}{(r_{ji})^2} \hat{r}_{ji} \quad (\text{Eq.2.4})$$

Na figura seguinte encontram-se representadas duas cargas pontuais $+q$ e $-q$, separadas por uma distância $2d$ (Figura 2.1).

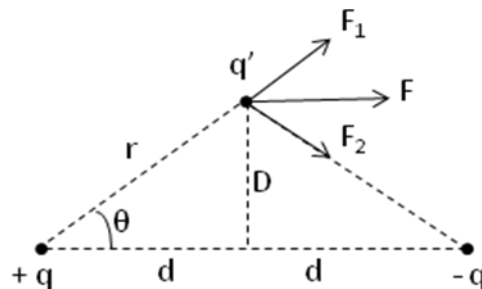


Figura 2.1 - Forças sobre a carga q' .

Existe ainda uma terceira carga q' , situada a uma distância D (Figura 2.1), da mediatriz do segmento de recta que separa a carga $+q$ da carga $-q$.

As forças F_1 e F_2 representam as forças electrostáticas exercidas sobre q' por $+q$ e $-q$, respectivamente. O módulo da força resultante F é:

$$|F| = 2|F_1|\cos\theta = 2|F_1|d/r \quad (\text{Eq.2.5})$$

Através da lei de Coulomb, resulta:

$$|F| = \frac{qq'}{2\pi\epsilon_0} \frac{d}{r^3} = \frac{qq'}{2\pi\epsilon_0} \frac{d}{(d^2+D^2)^{3/2}} \quad (\text{Eq.2.6})$$

2.1.3 - O campo eléctrico

Pelo princípio da sobreposição, a força electrostática exercida sobre uma carga pontual é proporcional a q_i , e pode ser escrita [1] como: [ver Eq.2.4]

$$F_i = q_i E_i \quad (\text{Eq.2.7})$$

onde:

$$E_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{j \neq i} \frac{q_j}{(r_{ji})^2} \hat{r}_{ji} \quad (\text{Eq.2.8})$$

é o campo eléctrico, sentido pela carga através da força. O campo representa a força por unidade de carga actuando sobre a posição onde está colocada. A unidade do campo eléctrico é N/C ou V/m.

Aplicando a expressão anterior ao exemplo da Figura 2.1, o campo eléctrico E' sentido pela carga q' através da força F é representado da seguinte forma: [ver (2.6)]

$$E' = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \frac{d}{(d^2+D^2)^{3/2}} \quad (\text{Eq.2.9})$$

Através do princípio da sobreposição, pode passar-se da descrição em termos de cargas pontuais à descrição macroscópica em termos de cargas distribuídas sobre volumes. Este conceito será aplicado mais à frente, aquando do cálculo do campo electromagnético em condutor.

2.2 - O Campo Magnético

O campo magnético está associado ao movimento de cargas. Neste subcapítulo pretende-se fazer uma introdução ao campo magnético e aos conceitos básicos que lhe são inerentes.

2.2.1 - Definição de campo magnético

Para definir o campo eléctrico E , considera-se a força $F = qE$ que actua sobre uma carga pontual q , fixa, colocada num campo eléctrico. Já o campo magnético exerce forças sobre cargas em movimento. Foi verificado experimentalmente que a força é proporcional à carga e ao módulo da velocidade da partícula, sendo a direcção da força perpendicular às direcções da velocidade v do campo magnético. A força F é determinada por [1]:

$$F = kqv \times B \quad (\text{Eq.2.10})$$

onde k é uma constante positiva, igual a um, v a velocidade a que se desloca a partícula de carga q em relação a um referencial inercial e B o campo magnético.

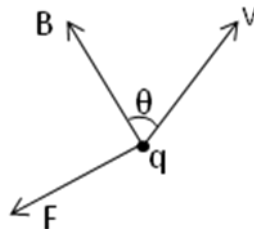


Figura 2.2 - Força magnética sobre uma carga.

No Sistema Internacional (SI) a unidade do campo magnético B é tesla (T).

Considerando $|v| = 1 \text{ m/s}$, $q = 1 \text{ C}$ e $|F| = 1 \text{ N}$ verifica-se que:

$$1T = 1 \frac{\text{N/C}}{\text{m/s}} \quad (\text{Eq.2.11})$$

Considerando uma situação em que além de existir campo magnético B a actuar sobre uma carga q , existir também campo eléctrico E , a força resultante passa a ser:

$$F = q(E + v \times B) \quad (\text{Eq.2.12})$$

2.2.2 - Força magnética sobre uma corrente eléctrica

As cargas em movimento produzem campo magnético. Sendo a corrente eléctrica um fluxo ordenado de cargas, a existência de corrente eléctrica traduz-se num aparecimento do campo magnético.

Considerando, por exemplo, um segmento infinitésimo dl de um fio condutor de secção transversal A (Figura 2.3)

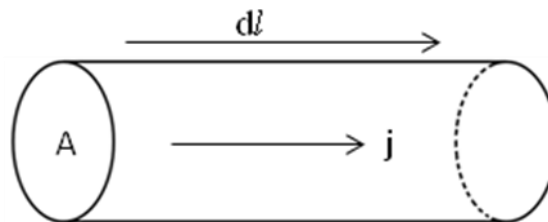


Figura 2.3 - Segmento de um fio condutor com corrente j .

percorrido por uma corrente eléctrica de densidade j e supondo que se trata de um fio condutor metálico, onde os portadores de carga são electrões livres sabe-se que:

$$j = -ne\langle v \rangle \quad (\text{Eq.2.13})$$

Onde n é o número de electrões livres por unidade de volume e $\langle v \rangle$, a velocidade média dos electrões associada à corrente.

Num campo magnético B , a força média sobre cada electrão livre será então $-e\langle v \rangle \times B$, e a densidade da força f exercida pelo campo magnético por uma corrente será:

$$f = j \times B = -ne\langle v \rangle \times B \quad (\text{Eq.2.14})$$

Assim, a força total dF exercida sobre os electrões livres contidos no volume Adl do condutor é calculada através de:

$$dF = fAdl = jAdl \times B \quad (\text{Eq.2.15})$$

Sendo a intensidade da corrente $i = jA$:

$$dF = idl \times B \quad (\text{Eq.2.16})$$

Sendo dF a força exercida pelo campo magnético sobre o trecho dl do fio condutor.

Este exemplo será estudado mais tarde, em pormenor, aquando do cálculo do campo electromagnético num condutor.

2.3 - Campos Electromagnéticos de Extremamente Baixa Frequência e a Saúde (CEMEBF)

Os CEMEBF correspondem a campos electromagnéticos com frequências que variam de 3Hz a 3kHz [2].

O ser humano encontra-se frequentemente exposto a este tipo de campos, quer no contacto diário com electrodomésticos nas suas casas, quer através das linhas de distribuição e transporte de energia eléctrica.

Estes campos têm um carácter não-ionizante, pelo que não são susceptíveis de degradar as células. No entanto, a partir de certos níveis de intensidade, e segundo diversos estudos, os CEMEBF são capazes de afectar determinados processos fisiológicos do corpo humano, denominados efeitos agudos.

Estes estudos foram reconhecidos pela comunidade internacional, que tem procurado, desde logo, instituir limites protectores para a saúde pública.

Em 1996, a Organização Mundial da Saúde (OMS) em conjunto com a Comissão Internacional de Protecção contra a radiação não ionizante (ICNIRP) e a Agência Internacional para a Investigação do Cancro, entre outras, iniciaram um projecto de investigação, denominado “Projecto Internacional de Campos ElectroMagnéticos (CEM)” para investigar os potenciais riscos para a saúde associados a tecnologias emissoras de CEM [2].

Em 1998, a ICNIRP definiu através de um guia, valores limitadores para a exposição aos CEMEBF, que foram adoptados e convertidos na recomendação do Conselho Europeu 519/EC de 1999, e mais tarde pela legislação portuguesa em 2004, através da portaria 1421 de 2004. Os valores definidos pela ICNIRP são muito inferiores aos valores para os quais há registo de danos para a saúde.

Fora da Europa, nomeadamente na América do Norte, tem sido adoptados valores estabelecidos pelo Institute of Electric and Electronics Engineers (IEEE), valores estes, muito superiores aos valores limite estipulados pela ICNIRP.

Nos subcapítulos posteriores, serão discutidas as diversas posições das instituições mundiais responsáveis pela saúde pública face aos CEMEBF e os diferentes estudos sobre os efeitos crónicos da exposição aos CEMEBF.

2.4 - A posição das principais organizações mundiais responsáveis pela saúde pública em relação aos campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEMEBF)

Para fazer face às inúmeras suspeitas levantadas por diversos cientistas sobre os possíveis malefícios da exposição aos CEMEBF, os organismos internacionais que regem a saúde pública em conjunto com a comunidade científica mundial têm procurado estabelecer medidas que procurem salvaguardar e alertar as populações e os seus governos dos riscos dos CEMEBF.

Neste subcapítulo serão mencionadas as posições de diferentes entidades responsáveis pela saúde pública face aos riscos para a saúde da exposição electromagnética de extremamente baixa frequência.

2.4.1 - A posição da Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação Não Ionizante (ICNIRP) em 1998 [3]

Em 1998 a ICNIRP publicou um guia, onde define os limites básicos e valores de referência para o campo eléctrico e magnético para o público em geral e para trabalhadores do sector eléctrico. De acordo com estudos realizados para campos electromagnéticos gerados á frequência industrial a ICNIRP definiu, como limite para a densidade de corrente eléctrica no corpo humano 10 mA/m^2 , sendo que este limite corresponde ao valor mínimo para o qual foram identificados efeitos para a fisiologia humana, nomeadamente ao nível dos sistema nervoso. Este valor foi estabelecido como o máximo recomendável para os trabalhadores do sector eléctrico.

Para o público em geral, considerando que não têm nenhuma formação específica sobre os riscos inerentes á electricidade, a ICNIRP considerou que o referido limite deveria ser reforçado por um factor de segurança e fixou o valor em 2 mA/m^2 .

Para calcular os valores do campo magnético associados aos limites de 2 e 10 mA/m^2 , o ICNIRP, utiliza um modelo simples, em que considera que o corpo tem uma condutividade homogénea e isotrópica, considerando simples contornos circulares para estimar as correntes induzidas em diferentes órgãos e regiões do corpo.

Outros modelos mais exactos não conduziram a resultados muito diferentes o que levou a ICNIRP a considerar este modelo e a definir como valores de referência para o campo

magnético 100 e 500 μT , para o público em geral e para os trabalhadores da indústria eléctrica, respectivamente. A ICNIRP admite que os valores de referência sejam ultrapassados, desde que, sejam respeitados os limites básicos.

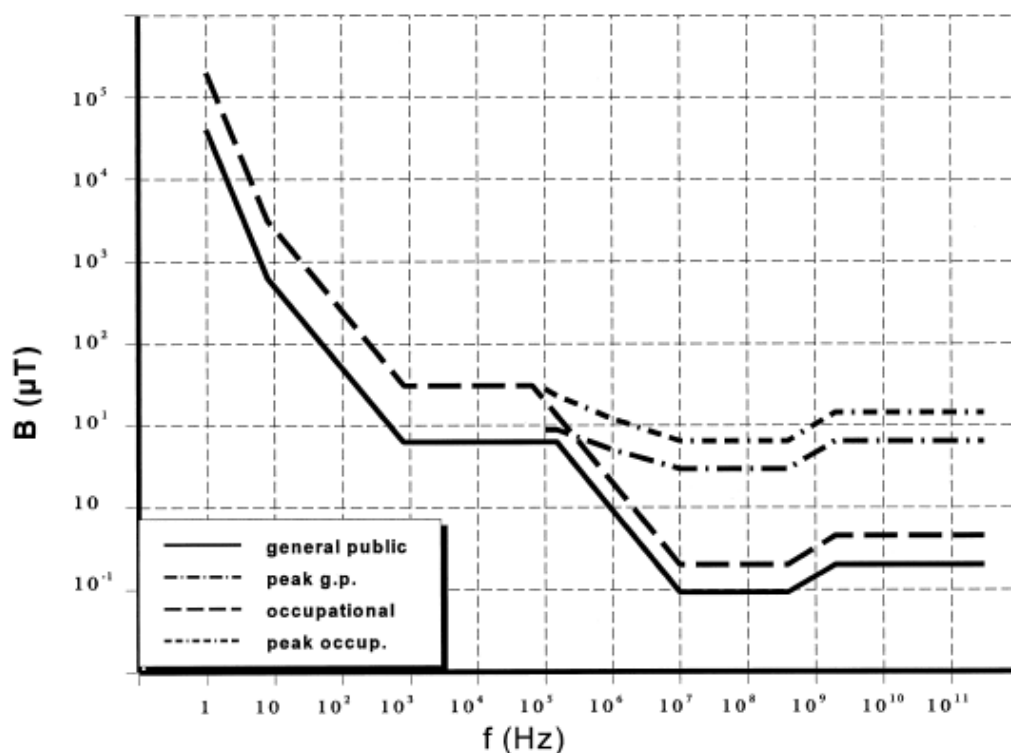


Figura 2.4 - Níveis de referência do campo magnético em função da frequência. A cheio, o nível de referência para o público em geral, a tracejado o nível de referência para os trabalhadores do sector eléctrico [3].

Para o campo eléctrico a ICNIRP considera que os modelos de cálculo devem ter em conta a variação da carga eléctrica superficial, dependendo das condições de exposição e do tamanho, forma ou posição do corpo em causa, tendo como resultado uma distribuição variável não uniforme das correntes induzidas no corpo.

Como valor de referência para o campo eléctrico o ICNIRP considerou o valor de 5 KV/m, para a exposição ao público em geral e corresponde nas piores circunstâncias, a uma densidade de corrente induzida de 2 mA/m².

Para os trabalhadores do sector eléctrico definiu-se o valor de referência de 10 KV/m.

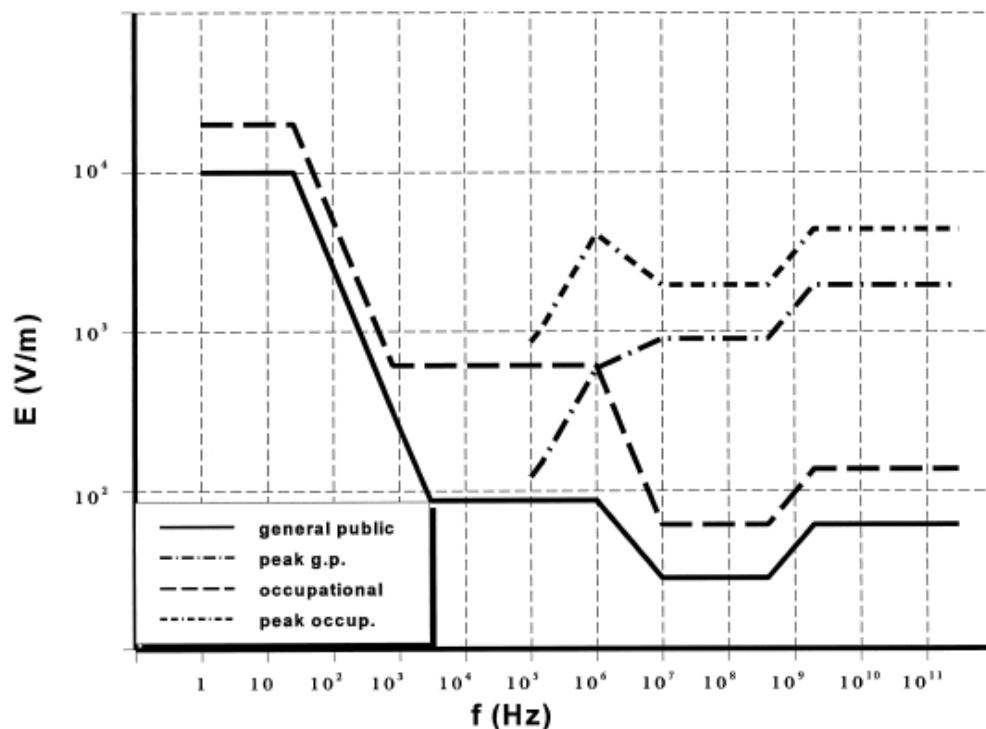


Figura 2.5 - Níveis de referência do campo eléctrico em função da frequência. A cheio, os níveis de referência para o público em geral, a tracejado os níveis de referência para os trabalhadores do sector eléctrico [3].

2.4.2 - A Recomendação Europeia 519/EC de 1999 e Directiva 2004/40/EC

Em 1999, o jornal das Comunidades Europeias publicou uma recomendação do conselho europeu relativa à limitação da exposição da população aos campos electromagnéticos (0 Hz – 300 GHz).

Segundo a recomendação publicada os Estados-Membros deverão “aplicar medidas respeitantes a fontes ou práticas que dêem origem à exposição à radiação electromagnética da população quando o tempo de exposição for significativo, com excepção da exposição para fins médicos, devendo, nesse caso, ser devidamente avaliados os riscos e benefícios da exposição que ultrapasse as restrições básicas” e “...ter em conta os níveis de referência constantes do anexo III para efeitos de avaliação da exposição ou, caso existam, na medida em que sejam reconhecidas pelo Estado-Membro, normas europeias ou nacionais baseadas em procedimentos de medição e cálculo reconhecidos e provados cientificamente, destinados a avaliar a conformidade com as restrições básicas” [4].

É de referir que os níveis de referência constantes do anexo III, correspondem aos valores indicados pela ICNRIP no guia publicado em 1998.

Mais tarde em Abril de 2004, o Parlamento Europeu definiu uma Directiva, no que diz respeito à exposição electromagnética em ambientes ocupacionais, de forma a atribuir um carácter obrigatório à recomendação de 1999, por parte de todos os Estados-Membros da União Europeia.

2.4.3 - A portaria portuguesa 1421 de 2004

A 23 de Novembro de 2004, o Diário da República I-Série B nº 275 publicou a portaria nº 1421/2004 que adopta para Portugal a recomendação 519/EC/1999 do Conselho Europeu.

Os valores de limitação básica e de referência publicados nesta portaria são os mesmos valores que a ICNRIP publicou no seu guia em 1998, ou seja no que se refere à frequência industrial de 50Hz utilizada na distribuição e transporte de energia eléctrica [5]:

Para a população em geral

- O limite básico estabelecido, para a densidade de corrente eléctrica no corpo humano é de 2 mA/m².
- O valor de referência para o campo magnético é 100 µT.
- O valor de referência para o campo eléctrico é 5kV/m.

Para os trabalhadores do sector eléctrico

- O limite básico estabelecido, para a densidade de corrente eléctrica no corpo humano é de 10 mA/m².
- O valor de referência para o campo magnético é 500 µT.
- O valor de referência para o campo eléctrico é 10 kV/m.

Mais recentemente, em Setembro de 2010 foi publicada no Diário da República a lei de “protecção contra a exposição aos campos eléctricos e magnéticos derivados de linhas de instalações e de equipamentos eléctricos” que visa salvaguardar a saúde pública e o ambiente. A Direcção-Geral da Saúde (DGS) passa a monitorizar os efeitos da exposição a equipamentos eléctricos e magnéticos derivados de linhas, de instalações ou equipamentos de alta e muito alta tensão na população.

Os artigos mais relevantes desta lei, no contexto deste trabalho, podem ser analisados no Anexo A.

2.4.4 - A norma norte-americana IEEE C95.6 de 2002 [6]

Em 2002 nos EUA, o IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineers publicou a norma C95.6 denominada “IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz”, que estabelece limites para os campos electromagnéticos baseados nos seus efeitos agudos.

Ao contrário da ICNRIP, o IEEE toma como grandeza determinante de electro-estimulação, o valor do próprio campo eléctrico e não a densidade de corrente eléctrica nos tecidos humanos.

Os modelos anatómicos a partir dos quais são calculados os campos induzidos no corpo humano, são diferentes para o IEEE e para a ICNRIP, o que leva a que os valores de referência dos campos associados aos limites básicos sejam calculados por um processo diferente, conduzindo a valores diferentes.

Os valores de referência, á frequência industrial de 60 Hz, (visto que, nos EUA o transporte e distribuição de energia é efectuado a 60Hz) estipulado pelo IEEE, estão representados na tabela 2.1.

Como se pode verificar, os valores definidos pelo Institute of Electric and Electronics Engineers (IEEE) são muito mais permissivos do que os valores do ICNRIP, nomeadamente no que diz respeito ao limite dos campos magnéticos a que os profissionais do sector eléctrico e o público em geral estão sujeitos.

Tabela 2.1 – Limites de referência definidos pelo IEEE [6].

IEEE (2002): Valores de referência - 60Hz	
Campo eléctrico para o público em geral	5 kV/m
Campo eléctrico para trabalhadores do sector eléctrico	20 kV/m
Campo magnético para o público em geral	904 μ T
Campo magnético para trabalhadores do sector eléctrico	2710 μ T

2.4.5 - A classificação da Agência Internacional para a Investigação do Cancro (IARC) em 2002

Entre 19 e 26 de Junho de 2001, o “Grupo de Trabalho para a Avaliação dos Riscos Carcinogénicos para os Humanos” do IARC, reuniu-se em Lyon, para discutir e rever estudos relacionados com a carcinogenicidade dos campos eléctricos e magnéticos estáticos de extremamente baixa frequência.

Do resultado dessa reunião o IARC publicou em 2002 uma monografia, denominada “IARC monographs on the evaluation of cancerinogenic risks to humans”.

Nesta monografia, o IARC classifica os campos magnéticos de extremamente baixa frequência (EBF) como “possível carcinogénico” [7].

Esta classificação segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) “...é usada para denotar um agente para o qual existe uma limitada evidência de carcinogenes em humanos e uma menos que suficiente evidência para carcinogenes em experimentos com animais (outros exemplos incluem café e emissões em processos de soldagem) ”.

É de notar que, segundo a própria IARC, a expressão “agente para o qual existe uma limitada evidência de carcinogenes em humanos” indica que ou os estudos subjacentes são de insuficientes qualidade, consistência ou significado estatístico, ou que não existem quaisquer dados sobre cancro para permitirem uma conclusão.

Esta classificação foi baseada em análise de dados agregados de estudos epidemiológicos sobre leucemia infantil, cujo assunto se discutirá mais á frente, demonstrando um padrão consistente de incremento de duas vezes na leucemia infantil associado a uma exposição média residencial, a campos magnéticos de intensidade, acima de 0,3 a 0,4 μ T. O Grupo de trabalho concluiu que estudos adicionais desde então não modificaram esta classificação.

Quanto aos campos eléctricos de EBF a IARC classifica-os como “não classificáveis quanto á carcinogenicidade humana”.

Na tabela 2.2 seguinte pode-se observar alguns exemplos de agentes conhecidos que já foram classificados pela IARC.

Tabela 2.2 – Classificação da IARC quanto á carcinogenicidade de determinados agentes [7] [8] [9].

Grupo	Classificação	Exemplos de agentes
1	Carcinogénico para humanos	Amianto Gás mostarda Tabaco Radiação Gama
2A	Provavelmente carcinogénico	Gases de motor Diesel Solários Radiação ultravioleta Formaldeído
2B	Possivelmente carcinogénico para humanos	Café Estireno Gases de motor a Gasolina Gases de soldadura Campos magnéticos de EBF
3	Não classificável quanto a carcinogenicidade	Chá Dióxido de enxofre Campos eléctricos de EBF
4	Provavelmente não carcinogénico	Caprolactame

Como se pode observar pela tabela anterior os campos magnéticos de EBF estão no mesmo grupo que o café, gases de soldadura entre outros. A possibilidade de serem carcinogénicos, significa apenas, e segundo a IARC/OMS que ainda não foi provada a sua inocuidade.

2.5 - Estudos sobre os efeitos do Campo Electromagnético de Extremamente Baixa Frequência (CEMEBF) na saúde: Revisão da Literatura

Os CEMEBF, tem sido associados á incidência e agravamento de inúmeras doenças, entra elas a leucemia infantil linfoblástica aguda (LILA). Diversas organizações mundiais têm elaborado programas de investigação, com objectivo de averiguar o real impacto dos CEMEBF na saúde pública.

Neste capítulo serão evocados os diferentes tipos de estudos realizados para averiguar os efeitos dos CEMEBF para a saúde.

2.5.1 - Mecanismos biofísicos [6] [10]

Existem efeitos biológicos estabelecidos devido à exposição aguda a níveis elevados de campos electromagnéticos que podem ser explicados através de mecanismos biofísicos conhecidos.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estudou vários mecanismos biofísicos, que de forma directa ou indirecta, têm sido apontados como plausíveis para explicar eventuais interacções entre os campos eléctrico e magnético e o corpo humano, em particular se um “sinal” gerado por um processo biológico pela exposição a um campo poder ser descriminado através de ruído aleatório inerente á fisiologia celular e o mecanismo desafiar os princípios científicos e o conhecimento científico actual.

Muitos mecanismos só se tornam plausíveis para campos acima de uma certa intensidade. No entanto, a ausência de identificação dos mecanismos plausíveis não exclui a possibilidade de efeitos na saúde, mesmo para níveis de intensidade muito baixos de campo, desde que os princípios científicos básicos sejam respeitados.

Dos vários mecanismos propostos para a interacção directa dos campos eléctricos e magnético com o corpo humano, destacam-se três por operarem potencialmente a níveis de campo inferiores ao dos outros: campos magnéticos induzidos em redes neuronais, radicais livres e magnetite.

i) Campos magnéticos induzidos

Os campos magnéticos induzidos nos tecidos das células por exposição aos campos eléctricos ou magnéticos da corrente, estimulam directamente as fibras de mielina dos nervos de uma forma plausível, quando a intensidade do campo eléctrico interno for superior a alguns V/m. Campos de baixa intensidade podem afectar a transmissão sináptica em redes neuronais, ao contrário do que sucede em células simples. Este processamento de sinal por sistemas nervosos é comumente usado por organismos multicelulares para detectar sinais ambientais de baixa intensidade. Foi sugerido inicialmente, um limite de 1mV/m nessa capacidade discriminatória das redes neuronais mas, com base em estudos recentes parece mais provável que esse limite seja de 10 a 100mV/m.

ii) Radicais livres

O mecanismo de radicais livres ou par de radicais é um processo aceite pela comunidade científica, em que campos magnéticos podem afectar tipos específicos de reacções químicas. Geralmente aumentam a concentração de radicais livres reactivos em campos de baixa intensidade, diminuindo-a em campos maior intensidade. Este aumento foi detectado em campos magnéticos inferiores a 1mT. Existem alguns dados experimentais que associam este mecanismo á navegação migratória de aves. Quer por fundamentação teórica quer porque as mudanças produzidas pelos campos eléctricos e magnéticos de baixa frequência e estáticos são similares, considera-se que, campos á frequência industrial cujo campo é muito inferior ao campo geomagnético, não têm grande significado biológico.

iii) Magnetite

Vestígios de cristais de magnetite, pequenos cristais ferromagnéticos de várias formas de óxido de ferro, podem ser detectados em tecidos animais e humanos. Tal como os radicais livres, têm sido associados á orientação e navegação migratória das aves, apesar disso, a presença de quantidades mínimas de magnetite no cérebro humano não lhe confere a

capacidade para detectar o campo geomagnético. Cálculos baseados em suposições extremas sugerem um limite, para que haja efeitos dos CEMEBF sobre os cristais de magnetite, de $5\mu\text{T}$.

Outras interações biofísicas directas dos campos, tais como a quebra de ligações químicas, as forças de partículas carregadas e vários mecanismos de ressonância, não são considerados, como podendo fornecer explicações plausíveis para as interações dos níveis de campo encontrados nos ambientes públicos e ocupacionais.

Quanto á interacção indirecta dos campos com o ser humano, a carga eléctrica de superfície induzida por campos eléctricos pode ser percebida, e pode resultar em micro choques dolorosos quando em contacto com um objecto condutor. Isto produz pequenos campos eléctricos, possivelmente acima dos níveis de ruído, na medula óssea. Contudo, não existem estudos, que provem, que estes pequenos campos apresentam riscos para a saúde.

As linhas de alta tensão produzem nuvens de iões electricamente carregadas, conhecidas como consequência do efeito coroa. Há teses que defendem que essa ionização poderá aumentar a deposição de poluentes, transportados por via aérea, na pele e dentro do corpo, através das vias respiratórias, poluentes estes, com efeitos nocivos para a saúde. Contudo, parece muito improvável que os iões do efeito coroa, tenham mais do que um pequeno efeito, ou mesmo algum, sobre os riscos de saúde a longo prazo, mesmo sobre indivíduos mais expostos.

Segundo a OMS nenhum dos três mecanismos directos estudados anteriormente, parece plausível de aumentar a incidência de doenças, para os níveis de exposição electromagnética a que a maioria das pessoas está sujeita. De facto, estes mecanismos só se tornam plausíveis para níveis de intensidade muito elevados, e os mecanismos indirectos não foram ainda suficientemente investigados. Esta dificuldade em identificar um mecanismo plausível não elimina, no entanto, a possibilidade de efeitos adversos para a saúde, mas cria a necessidade de evidências mais fortes por parte da biologia e da epidemiologia.

2.5.2 - Estudos laboratoriais *in vitro*

As experiências *in vitro*, são experiências com culturas de células e constituem modelos biológicos simplificados, permitindo analisar em detalhe os mecanismos de acção dos organismos. Ao contrário do que acontece nas experiências *in vivo*, estes métodos não têm em conta os mecanismos de regulação permanente presentes nos organismos. Apesar disso, os modelos *in vitro* podem ser úteis para a investigação de numerosos aspectos moleculares dos carcinógenos.

Estes estudos focam-se sobretudo, na fase de formação dos tumores, com vista a entender qual a interferência dos CEMEBF no reconhecimento celular e no sistema imunitário.

Na maioria dos estudos efectuados sobre a exposição de células aos CEMEBF, não mostraram indução de genotoxicidade para intensidades de campo inferiores a 50mT .

A única excepção, em estudos recentes, foi a evidência de danos no ADN por campos de intensidade tão baixas como $35\mu\text{T}$. Contudo estes estudos ainda estão em avaliação até á data (2007), não tendo ainda sido replicados por outros laboratórios, e a compreensão dos seus resultados ainda está incompleta. Segundo outros estudos, há também uma evidência crescente que os CEMEBF podem interagir com agentes prejudiciais para o ADN [10].

Não há, no entanto, nenhuma evidência clara de activação dos genes associados ao controlo do ciclo de vida das células. Apesar disso, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), devem continuar a fazer-se estudos sistemáticos analisando a resposta do genoma completo.

Muitos outros estudos envolvendo células têm sido efectuados, por exemplo sobre proliferação celular, apoptose, sinalização por cálcio, comunicação intercelular, expressão proteica aos choques térmicos e transformações malignas, não tendo no entanto, produzido resultados consistentes e conclusivos.

2.5.3 - Estudos laboratoriais *in vivo* [10]

As experiências *in vivo* utilizam animais de laboratório, de modo a investigar os mecanismos do efeito a estudar sobre os animais. A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda que a extrapolação da observação em modelos animais para o homem seja feita com devidas precauções.

Nas experiências *in vivo*, os mecanismos de regulação dos animais estão presentes e os animais são sujeitos á investigação durante todo o seu período de vida, pelo que os estudos com animais, assumem um papel de maior preponderância quando comparados com os modelos celulares, na avaliação de riscos para a saúde.

Os CEMEBF têm sido apontados como tendo efeitos crónicos causadores de um aumento da incidência da forma mais comum de leucemia infantil, a leucemia infantil linfoblástica aguda (LILA), no entanto, e segundo a OMS, não existe nenhum modelo animal adequado para este tipo de leucemia, pelo que, não é possível associar a leucemia infantil á exposição aos CEMEBF.

Três estudos independentes, em grande escala, utilizando ratos de laboratório, não forneceram nenhuma evidência científica dos efeitos dos CEMEBF na incidência de tumores mamários espontâneos. A maior parte dos estudos não relata qualquer efeito dos CEMEBF na leucemia ou em linfomas em modelos com roedores. Diversos estudos a larga escala e de longo prazo com roedores não demonstraram nenhum aumento consistente de qualquer tipo de cancro, inclusive tumores no sangue, mamários, cerebrais e de pele [10].

Um número substancial de estudos examinou os efeitos dos CEMEBF em tumores mamários quimicamente induzidos em ratos. Foram obtidos resultados inconsistentes que podem ser devidos inteiramente, ou em parte, às diferenças entre protocolos experimentais, tais como o uso de substratos específicos. A maioria dos estudos sobre os efeitos da exposição aos CEMEBF em modelos quimicamente induzidos, ou induzidos por radiação de leucemia linfoma tiveram resultados negativos. Estudos de lesões pré-neoplásticas, tumores de pele quimicamente induzidos e tumores do cérebro relataram resultados predominantemente negativos. Apenas um estudo reportou uma aceleração da génese, de um tumor de pele induzido por radiações ultra-violetas, pela exposição aos CEMEBF.

Dois grupos de investigação relataram um aumento de rupturas da sequência do ADN, no tecido do cérebro, na sequência da exposição *in vivo* a CEMEBF. No entanto, outros grupos utilizando uma variedade de modelos de genotoxicidade diferentes, em roedores, não verificaram nenhuma evidência de efeitos genotóxicos.

Segundo a OMS, e com base em todas as investigações baseadas em modelos animais vivos, não há nenhuma evidência científica que prove que a simples exposição aos CEMEBF seja causadora de tumores. Por outro lado, a evidência de que a exposição aos CEMEBF possa

agravar o desenvolvimento de tumores em combinação com carcinógenos identificados não é considerada adequada pela mesma organização.

2.5.4 - Estudos epidemiológicos

A epidemiologia é a ciência que estuda as epidemias, que tem como finalidade estabelecer relações entre o aparecimento e a frequência das patologias e os factores do ambiente, comportamentos humanos e modo de vida das populações.

É uma ciência de observação, pelo que o trabalho de campo é um factor fundamental na observação directa de como uma determinada população em estudo vive. A partir dos dados recolhidos através do trabalho efectuado junto das populações, a epidemiologia tenta estabelecer relações a nível estatístico que deverão ser interpretadas, tendo em conta todos as variáveis que influenciam o meio em estudo.

Segundo Bradford Hill, um estudo epidemiológico só pode indicar uma relação, e não, em geral uma causalidade. Para que o estudo seja aceite como indicando causalidade, é necessário que a relação observada verifique determinados critérios, “Critérios de Bradford Hill” de 1965, dos quais se destacam [6] [10]:

- Consistência e não enviesamento dos resultados: Confirmação da associação por investigadores diferentes, em populações diferentes, usando métodos diferentes.
- Gradiente biológico (relação entre a dose e a resposta): encontrando um relacionamento quantitativo entre o factor e a frequência da doença. A intensidade e a duração da exposição devem poder ser medidas.
- Especificidade: se o factor determinante que está a ser estudado puder ser isolado de outros, e se se puder mostrar que produz mudanças na incidência da doença. Por exemplo, se se puder mostrar que o cancro da tiróide tem uma incidência mais elevada associada especificamente com o fluoreto, isto é convincente da evidência de uma causalidade.
- Coerência com a base biológica e o conhecimento precedente: a evidência deve ajustar-se aos factos que seensem estar relacionados.

A questão levantada sobre os possíveis malefícios da exposição electromagnética foi baseada em estudos epidemiológicos, nomeadamente um estudo onde foi investigado o risco de cancro, em especial o de leucemia infantil, efectuado numa zona residencial situada junto de linhas de transmissão de energia.

Muitos outros estudos epidemiológicos têm sido realizados, desde exposições profissionais, a exposições residenciais aos Campos ElectroMagnéticos de Extremamente Baixa Frequência (CEMEBF) avaliando a incidência de variadíssimos tipos de tumores e de patologias não cancerígenas como a depressão e suicídio.

Neste subcapítulo, focar-se-ão, apenas, os estudos epidemiológicos onde foram investigados o risco de leucemia infantil associado á exposição aos CEMEBF, e cujos resultados contribuíram para a análise estratégica da Agência Internacional para a Investigação do Cancro (IARC) que resultou na monografia publicada em 2002, mais concretamente na classificação dos campos magnéticos como “possivelmente cancerígeno”. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS) os novos estudos publicados após a monografia de 2002

da IARC não alteram a conclusão de que a evidência total para uma associação entre os CEMEBF e o risco desta doença permanece inadequado.

i) Estudos Norte Americanos de leucemia infantil

O primeiro estudo epidemiológico associando a exposição aos CEMEBF à incidência de leucemia infantil foi publicado por Nancy Wertheimer e Ed Leeper, no Colorado, EUA, em 1979.

Wertheimer recebeu, como sugestão de pesquisa, a procura de factores ambientais que se pudessem relacionar com a leucemia infantil. A dada altura da sua pesquisa a epidemiologista, observou que na proximidade das casas de Denver, Colorado, havia por norma linhas eléctricas e transformadores, pelo que decidiu avaliar uma possível relação entre estes e a incidência da leucemia.

Nancy Wertheimer e o seu colega avaliaram um total de 155 casos de leucemia infantil, 92 destes associando-os a LCC (low current configuration), em português circuitos de baixa intensidade de corrente eléctrica e os restantes 63 a HCC (high current configuration), em português circuitos de alta intensidade de corrente eléctrica [11].

As classificações dos condutores, por parte da investigadora basearam-se, no nível de tensão, espessura e proximidade das residências. Em Denver, é usual montar-se um pequeno transformador sobre os postes na extremidade dos quarteirões para cada duas casas e a distribuição de energia é efectuada sobretudo recorrendo a linhas aéreas. Wertheimer verificou, que existia maior incidência da doença em estudo nas residências mais próximas dos postes.

Na tentativa, de encontrar uma relação entre a proximidade das linhas e a incidência da doença Wertheimer, inventou um sistema de classificação da proximidade magnética das casas relativamente às linhas, denominado classificação por wire codes. Este método seria mais tarde utilizado, como método referência, por outros epidemiologistas dos EUA.

No entanto, o estudo não forneceu nenhuma estimativa relativa e a utilização do método wire codes, não permitiu o estabelecimento de uma relação quantificada entre a incidência da doença e uma avaliação da exposição aos CEMEBF, pelo que o estudo foi desacreditado cientificamente e considerado meramente gerador de hipóteses.

Em 1991, London & al, do Departamento de Medicina Preventiva, da Escola de Medicina da Universidade da Califórnia do Sul, em Los Angeles, publicaram um novo estudo sobre 211 casos de leucemia em menores de 10 anos no Condado de Los Angeles, EUA.

O estudo baseou-se em telefonemas efectuados a familiares das crianças doentes.

Em 164 casos, com a permissão dos familiares foram efectuadas medições do campo, junto dos doentes. Para 211 casos, os investigadores recorreram ao método wire codes, anteriormente utilizado por Wertheimer [10].

Os investigadores procuraram proceder a uma avaliação estatística dos intervalos de incerteza, usando regressão logística, um método que viria a ser amplamente utilizado em estudos posteriores. Segundo a OMS esta análise foi bem adaptada, embora padecesse de algumas limitações como a baixa taxa de respostas telefónicas, o desconhecimento das exposições dos sujeitos que se recusaram a responder e o facto dos resultados obtidos por medida directa dos campos e por wire codes serem diferentes.

Tabela 2.3 – Resultados do estudo de London & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 24 horas, para um grau de confiança de 95%. [10]

Medições do Campo Magnético <i>T</i> (Tesla)	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,067 μ T	85	1
0,068 – 0,118 μ T	35	0,68 (0,39 – 1,2)
0,119 – 0,267 μ T	24	0,89 (0,46 – 1,7)
\geq 0,268 μ T	20	1,5 (0,66 – 3,3)

Tabela 2.4 – Resultados do estudo de London & al, utilizando o método *wire codes*, para um grau de confiança de 95% [10].

<i>Wire Codes</i>	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
UG/VLCC	31	1
OLCC	58	0,95 (0,53 – 1,7)
OHCC	80	1,4 (0,81 – 2,6)
VHCC	42	2,2 (1,1 – 4,3)

Como se pode verificar pelas tabelas os resultados alcançados por este estudo obtiveram incertezas relativas muito elevadas.

Uma incidência relativa de 1,0 significa que a incidência da doença é precisamente igual á verificada na ausência de campos e portanto não existe qualquer evidência estatística que relacione a doença com a exposição aos campos.

Em 1997, Martha Linet & al, do Instituto Nacional do Cancro dos EUA, fizeram um estudo englobando nove estados dos EUA, e portanto, com uma amostra populacional muito superior á dos estudos anteriores.

No estudo foram investigadas, através de inquéritos telefónicos, 638 crianças menores de 14 anos, que sofriam de LILA e viviam na proximidade de linhas aéreas de alta tensão, através de inquéritos telefónicos [12].

Os investigadores deste estudo defendiam que existira, nos estudos anteriormente realizados no país, um lapso do tempo registado entre a vivência na proximidade das linhas e o diagnóstico da doença.

Os resultados deste estudo foram os seguintes:

Tabela 2.5 – Resultados do estudo de Martha Linet & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10].

Medições do Campo Magnético <i>T (Tesla)</i>	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,065 μ T	206	1
0,065 – 0,099 μ T	92	0,96 (0,65 – 1,4)
0,100 – 0,199 μ T	107	1,2 (0,79 – 1,7)
\geq 0,200 μ T	58	1,5 (0,91– 2,6)

Tabela 2.6 – Resultados do estudo de Martha Linet & al, recorrendo ao método *wire codes*, para um grau de confiança de 95% [10].

<i>Wire Codes</i>	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
UG/VLCC	175	1
OLCC	116	1,1 (0,74 – 1,5)
OHCC	87	0,99 (0,67 – 1,5)
VHCC	24	0,88 (0,48 – 1,6)

Como se pode observar nas tabelas os resultados foram bastante diferentes do estudo conduzido por London em 1991. Segundo os seus autores o estudo revela a ausência de correlação observada entre campos magnéticos e a leucemia infantil.

Segundo a OMS este estudo revela algumas insuficiências, como o facto de análise não ter sido ajustada para possíveis factores de confusão e a baixa taxa de resposta aos telefonemas.

Em 1999, McBride & al, através do Programa de Controlo e Pesquisa do Cancro, da Agência British Columbia de Vancouver no Canadá realizaram um estudo, sobre os casos de leucemia infantil ocorridos em 5 províncias canadianas, situadas a um raio inferior a 100km das grandes cidades.

O grupo de investigação realizou um estudo envolvendo 293 casos, com medição directa do campo magnético durante 48 horas e outro estudo utilizando como modelo de referência o *wire codes*, envolvendo 351 casos.

O estudo baseou-se no inquérito pessoal por telefone e/ou carta e teve um apreciação positiva por parte da OMS relativamente á análise bem ajustada para todos os factores de confusão. Apesar disso o estudo teve uma baixa de taxa de respostas para o estudo baseado na medida directa dos CEMEBF [13].

Tabela 2.7 – Resultados do estudo de McBride & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 48 horas, para um grau de confiança de 95% [10].

Medições do Campo Magnético <i>T</i> (Tesla)	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,08 μT	149	1
0,08 – 0,14 μT	67	0,57 (0,37 – 0,87)
0,15 – 0,26 μT	45	1,1 (0,61 – 1,8)
≥ 0,2 μT	32	0,68 (0,37– 1,3)

Tabela 2.8 – Resultados do estudo de McBride & al, recorrendo ao método *wire codes*, para um grau de confiança de 95% [10].

<i>Wire Codes</i>	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
UG	79	1
VLCC	73	0,70 (0,41 – 1,2)
OLCC	77	0,76 (0,45 – 1,3)
OHCC	83	0,64 (0,38 – 1,1)
VHCC	39	1,2 (0,58 – 2,3)

Os resultados obtidos apontam para falta de correlação entre campo magnéticos e a leucemia infantil.

Tal, como os estudos americanos anteriores o intervalo de confiança para a incidência relativa inclui a unidade.

ii) Estudos Europeus de leucemia infantil

Também na Europa, sobretudo nos países do norte foram efectuados estudos epidemiológicos, nomeadamente na década de 90 e na seguinte, todos utilizando métodos de investigação mais precisos que os *wire codes*.

Em 1993, Maria Feychting e Anders Ahlbom do Instituto Karolinska de Saúde Ambiental da Suécia, estudaram a incidência relativa da leucemia infantil nos corredores de linhas aéreas de alta tensão.

O estudo incluiu todas as crianças menores de 16 anos que viviam na proximidade linhas aéreas de 220 e 400 kV na Suécia, entre 1960 e 1985. Foi identificado um total de 39 casos de leucemia infantil nestas condições [10].

A exposição foi avaliada por medidas de campo pontuais e por cálculos dos campos magnéticos gerados pelas linhas de energia. Foi utilizada informação histórica das cargas nas linhas para calcular os campos magnéticos no ano mais próximo do diagnóstico da doença.

Tabela 2.9 – Resultados do estudo de Feychting & Ahlbom, com base no cálculo do campo magnético, através de informação histórica das cargas das linhas, para um grau de confiança de 95% [10].

Campo Magnético <i>T (Tesla)</i>	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,1 μ T	27	1
0,1 – 0,19 μ T	4	2,1 (0,6 – 6,1)
\geq 0,2 μ T	7	2,7 (1 – 6,3)

Neste estudo verifica-se um aumento da incidência relativa para aproximadamente o dobro, para campos superiores a 0,1 μ T, no entanto a amostra populacional é muito baixa.

Mais tarde no mesmo ano de 1993, Nielsen & Shulgen da Sociedade Dinamarquesa de Cancro, concluíram um estudo muito semelhante ao estudo sueco no que diz respeito, sobretudo, ao critério de quantificação da exposição aos CEMEBF.

Foram analisados 833 casos de crianças com idade inferior a 14 anos, com leucemia infantil [10].

Tabela 2.10 – Resultados do estudo de Nielsen & Shulgen, com base no cálculo do campo magnético, através de informação histórica das cargas das linhas, para um grau de confiança de 95% [10].

Campo Magnético <i>T (Tesla)</i>	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,1 μ T	829	1
0,1 – 0,24 μ T	1	0,5 (0,1 – 4,3)
\geq 0,25 μ T	3	1,5 (0,3 – 6,7)

A OMS, considera que a análise foi bem ajustada para todos os factores de confusão, e atribui grande mérito à investigação por não ter sido necessário o contacto através de inquérito com os casos investigados, que poderia levar ao enviesamento dos resultados.

Como se pode verificar pela tabela 2.10, para campos superiores 0,1 μ T existem 4 casos de leucemia infantil o mesmo que seria esperado na ausência de linhas.

No entanto, os investigadores consideraram existir correlação positiva entre a doença e os CEMEBF, pelo facto de, para campos superiores a 0,25 μ T terem 3 casos de leucemia quando seriam de esperar apenas 2 casos, ignorando o grande intervalo de incerteza (0,3 – 6,7) e a pequenez da amostra.

Em 1997, Tynes & Haldorsen da Noruega efectuaram um estudo muito semelhante aos efectuados na Suécia e na Dinamarca.

Foram analisadas 148 leucemias infantis, em crianças com idade inferior a 14 anos [10].

Tabela 2.11 – Resultados do estudo de Tynes & Haldorsen, com base no cálculo do campo magnético, através de informação histórica das cargas das linhas, para um grau de confiança de 95% [10].

Campo Magnético T (Tesla)	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
$< 0,05\mu\text{T}$	139	1
$0,05 - <0,14 \mu\text{T}$	8	1,8 (0,7 – 4,2)
$\geq 0,14 \mu\text{T}$	1	0,3 (0,0 – 2,1)

Tal como para os outros estudos efectuados nos países nórdicos, a OMS considera o estudo de Tynes & Haldorsen bem ajustado para todos os factores de confusão, valorizando o facto de não ter havido contacto entre os investigadores e os investigados. No entanto, a grande incerteza estatística, verificada pelos resultados levou a OMS a concluir a impossibilidade de estabelecer relação entre a incidência da doença e os CEMEBF.

Michaelis & al em 1997, concluíram um estudo envolvendo um total de 176 crianças com leucemia infantil, da Baixa Saxónica e de Berlim, na Alemanha.

O estudo foi efectuado recorrendo a medições directas do campo magnético durante 24 horas, nos quartos das crianças doentes [14].

Tabela 2.12 – Resultados do estudo de Michaelis & al, com base em medições directas do campo magnético, durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10].

Medições do Campo Magnético T (Tesla)	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
$< 0,2 \mu\text{T}$	167	1
$\geq 0,2 \mu\text{T}$	9	2,3 (0,8 – 6,7)

Os resultados apontam para uma duplicação da incidência para campos superiores a $0,2\mu\text{T}$. Mas devido á pequenez da amostra (apenas 9 casos), nada se pôde concluir.

Em 1999, o Estudo para o Cancro no Reino Unido (UKCCSI), efectuou um estudo sobre a leucemia Infantil, na Escócia, País de Gales e Inglaterra.

Foram investigados 1073 casos de leucemia infantil em crianças que viviam na proximidade de linhas de alta tensão [10].

A OMS considera que o estudo foi bem ajustado para todos os factores de confusão, mas critica a baixa taxa de respostas.

Tabela 2.13 – Resultados do estudo da UKCCSI, com base em medição directa do campo magnético durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10].

Campo Magnético <i>T</i> (Tesla)	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,1 μ T	995	1
0,1 – <0,2 μ T	57	0,78 (0,55 – 1,1)
\geq 0,2 μ T	21	0,90 (0,49 – 1,6)
0,2 – <0,4 μ T	16	0,78 (0,40 – 1,5)
\geq 0,4 μ T	5	1,7 (0,40 – 7,1)

Como se pode observar pelos resultados, existe uma correlação negativa da incidência da doença para campos entre 0,1 e 0,4 μ T, que seria, na ausência de campo de aproximadamente 117 casos, número muito superior aos obtidos na tabela, na presença de campo.

Existe uma correlação positiva para campos superiores a 0,4 μ T. Seria de se esperar na ausência de campo um total de 3 casos e o estudo apresenta um total de 5 casos. No entanto o tamanho da amostra é pouco significativo e intervalo de incerteza é bastante elevado.

Devido á contradição dos resultados, a UKCCSI considera não haver qualquer relação entre campos magnéticos e a leucemia infantil.

O último estudo considerado para os resultados apresentados na monografia do IARC de 2002, foi realizado em 2001, por Schüz & al, do Instituto de Bio-estatística Médica, Epidemiologia e Informática da Alemanha.

O estudo envolveu 514 casos de leucemia infantil entre 1990 e 1994, da antiga Alemanha Ocidental. No entanto, as medições residenciais do campo magnético só foram efectuadas em 1998 e 1999, pelo que o estudo foi bastante criticado pela OMS que considera não se poder estabelecer uma relação segura entre a ocorrência da doença e a intensidade dos campos magnéticos na mesma altura [10].

Tabela 2.14 – Resultados do estudo de Schüz & al, com base em medição directa do campo magnético durante 24 horas, para um grau de confiança de 95% [10].

Campo Magnético <i>T</i> (Tesla)	Número de Casos	Incidência Relativa & Intervalo de Incerteza
< 0,1 μ T	472	1
0,1 – <0,2 μ T	33	1,2 (0,73 – 1,8)
0,2 – < 0,4 μ T	6	1,2 (0,43 – 3,1)
\geq 0,4 μ T	3	5,8 (0,78 – 43)

Como se pode verificar pela tabela existe um aumento da incidência da doença para campos superiores a 0,1 μ T. Na ausência de campo era de se esperar um total de 33 casos,

quando o número de casos observados fora 42. O que leva a um aumento da incidência da doença em 9 casos.

Para campos superiores a 0,4 μT , verifica-se também uma correlação positiva entre o campo e a doença. Seria de se esperar um total de 0,58 casos (3/5,8), na ausência de linhas aéreas, quando foram observados 3 casos. No entanto, segundo os próprios autores, este resultado foi considerado absurdo.

2.6 - As recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS) em 2007

Na monografia nº 238 da OMS, publicada no âmbito do “Projecto Internacional sobre CEM”, em Junho de 2007, a OMS fez um conjunto de recomendações para a gestão, controlo e comunicação do risco das investigações dos CEMEBF e recomendações sobre os temas prioritários de investigação.

A OMS fez também recomendações orientadas aos poderes políticos e autoridades internacionais, tais como [10] [6] [8]:

- Os políticos devem estabelecer guias para a exposição aos campos electromagnéticos de baixa frequência tanto para o público em geral, como para os trabalhadores.
- A melhor fonte de orientação, tanto para os níveis de exposição como para os princípios de avaliação científica, são os guias internacionais.
- Os políticos devem estabelecer um programa de protecção contra os CEMEBF que inclua medições dos campos de todas as suas fontes, de modo a garantir que os limites de exposição não sejam excedidos tanto para o público em geral, como para os trabalhadores.
- É razoável e autoriza-se a implementação de procedimentos precaucionais de muito baixo custo para reduzir a exposição, contando que os benefícios para a saúde, sociais e económicos da energia eléctrica não sejam postos em causa.
- Os políticos, os planificadores e os fabricantes devem implementar medidas de muito baixo custo ao construírem novas instalações e ao projectarem equipamento novo, inclusive electrodomésticos.
- Devem ser consideradas mudanças nas práticas de engenharia para reduzir a exposição aos CEMEBF gerados por equipamentos e dispositivos, desde que elas rendam benefícios adicionais, tais como uma maior segurança, ou um custo pequeno ou nulo.
- Quando se considerarem mudanças nas fontes existentes de CEMEBF, a redução dos CEMEBF deve ser considerada em simultâneo com os aspectos de segurança, fiabilidade e economia.
- As autoridades locais devem reforçar os regulamentos que tratem de cablagens, de forma a reduzir correntes à terra involuntárias na construção de novas instalações ou na recablagem de existentes, ao mesmo tempo que mantêm a segurança. Medidas proactivas para identificar violações ou problemas em cablagens existentes seriam caras e provavelmente não justificadas.
- As autoridades nacionais devem realizar uma estratégia eficaz e aberta de comunicação para permitir a tomada de decisões informadas por todas as partes

interessadas; isto deve incluir informação sobre como podem os indivíduos reduzir a sua própria exposição.

- As autoridades locais devem melhorar a planificação de instalações emissoras de CEMEBF, incluindo uma melhor consulta entre a indústria, o governo local e os cidadãos, ao localizarem as fontes principais de emissão de CEMEBF.
- Os Governos e a indústria devem promover programas de investigação para reduzir a incerteza das provas científicas dos efeitos sobre a saúde da exposição aos CEMEBF.”

Ao nível dos temas prioritários de investigação a OMS fez um conjunto de recomendações das quais se destacam [8]:

- Caracterização das habitações com exposição a altos campo magnéticos em diferentes países.
- Identificar falhas de conhecimento sobre a exposição ocupacional aos CEMEBF, como no caso da ressonância magnética.
- Determinação do limiar das respostas a campos eléctricos induzidos em sistemas multicelulares, tais como redes neuronais, utilizando métodos teóricos e *in vitro*.
- Actualização com nova informação das análises existentes sobre leucemia infantil.
- Análise dos estudos existentes sobre o tumor cerebral infantil.
- Desenvolvimento de modelos transgénicos de roedores para a leucemia infantil para uso em estudos com campos electromagnéticos.
- Avaliação dos efeitos co-carcinogénicos utilizando estudos *in vitro* e em animais.

Como conclusão e segundo o que foi publicado na monografia de 2007 a OMS considera que “a energia eléctrica comporta óbvios benefícios para a saúde, sociais e económicos e as medidas precaucionais não deverão comprometer estes benefícios. Considerando que a fraqueza da evidência de um elo entre a exposição aos campos magnéticos de EBF e a leucemia infantil, quer o limitado impacto sobre a saúde pública se esse elo existir, os benefícios para a saúde da redução da exposição não são claros. Por conseguinte, os custos das medidas precaucionais deverão ser muito baixos”.

Por outro lado, a OMS considera que os valores limites presentes nos guias de exposição não devem ser reduzidos a qualquer nível arbitrário em nome da precaução. Esta prática além de minar os fundamentos científicos sobre o qual os limites são baseados, é provável que seja uma prática dispendiosa e não necessariamente eficaz de fornecer protecção às populações.

2.7 - Sumário

Os campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEEBF) estão presentes no quotidiano da maioria dos seres humanos. Sempre que exista condução de electricidade através de linhas de transporte, linhas de distribuição ou em diversas aplicações eléctricas são criados campos eléctricos e magnéticos na proximidade dessas linhas e aplicações.

Desde os finais dos anos 70 muito se tem questionado sobre os possíveis riscos para a saúde associados à exposição aos CEMEBF, nomeadamente ao aumento da incidência de cancro. Na tentativa de responder às dúvidas levantadas por estudos efectuados nos finais dos anos 70 inícios dos anos 80 as organizações responsáveis pela saúde pública mundial tem efectuado inúmeros estudos de forma a averiguar os potenciais riscos dos CEMEBF. A Organização Mundial da Saúde em parceria com organizações de carácter científico criaram um projecto de investigação, denominado “Projecto Internacional de Campos ElectroMagnéticos (CEM)” para investigar os potenciais riscos para a saúde associados a tecnologias emissoras de CEM. Os resultados deste projecto resultaram na publicação da monografia nº 238, em Junho de 2007.

Foram efectuados diferentes tipos de estudos pelo Projecto Internacional de Campos Electromagnéticos dos quais se destacam:

- Mecanismos biofísicos
- Estudos laboratoriais *in vitro*
- Estudos laboratoriais *in vivo*
- Estudos epidemiológicos

Apesar de reconhecer créditos científicos a estes estudos, a OMS considera, de acordo com o publicado na monografia de 2007, que existe uma frágil evidência da relação entre o cancro e a exposição a CEMEBF e que a maioria dos estudos são inconclusivos.

A convicção da OMS é que a investigação deve continuar a ser feita, mas no limite do razoável, ou seja, desde que não se atinjam gastos económicos exorbitantes.

Outras instituições como a Internacional de Protecção contra a radiação não ionizante (ICNIRP) e o Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) estudaram os efeitos para a saúde da exposição aguda a altos níveis de CEMEBF, que levaram às recomendações internacionais presentes nos guias de exposição (em 1998 pelo ICNIRP e em 2002 pelo IEEE) que definem os limites básicos associados a este tipo de exposições. Estes órgãos consideram que a evidência científica relacionada com possíveis efeitos sobre a saúde para exposição de longa duração a baixos níveis de CEMEBF é insuficiente para justificar a redução destes limites quantitativos de exposição.

Estes limites tem sido adoptados pelos governos mundiais, por recomendação da OMS, mas na maioria dos países com carácter não obrigatório, ou seja, não fazendo parte dos quadros de legislação.

Capítulo 3

Campo electromagnético emitido por cabos subterrâneos e linhas de corrente contínua: Revisão da literatura

Neste capítulo serão estudadas duas tecnologias de distribuição de energia quanto ao campo eléctrico e campo magnético emitidos: cabos subterrâneos e a tecnologia HVDC (high voltage direct current).

3.1 - Cabos subterrâneos

Os cabos subterrâneos asseguram o transporte e a distribuição de energia eléctrica desde os centros produtores até aos consumidores finais. A transmissão de energia é realizada pelo campo electromagnético criado pela tensão entre os condutores e pela corrente que neles flui [15].

Os cabos subterrâneos podem ser trifásicos ou monofásicos. Em qualquer dos casos, os condutores são isolados por meio de papel impregnado de óleo ou polietileno reticulado e envolvidos por uma bainha metálica (de chumbo ou alumínio), ligada à terra, com funções de protecção contra a humidade e os choques mecânicos.

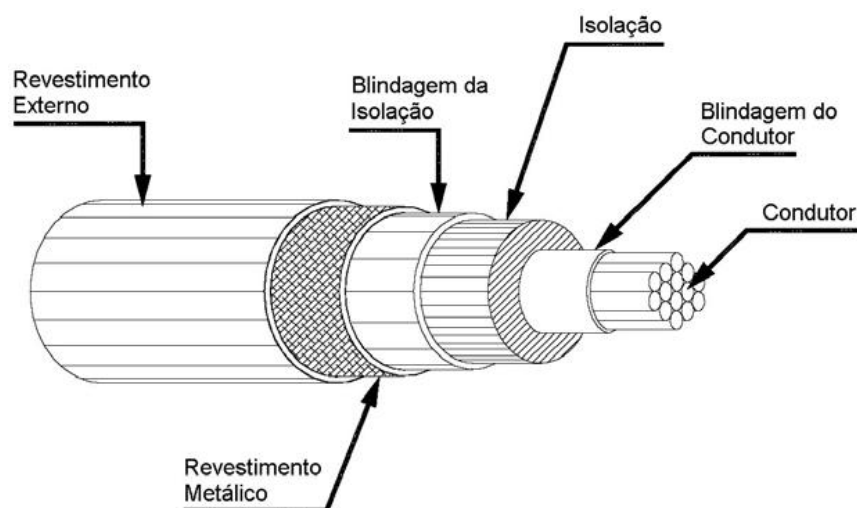


Figura 3.1 - Construção de um cabo subterrâneo revestido por polietileno reticulado (XPLE).

As principais vantagens da utilização de cabos subterrâneos devem-se, sobretudo, ao facto de estarem enterrados no solo, tendo um impacto visual nulo, sendo por isso frequentemente utilizados em zonas urbanas onde existe uma grande densidade populacional.

Têm uma grande utilidade na transmissão de energia em travessias marítimas, sendo designados por cabos submarinos.

No entanto, a sua utilização acarreta diversos problemas [15] [8]:

1- A necessidade dos cabos subterrâneos serem instalados em domínio público e de não poderem ser partilhados com outras infra-estruturas pré-existentes no subsolo, que não sofram alterações de traçado por longo prazo ou, em alternativa, em terrenos privados que terão de ser expropriados, devendo manter estrito regime de não edificação, bem como garantir o acesso a todo o traçado;

2- Em caso de avaria num cabo, o tempo de interrupção do fornecimento de energia é muito superior ao de uma linha aérea;

3- O custo de uma linha enterrada é cerca 10 vezes superior ao custo de uma linha aérea.

Em Portugal os cabos subterrâneos com tensões inferiores a 40 kV deverão ser enterrados a uma distância mínima de 1 metro quando montados sobre faixas de rodagem e a uma distância não inferior 0,7 metros em todos os outros locais. Para tensões superiores a 40 kV, os mesmos cabos deverão ser enterrados a uma distância mínima de 1,2 metros quando montados sobre faixas de rodagem e a uma distância não inferior a 1 metro nos restantes locais [16].

3.1.1 - Campo eléctrico em cabos subterrâneos

Os cabos subterrâneos não produzem qualquer campo eléctrico externo, devido aos materiais de isolamento que o envolvem. Estes materiais blindam o campo eléctrico emitido pelos condutores impedindo que este se faça sentir à superfície.

3.1.2 - Campo magnético em cabos subterrâneos

Os valores típicos do campo magnético emitidos por cabos subterrâneos podem ser visualizados na figura seguinte:

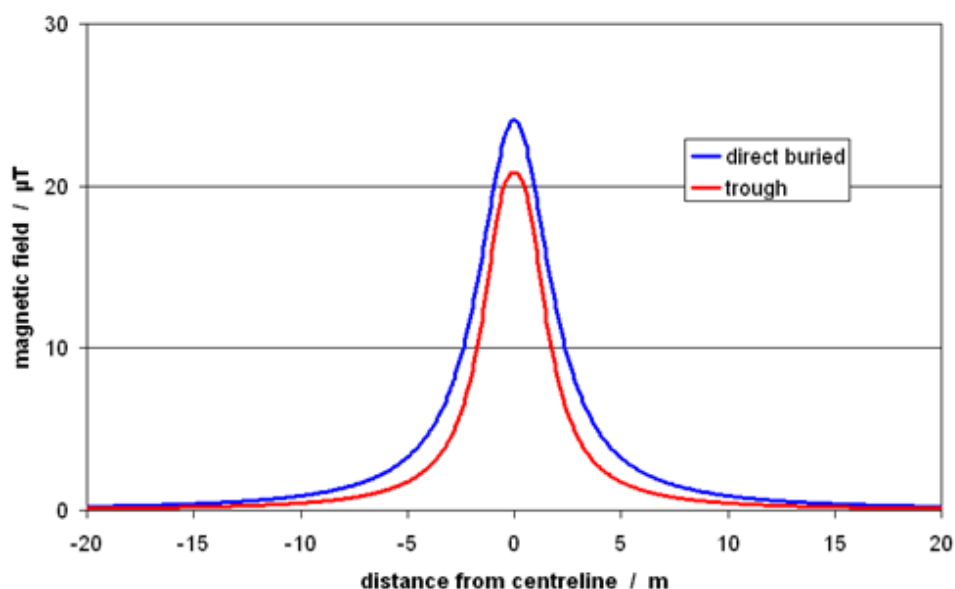


Figura 3.2 - Valores típicos do campo magnético para cabos subterrâneos de 400kV. Linha superior: cabos subterrâneos enterrados a uma profundidade de 1 metro [17].

Apenas foi legendada e considerada a linha superior por pertencer a cabos subterrâneos similares aos utilizados em Portugal. Como se pode verificar o campo magnético diminui à medida que nos afastamos do corredor onde o cabo foi enterrado, sendo essa diminuição mais acentuada entre os -5 e +5 metros em relação ao corredor.

O campo magnético emitido por um cabo subterrâneo à superfície depende, em grande escala, da distância em relação ao solo a que este se encontra enterrado:

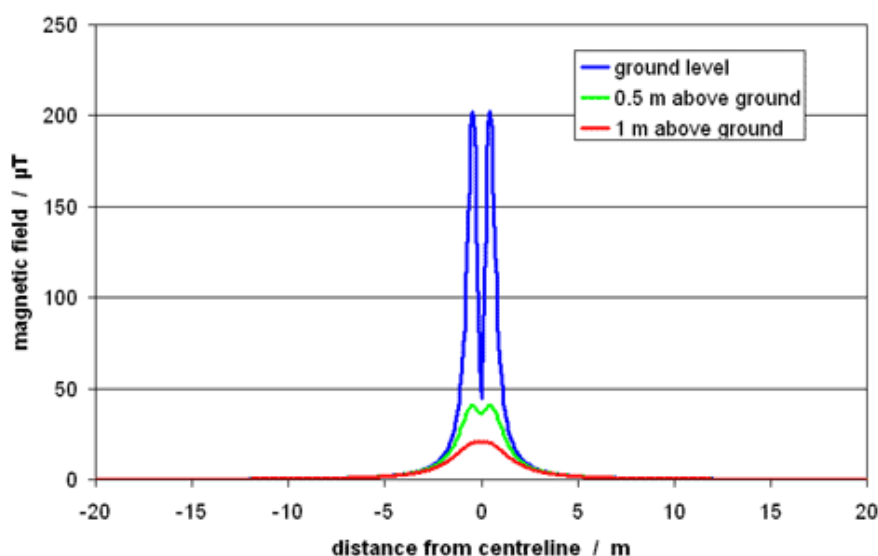


Figura 3.3 - Valores típicos do campo magnético para cabos subterrâneos de 400kV, enterrados a diferentes profundidades. Curva superior: cabos subterrâneos enterrados ao nível da superfície. Curva intermédia: cabo subterrâneo enterrado a uma distância não superior a 0,5 metros da superfície. Curva inferior: cabo subterrâneo enterrado a uma distância superior a 0,5 metros da superfície [18].

Tal como verificado na Figura 3.2 o campo magnético diminui à medida que se afasta do corredor onde o cabo foi enterrado.

Na Figura 3.3 verifica-se uma enorme redução do campo magnético à medida que aumenta a profundidade do cabo. O cabo enterrado entre 0 e 5 m de profundidade da superfície apresenta, uma diminuição de aproximadamente 80% do valor máximo do campo magnético, em relação ao cabo subterrâneo enterrado à superfície.

3.2 - Linhas HVDC

A transmissão de energia eléctrica iniciou-se em corrente contínua. Contudo, as invenções do transformador e da máquina assíncrona ditaram e marcaram o domínio da corrente alternada até aos dias de hoje. Apesar deste domínio as vantagens do uso de corrente contínua para o transporte de energia a longa distância e para travessias submarinas nunca foram esquecidas. O surgimento de dispositivos electrónicos (inicialmente utilizavam-se válvulas de vapor de mercúrio) capazes de manipular potências elevadas, nomeadamente tiristores e transístores de potência, permitiu voltar a encarar a corrente contínua como forma de transmitir e utilizar a energia eléctrica.

O projecto de maior dimensão, em corrente contínua, até ao presente, é o sistema de transporte de energia da central hidroeléctrica de Itaipu, localizada na fronteira entre o Brasil e o Paraguai, para São Paulo. Este projecto está em operação desde 1984 e utiliza linhas de ± 600 kV [19].



Figura 3.4 - Central hidroelétrica de Itaipu.

Um empreendimento em que a engenharia portuguesa participou com relevância foi o sistema de transporte de corrente contínua de Cahora Bassa, em Moçambique, para a África do Sul, com início de operação em 1975. Este sistema utiliza duas linhas monopolares de 1440 km de comprimento, à tensão de ± 533 kV, para uma potência transportada de 1920 MW [15].

Para além do transporte de energia, os sistemas em corrente contínua têm aplicações de baixa potência, quer na conversão de corrente alternada de corrente variável gerada em meios de produção descentralizados, nomeadamente turbinas eólicas e microturbinas, quer na conversão de corrente contínua em corrente alternada utilizada em painéis fotovoltaicos e pilhas de combustível.

O sistema de transmissão em corrente contínua (STCC) pode ser monopolar ou bipolar. Um possível esquema unifilar de um STCC é apresentado na figura seguinte:

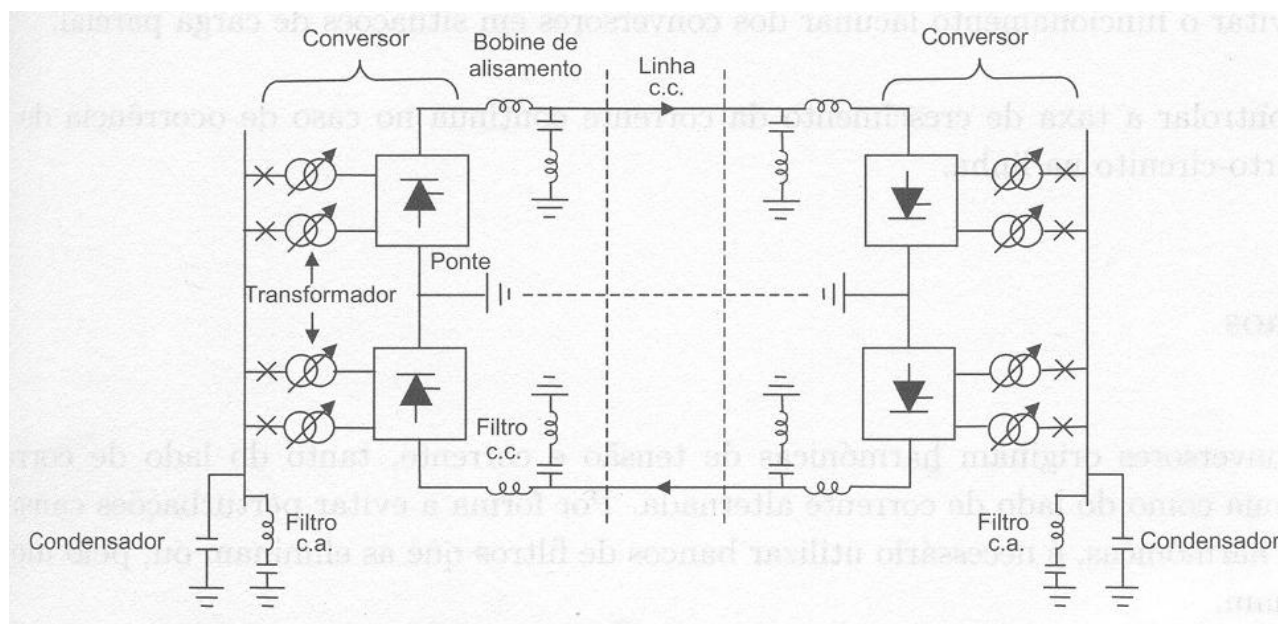


Figura 3.5 - Esquema unifilar de um STCC bipolar [15].

Os conversores asseguram a conversão corrente alternada/contínua e corrente contínua/alternada. Cada conversor é composto por um elevado número de tiristores.

As bobinas de alisamento, possuem uma indutância elevada e permitem reduzir o conteúdo harmónico da rede, prevenir falhas de comutação nos inversores, controlar a taxa de crescimento da corrente contínua no caso de ocorrência de um curto-circuito na linha e evitar o funcionamento lacunar dos conversores em situações de carga parcial.

Por sua vez, os condensadores compensam localmente o consumo de potência activa imposto pelos conversores. Podem ser utilizados para a mesma função compensadores síncronos ou sistemas VAR estáticos.

Os disjuntores de corrente alternada destinam-se a interromper a alimentação de corrente alternada aos transformadores no caso de sobrecargas/defeitos no sistema e a retirar de serviço o sistema de corrente contínua no caso de indisponibilidade dos conversores e/ou filtros.

As linhas podem ser linhas aéreas ou subterrâneas, que, à parte a distância e o número de condutores e isoladores, são idênticas às linhas de corrente alternada.

As principais vantagens da utilização de sistemas de transmissão em corrente contínua, em relação à corrente alternada são [15]:

- 1- Maior potência por condutor, para a mesma secção e nível de isolamento, o que resulta num menor custo das linhas aéreas;
- 2- Menores perdas, para a mesma secção e nível de isolamento;

- 3- Possibilidade de retorno pela terra, o que implica que numa linha bifilar cada condutor possa ser explorado independentemente;
- 4- Nos cabos subterrâneos (ou submarinos), não há corrente capacitiva, a qual é um factor limitativo condicionante de primeira grandeza em cabos de corrente alternada, inviabilizando o seu uso acima de algumas dezenas de quilómetros;
- 5- A reactância da linha não é um factor limitativo, donde resulta a possibilidade do transporte a longa distância sem compensação, sendo que, a queda de tensão apenas depende da resistência e da corrente que percorre a linha;
- 6- A interligação entre duas redes de corrente contínua é assíncrona, logo não resultam problemas de estabilidade. A frequência de cada rede pode ser diferente (por exemplo entre redes de 50 e 60 Hz);
- 7- A potência transmitida pela linha é facilmente controlável, dependendo da tensão nos extremos;
- 8- As linhas em corrente contínua não contribuem para a potência de curto-circuito nas estações terminais.

Devido a estes factores, a importância da utilização da corrente contínua alarga-se a diversas aplicações, tais como [15]:

- 1- Transmissão ponto a ponto por linhas aéreas para distâncias elevadas (tipicamente acima de 600 km);
- 2- Transmissão de cabos submarinos para distâncias superiores a 30 km;
- 3- Interligação assíncrona de sistemas de corrente alternada, eliminando possíveis situações de instabilidade;
- 4- Interligação de redes com frequências diferentes;
- 5- Interligação de redes sem aumento da potência de curto-circuito;
- 6- Distribuição em zonas urbanas de grande extensão em que prevalecem os cabos subterrâneos.

O custo total de investimento de uma linha de corrente contínua, cresce de forma aproximadamente linear em função do seu comprimento.

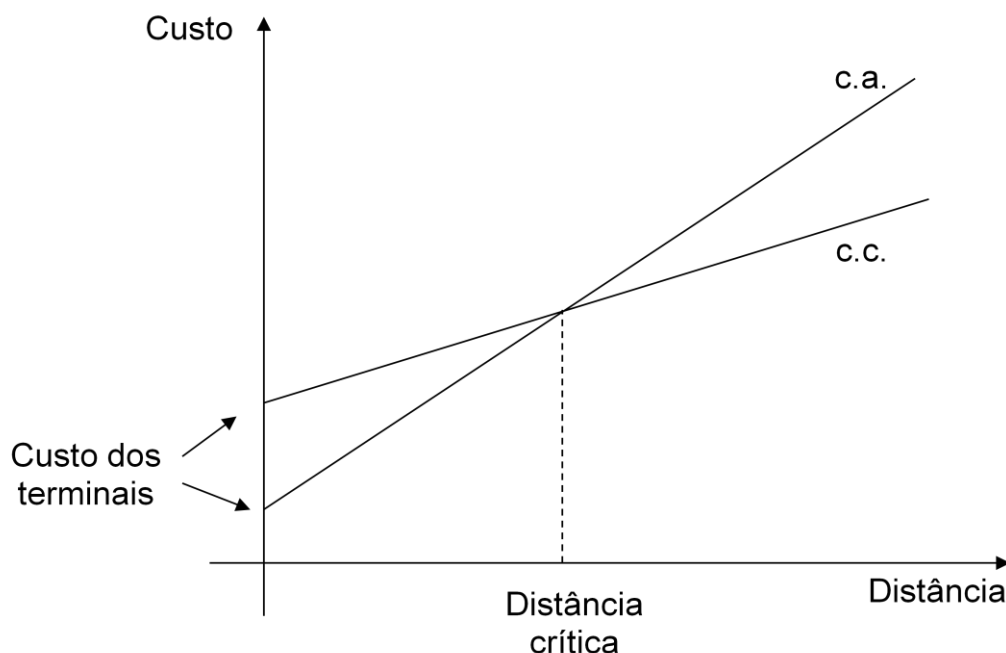


Figura 3.6 - Comparação do custo de investimento de uma linha em corrente alternada (c.a.) e corrente contínua (c.c.) em função do seu comprimento [15].

A distância correspondente ao ponto de intersecção das duas curvas designa-se por distância crítica e é a distância a partir da qual, o transporte de energia em corrente contínua apresenta vantagem económica em relação ao transporte em corrente alternada.

3.2.1 - Campo eléctrico em linhas HVDC

O campo eléctrico produzido por uma linha de corrente contínua é uma combinação do campo electrostático criado pela tensão na linha e o campo de carga espacial criado pelo efeito coroa da linha.

Numerosas investigações têm sido feitas sobre a influência ambiental do campo eléctrico criado por linhas HVDC. Estas investigações mostram que os desconfortos demonstrados por humanos na presença de linhas de corrente alternada não se verificam em linhas de corrente contínua.

Estes estudos concluíram, também, que as descargas emitidas por linhas de corrente contínua são muito menos frequentes do que as emitidas por linhas de corrente alternada [21].

Estes resultados sugerem que os campos eléctricos criados por linhas de transmissão em corrente contínua não são suficientemente perigosos, para que seja necessário recorrer a medidas de segurança significativas.

3.2.2 - Campo magnético em linhas HVDC

Os impactos ambientais do campo magnético em linhas HVDC sobre os seres humanos têm sido muito pouco estudados em relação aos impactos ambientais do campo eléctrico.

Segundo várias estimativas protagonizadas por diferentes estudos, os valores do campo magnético numa linha de transmissão variam entre os 10 e os 50 μT [21]. Considerando que o

valor de referência para a população em geral, recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS) é de 100 μT , pode concluir-se que o campo magnético criado por linhas de corrente contínua não põe em causa a saúde pública

3.3 - Sumário

A maioria das linhas de transporte é aérea. Contudo, em zonas urbanas é usual recorrer-se à instalação de cabos subterrâneos. São utilizados também na transmissão de energia em troços marítimos.

Os cabos subterrâneos emitem um campo eléctrico externo nulo, por acção do material de isolamento que o envolve.

O campo magnético emitido por cabos subterrâneos á superfície diminui substancialmente com o aumento da profundidade a que é enterrado, assim como diminui á medida que nos afastamos do corredor onde foi enterrado.

A tecnologia HVDC é utilizada preferencialmente para transmissão de energia a longas distâncias, situação em que se torna mais viável economicamente do que as linhas de corrente alternada. Os sistemas de transmissão de corrente contínua apresentam inúmeras vantagens em relação á transmissão em corrente alternada como menores perdas, para a mesma secção e nível de isolamento, maior potência por condutor ou ligação de redes com frequências diferentes.

Para além do transporte de energia, os sistemas em corrente contínua têm aplicações de baixa potência, quer na conversão de corrente alternada de corrente variável gerada em meios de produção descentralizados, como turbinas eólicas e microturbinas.

Segundo diversos estudos, os impactos ambientais causados pelo campo eléctrico emitido pelas linhas HVDC é inferior ao causado por linhas de corrente alternada.

O campo magnético emitido por linhas de corrente contínua varia entre os 10 e os 50 μT , não apresentando qualquer risco para a saúde das populações

Capítulo 4

Equações para o cálculo do campo eléctrico e campo magnético em linhas aéreas de transmissão de energia

No capítulo anterior foram apresentadas as tecnologias de transmissão através de cabos subterrâneos de corrente alternada e de linhas de corrente contínua, como alternativa à transmissão de linhas aéreas de corrente alternada.

Apesar da importância dessas tecnologias, as linhas aéreas de corrente alternada constituem a maior parte dos sistemas de transmissão e distribuição de energia em todo o mundo.

Neste capítulo será efectuada uma análise pormenorizada das equações a utilizar, no capítulo 5, para o cálculo do campo eléctrico e campo magnético em linhas aéreas de distribuição/transmissão de energia em corrente alternada. Como as linhas aéreas trabalham a 50Hz, ou seja em regime quasi-estacionário, onde os fenómenos de propagação de onda são insignificantes, o cálculo do campo eléctrico e magnético vai ser estudado de forma independente

As linhas aéreas são constituídas por condutores, de alumínio ou cobre, apoiados ou suspensos em cadeias de isoladores em postes (de madeira, de betão ou metálicos). Os condutores são sujeitos ao seu próprio peso e a uma força longitudinal, descrevendo uma linha designada por catenária, a qual, para vãos (distância entre dois postes) relativamente curtos, se aproxima a uma parábola. A capacidade de transporte de uma linha é determinada pela sua tensão nominal. Quanto mais elevada for a tensão nominal de uma linha, maior é a potência transportável por esta.

4.1 - Equações da linha de transmissão

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

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

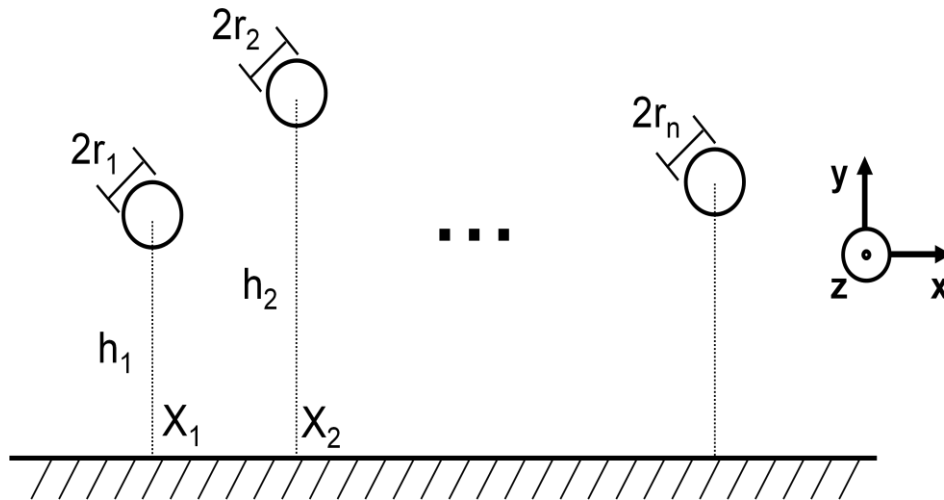


Figura 4.1 - Linha multifilar na presença da terra.

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

$$\text{div } J + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (\text{Eq.4.1})$$

Aplicando o teorema de Gauss, resulta:

$$\int_S J \cdot n \, dS = - \int_V \frac{\partial p}{\partial t} \, dV \quad (\text{Eq.4.2})$$

Em que n constitui a normal exterior à superfície S (Figura 4.2).

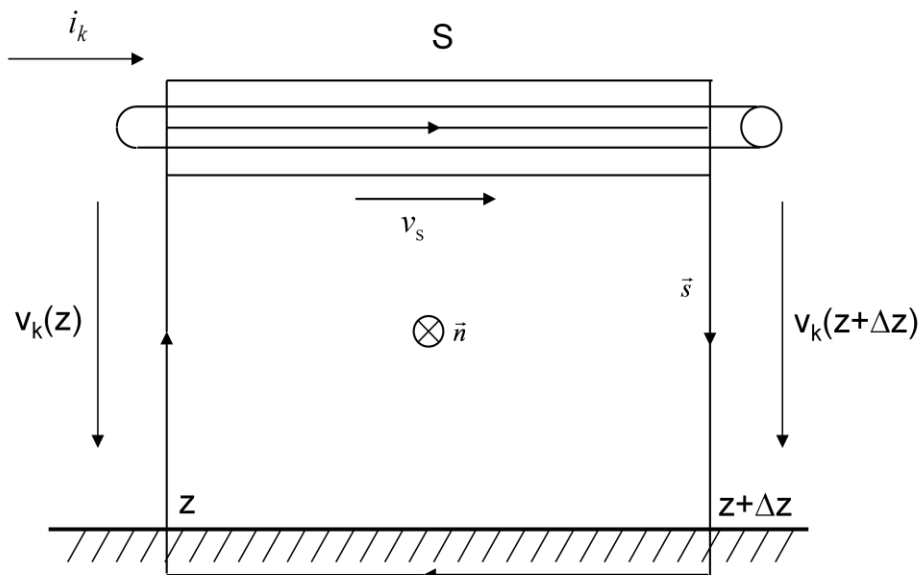


Figura 4.2 - Superfície para determinação da corrente ao longo da linha.

Temos como contribuições para o integral de superfície as correntes, $-i_k(z)$ e $+i_k(z + \Delta z)$. A superfície lateral tem contribuição nula, visto que o dieléctrico, ar é idealmente perfeito. Temos então:

$$-i_k(z) + i_k(z + \Delta z) = -\frac{\partial q_k(z)}{\partial t} \cdot \Delta z \quad (\text{Eq.4.3})$$

em que $q_k(z)$ representa a carga por unidade de comprimento do condutor k em z, admitindo que Δz é suficientemente pequeno para se considerar ρ constante ao longo de Δz . Em meio linear fica-se com:

$$q_i(z) = \sum_{i=1}^n C_{ki} v_i(z) \quad (\text{Eq.4.4})$$

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

Substituindo a Eq.4.4 na Eq.4.3 e dividindo por Δz obtém-se:

$$\frac{-i_k(z) + i_k(z + \Delta z)}{\Delta z} = -\sum_{i=1}^n C_{ki} \frac{\partial v_i(z)}{\partial t} \quad (\text{Eq.4.5})$$

Fazendo Δz tender para zero, obtemos a equação matricial para os n condutores da linha (equação 4.6):

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -C \frac{\partial v}{\partial t} \quad (\text{Eq.4.6})$$

Consideremos agora a lei geral da indução dada por:

$$\int_S E \, ds = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot n \, dS \quad (\text{Eq.4.7})$$

Aplicando a equação 4.7 á circulação S, sendo S uma superfície que se apoia no caminho de circulação e n uma normal em cada ponto á superfície S, obedecendo á regra de Stokes, ficamos com a seguinte equação:

$$-v_k(z) + v_k(z + \Delta z) = -\frac{\partial \psi_s}{\partial t} \quad (\text{Eq.4.8})$$

Considerando mais uma vez que estamos na presença de um meio linear:

$$\psi_i(z) = \Delta z \sum_{i=1}^n L_{ki} i_i(z) \quad (\text{Eq.4.9})$$

Substituindo a Eq.4.9 na Eq.4.8, fica-se com:

$$\frac{-v_k(z) + v_k(z + \Delta z)}{\Delta z} = -\sum_{i=1}^n L_{ki} \frac{\partial i_i(z)}{\partial t} \quad (\text{Eq.4.10})$$

Obtemos para n condutores da linha a seguinte equação matricial:

$$\frac{dv}{dz} = -L \frac{di}{dt} \quad (\text{Eq.4.11})$$

No domínio da frequência as Eq.4.6 e Eq.4.11 ficam:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dz} = -\bar{Y}\bar{V} \\ \frac{d\bar{V}}{dz} = -\bar{Z}\bar{I} \end{cases} \quad (\text{Eq.4.12})$$

onde,

$$\begin{cases} \bar{Z} = j\omega L \\ \bar{Y} = j\omega C \end{cases} \quad (\text{Eq.4.13})$$

4.1.1 - A influência da terra: cálculo dos parâmetros C e L

A terra constitui uma superfície aos potenciais zero, podendo o seu efeito ser considerado usando a teoria das imagens das cargas. Estas imagens são da mesma grandeza que as cargas físicas, mas de sinal contrário, estando colocadas a idêntica distância que aquelas, relativamente á terra como está representada na Figura 4.3 [15].

O campo electromagnético não penetra condutores perfeitos, sendo que, 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 ar, ϵ_o e μ_o , determinam completamente os coeficientes de indução externo e de capacidade da linha.

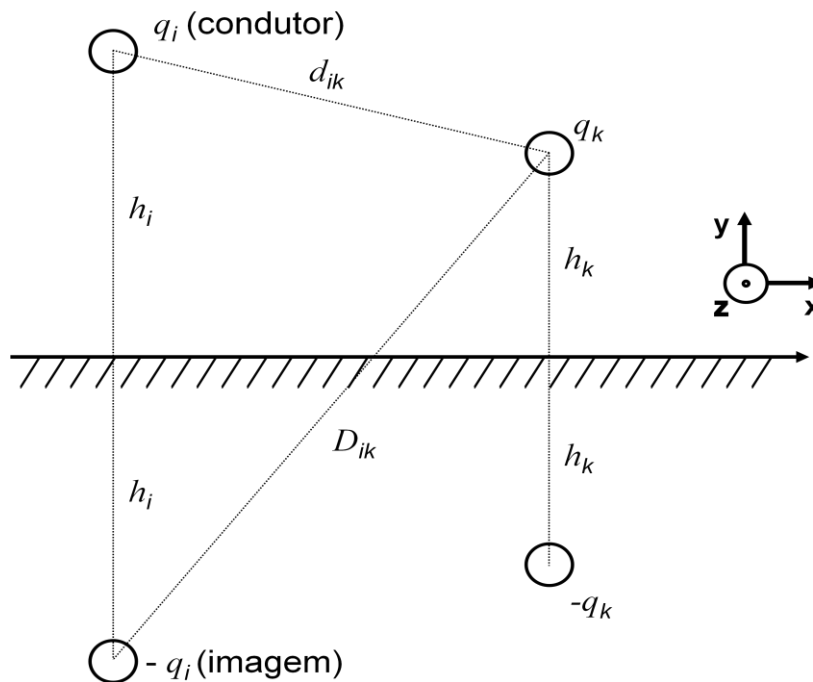


Figura 4.3 - Parâmetros geométricos de uma linha de transmissão multifilar.

Considerando o condutor i com carga q_i por unidade de comprimento, o campo eléctrico criado pela carga q_i e respectiva imagem na terra, é dado por:

$$E_i(x, y) = \frac{q_i}{2\pi d_i} e_{di} - \frac{q_i}{2\pi D_i} e_{Di} \quad (\text{Eq.4.14})$$

Em que d_i é a distância entre condutores e D_i a distância entre o condutor e a sua imagem. e_{di} e e_{Di} são os vectores directores de d_i e D_i respectivamente.

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

$$v_i = \int_{r_i}^{h_i} \frac{q_i}{2\pi\epsilon d_i} dd_i + \int_{h_i}^{2h_i} \frac{q_i}{2\pi\epsilon D_i} dD_i \quad (\text{Eq.4.15})$$

Desenvolvendo a equação 4.15 fica-se com:

$$v_i = \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \frac{h_i}{r_i} + \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{h_i} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (\text{Eq.4.16})$$

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

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (\text{Eq.4.17})$$

v_k pode ser calculado através de:

$$v_k = \int_0^{h_k} \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \frac{1}{\sqrt{(h_i - y)^2 + (x_i - x_k)^2}} \cdot \frac{h_i - y}{\sqrt{(h_i - y)^2 + (x_i - x_k)^2}} dy + \int_0^{h_k} \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \frac{1}{\sqrt{(h_i + y)^2 + (x_i - x_k)^2}} \cdot \frac{h_i + y}{\sqrt{(h_i + y)^2 + (x_i - x_k)^2}} dy \quad (\text{Eq. 4.18})$$

Desenvolvendo a Eq.4.18 obtém-se:

$$v_k = \frac{q_i}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{(h_i + h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}{(h_i - h_k)^2 + (x_i - x_k)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq.4.19})$$

Os elementos não diagonais da matriz P , ficam assim:

$$P_{ik|k \neq i} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \left[\frac{(h_i + h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}{(h_i - h_k)^2 + (x_i - x_k)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Eq.4.20})$$

Sendo que a matriz das capacidades da linha calcula-se invertendo a matriz P :

$$[C] = [P]^{-1} \quad (\text{Eq.4.21})$$

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 genérico, o campo magnético é dado por:

$$H(x, y) = \frac{1}{2\pi d_i} i e_{\theta d_i} - \frac{1}{2\pi D_i} i e_{\theta D_i} \quad (\text{Eq.4.22})$$

No plano que contém o condutor i , $e_{\theta d_i} = e_{\theta D_i} = -e_x$. O fluxo de B através da superfície representada na Figura 4.2, em relação ao condutor i , é dada por:

$$\psi_i = \Delta z \mu_0 \left\{ \int_{r_i}^{h_i} \frac{i}{2\pi d_i} dd_i + \int_{h_i}^{2h_i} \frac{i}{2\pi D_i} dD_i \right\} \quad (\text{Eq.4.23})$$

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

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (\text{Eq.4.24})$$

Procedendo da mesma forma para o condutor k :

$$\psi_k = \Delta z \mu_0 \left\{ \int_0^{h_k} \frac{i(h_i - y)}{2\pi[(h_i - y)^2 + (x_i - x_k)^2]} + \frac{i(h_i + y)}{2\pi[(h_i + y)^2 + (x_i - x_k)^2]} dy \right\} \quad (\text{Eq.4.25})$$

Sendo que os restantes elementos da matriz L ficam:

$$L_{ik|k \neq i} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{(h_i + h_k)^2 + (x_i - x_k)^2}{(h_i - h_k)^2 + (x_i - x_k)^2} \right] \quad (\text{Eq.4.26})$$

4.1.2 - Geometria da catenária

Os condutores de uma linha de transmissão não estão em todos os pontos, á mesma altura. Estes descrevem uma catenária, periodicamente, em que a flecha depende das características individuais da linha e das condições do ambiente onde a linha foi construída. A catenária tem um efeito importante na análise do campo magnético, tendo um impacto significativo no seu cálculo. A contribuição da catenária torna-se significativa para o campo magnético, para valores de flecha superiores a 10% da altura do condutor no poste [22].

Ao longo de um vão d (distância entre dois postes), a distância dos condutores da linha ao solo, varia com z . Os parâmetros considerados para o cálculo da altura dos condutores ao longo da linha são os seguintes:

d - Distância entre dois postes.

f - Flecha.

h_{min} - Altura mínima a meio vão.

h_{max} - Altura do condutor no poste.

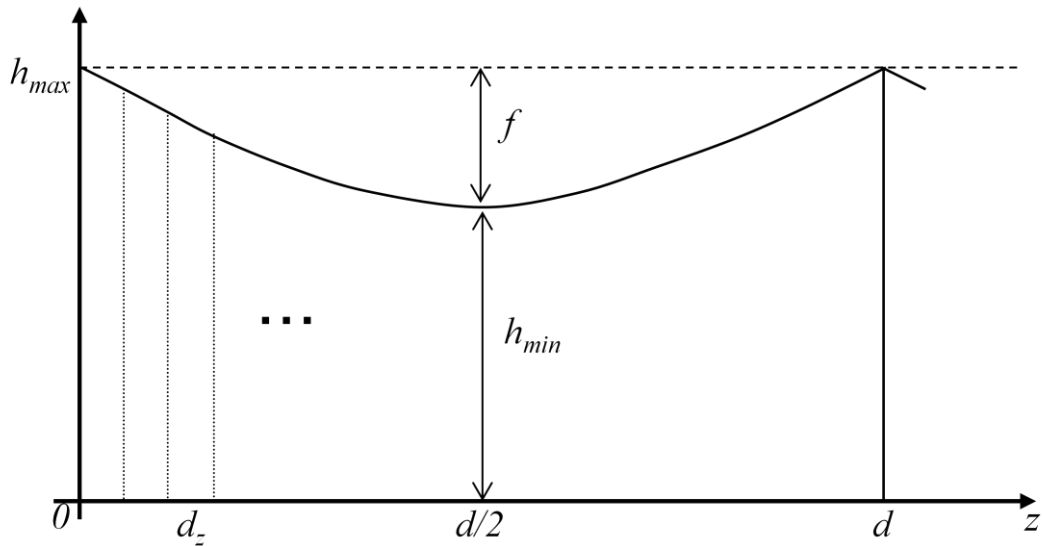


Figura 4.4 - Parâmetros da catenária.

A expressão que permite calcular a altura de um condutor ao longo de z é [23]:

$$y_k(z) = h_{min} + f \times \left(\frac{2z_i - d}{d}\right)^2 \quad (\text{Eq.4.27})$$

Onde os dois postes que delimitam o vão estão colocados em $z = 0$ e $z = d$, com z_i :

$$z_i = (i - 1)dz, \quad i = 1, \dots, N \quad (\text{Eq.4.28})$$

4.2 - Equações para o cálculo do campo eléctrico em linhas aéreas de transmissão de energia

O cálculo do campo eléctrico vai ser efectuado considerando que o campo resulta de cargas filiformes colocadas a uma distância fixa do solo, correspondente à altura média dos condutores ao solo, ou seja, desprezando o efeito da catenária, uma vez que a diferença entre calcular o campo utilizando a altura média ou usando a catenária é inferior a 1% [24].

A altura média do condutor k pode ser definida através da seguinte equação:

$$(y_k)_{med} = \frac{(h_k)_{max} + 2 \cdot (h_k)_{min}}{3} \quad (\text{Eq.4.29})$$

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

$$\vec{E} = e_x(t)\vec{u}_x + e_y(t)\vec{u}_y \quad (\text{Eq.4.30})$$

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 vão ser adoptadas as seguintes considerações:

1 - O campo eléctrico na proximidade das linhas de transmissão é calculado assumindo que não existe carga em espaço livre;

2 - A terra assume-se como condutora perfeita. O tempo necessário para que as cargas se redistribuam na superfície da terra, quando o campo aplicado se altera, é muito pequeno quando comparado com o período de frequência.

As cargas q dos condutores, são determinadas a partir das tensões e da matriz dos coeficientes do potencial de Maxwell:

$$q = P^{-1}V \quad (\text{Eq.4.31})$$

em que P é a matriz de coeficientes de potencial calculado através de Eq.4.17 e Eq.4.20, q é o vector coluna das cargas nos condutores e V o vector das tensões em cada condutor.

Sendo $P=C^{-1}$, tal como descrito na equação 4.21, ficamos com:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{1G} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{2G} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{3G} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{4G} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_G \end{bmatrix} \quad (\text{Eq.4.32})$$

As tensões nas fases são normalmente especificadas. As tensões nas guardas são consideradas nulas, tendo em conta que os cabos estão ligados aos postes, e considerando desprezável a resistência destes.

Estamos agora em condições de calcular o campo eléctrico originado por uma linha de transmissão.

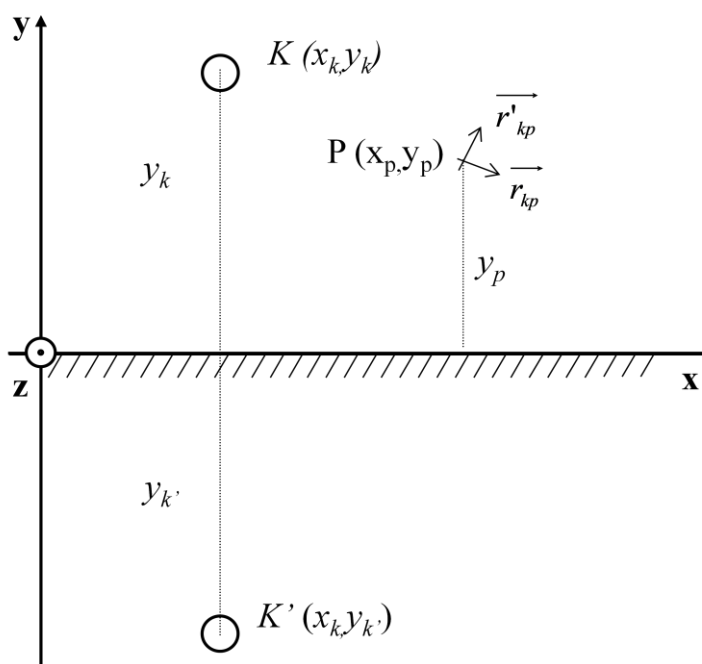


Figura 4.5 - Coordenadas necessárias para o cálculo do campo eléctrico originado por um condutor num ponto genérico $P(x_p, y_p)$.

Depois de conhecer as cargas em cada condutor, através da resolução da Eq.4.31, o campo eléctrico num ponto P (x_p, y_p) genérico, devido às cargas situadas em k e k' é calculado através de: P (x_p, y_p)

$$\vec{E}_{kP} = \frac{\bar{q}_k}{2\pi\epsilon_0 r_{kP}} \vec{u}_k - \frac{\bar{q}_k}{2\pi\epsilon_0 r_{k'P}} \vec{u}_{k'} \quad (\text{Eq.4.33})$$

onde r_{kP} e $r_{k'P}$ resultam de:

$$r_{kP} = \sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2} \quad (\text{Eq.4.34})$$

$$r_{k'P} = \sqrt{(x_p - x_{k'})^2 + (y_p - y_{k'})^2} \quad (\text{Eq.4.35})$$

Os vectores \vec{u}_k e $\vec{u}_{k'}$ calculam-se através das seguintes expressões:

$$\vec{u}_k = \frac{x_p - x_k}{\sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2}} \vec{u}_x + \frac{y_p - y_k}{\sqrt{(x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2}} \vec{u}_y \quad (\text{Eq.4.36})$$

$$\vec{u}_{k'} = \frac{x_p - x_{k'}}{\sqrt{(x_p - x_{k'})^2 + (y_p - y_{k'})^2}} \vec{u}_x + \frac{y_p - y_{k'}}{\sqrt{(x_p - x_{k'})^2 + (y_p - y_{k'})^2}} \vec{u}_y \quad (\text{Eq.4.37})$$

A Eq.4.32 resulta em:

$$\vec{E}_{kP} = \frac{\bar{q}_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{x_p - x_k}{r_{kP}^2} - \frac{x_p - x_{k'}}{r_{k'P}^2} \right] \vec{u}_x + \frac{\bar{q}_k}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{y_p - y_k}{r_{kP}^2} - \frac{y_p - y_{k'}}{r_{k'P}^2} \right] \vec{u}_y \quad (\text{Eq.4.38})$$

que por sua vez resulta em:

$$\vec{E}_{kP} = (E_{kxr} + jE_{kxi})\vec{u}_x + (E_{kyr} + jE_{k yi})\vec{u}_y \quad (\text{Eq.4.39})$$

Para n_c condutores, o valor eficaz do campo eléctrico é dado por:

$$E_{ef} = \sqrt{(\sum_{k=1}^{n_c} E_{kxr})^2 + (\sum_{k=1}^{n_c} E_{kxi})^2 + (\sum_{k=1}^{n_c} E_{kyr})^2 + (\sum_{k=1}^{n_c} E_{k yi})^2} \quad (\text{Eq.4.40})$$

4.3 - Equações para o cálculo do campo magnético em linhas aéreas de transmissão de energia

Para proceder ao cálculo do campo magnético é necessário ter em consideração a Lei de Ampère. Segundo esta lei, um corrente I_k no ponto $K(x_k, y_k)$ origina no ponto $P(x_p, y_p)$ um campo magnético com a seguinte intensidade:

$$|\vec{H}_{kP}| = \frac{I_k}{2\pi d_{kP}} \text{ [A/m]} \quad (\text{Eq.4.41})$$

O vector $\overrightarrow{H_{kP}}$ tem a direcção perpendicular a $\overrightarrow{d_{kP}}$. O módulo do vector do campo magnético $\overrightarrow{H_{kP}}$, varia sinusoidalmente no tempo de acordo com a corrente I_k .

Pode-se afirmar, portanto, que o campo magnético originado por uma linha de transmissão aérea está directamente relacionado com a corrente eléctrica que circula nos condutores da linha. O cálculo do campo magnético, implica a determinação das correntes em todos os condutores da linha, em como a repartição de correntes nos subcondutores que constituem cada uma das fases.

A amplitude complexa do campo de indução magnética \bar{B} , numa linha de transmissão aérea, é pode ser calculada através de:

$$\bar{B} = \bar{B}_{f1} + \bar{B}_{f2} + \bar{B}_{f3} \quad (\text{Eq.4.42})$$

em que \bar{B}_{f1} , \bar{B}_{f2} e \bar{B}_{f3} é a contribuição de cada uma das fases da linha para o campo de indução magnética originado por esta.

As coordenadas para o cálculo do campo magnético no ponto $P(x_p, y_p)$ originado por um condutor genérico pode ser observado na Figura 4.6:

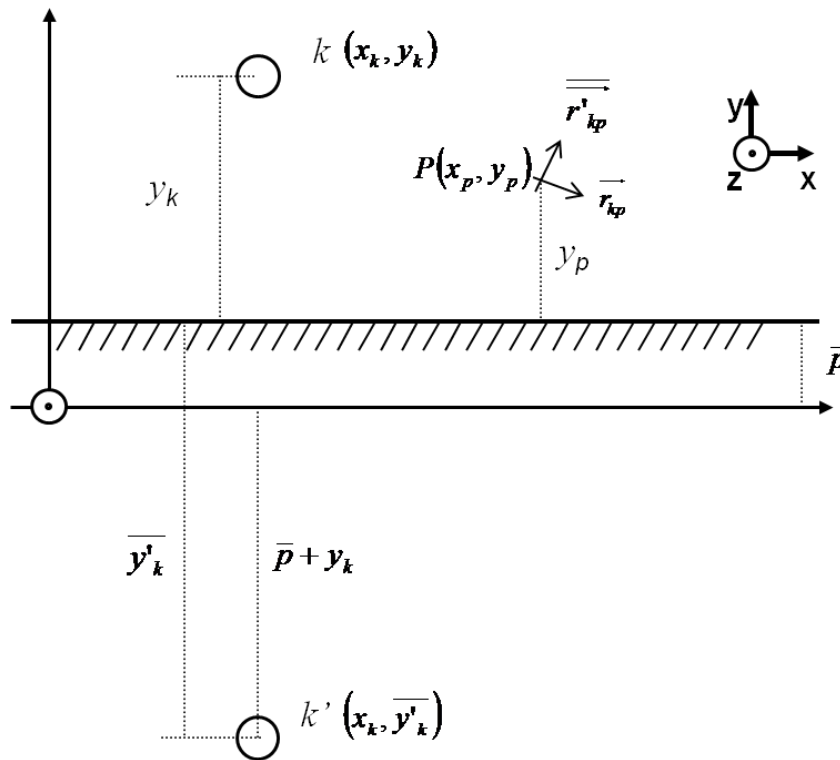


Figura 4.6 - Coordenadas necessárias para o cálculo do campo magnético originado pelo condutor genérico K no ponto P.

$\overrightarrow{r_{kP}}$ e $\overrightarrow{r'_{kP}}$ são calculados através de:

$$\overrightarrow{r_{kP}} = (x_p - x_k)\vec{u}_x + (y_p - y_k)\vec{u}_y \Rightarrow r_{kP}^2 = (x_p - x_k)^2 + (y_p - y_k)^2 \quad (\text{Eq.4.43})$$

$$\overrightarrow{r'_{kP}} = (x_p - x_k)\vec{u}_x + (y_p - \overline{y'_k})\vec{u}_y \Rightarrow \overline{r'_{kP}}^2 = (x_p - x_k)^2 + (y_p - \overline{y'_k})^2 \quad (\text{Eq.4.44})$$

$$\overline{y'_k} = -y_k - 2\bar{p} \quad (\text{Eq.4.45})$$

em que \bar{p} , é uma distância complexa definida por:

$$\bar{p} = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_t}} \quad (\text{Eq.4.46})$$

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

As correntes nos condutores k e k' , irão contribuir para o campo magnético no ponto $P(x_p, y_p)$ através de:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{H_{kP}} &= \frac{\vec{I}_k \times \overrightarrow{r_{kP}}}{2\pi r_{kP}^2} - \frac{\vec{I}_k \times \overrightarrow{r'_{kP}}}{2\pi r'_{kP}^2} \\ \overrightarrow{H_{kP}} &= \left[\frac{x_p - x_k}{2\pi r_{kP}^2} \vec{I}_k - \frac{x_p - x_k}{2\pi r'_{kP}^2} \vec{I}_k \right] \vec{u}_x + \left[\frac{y_p - y_k}{2\pi r_{kP}^2} \vec{I}_k - \frac{y_p - \overline{y'_k}}{2\pi r'_{kP}^2} \vec{I}_k \right] \vec{u}_y \end{aligned} \quad (\text{Eq.4.47})$$

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

De forma análoga ao campo eléctrico, o valor eficaz da intensidade do campo magnético para n_c condutores é:

$$H_{ef} = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kxr} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kxi} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kyr} \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{n_c} H_{kyi} \right)^2} \quad (\text{Eq.4.48})$$

Os limites de referência estudados no capítulo 2 são na realidade valores eficazes da densidade do fluxo magnético (B_{ef}). Para comparar estes valores com os campos originados por linhas aéreas de transmissão de energia é necessário recorrer á seguinte expressão:

$$B_{ef} = \mu_0 H_{ef} \quad (\text{Eq.4.49})$$

4.4 - Sumário

As linhas aéreas de energia em corrente alternada são a principal tecnologia de transmissão e distribuição utilizada nas redes eléctricas em todo o mundo. Torna-se por isso fundamental perceber que impactos ambientais têm ao nível da saúde pública. Neste capítulo procurou-se estudar as equações que permitem o cálculo do campo eléctrico e magnético, em linha aéreas, de modo a que se possa comparar estes valores com os valores de referência estudados no capítulo 2.

As equações estudadas nas secções 4.2 e 4.3 vão ser utilizadas para a simulação do cálculo do campo eléctrico e magnético originado por linhas aéreas de transmissão, no capítulo 5.

Capítulo 5

Simulação do campo eléctrico e magnético em linhas aéreas de transmissão de energia

Neste capítulo vai-se proceder á simulação do cálculo do campo eléctrico e magnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia com base num programa efectuado em matlab, desenvolvido a partir das equações do campo eléctrico e magnético apresentadas no capítulo 4.

Os resultados do campo eléctrico e magnético serão analisados separadamente para que melhor se avalie os factores que influenciam o cálculo de cada um dos campos.

A simulação será feita a partir de um caso base, sendo depois feita uma análise para diferentes geometrias e configurações da linha, de modo a que se procurem soluções que permitam limitar o campo eléctrico e magnético originado pelas linhas.

5.1 - Campo eléctrico originado por uma linha aérea de 400KV

Através das equações do campo eléctrico apresentadas no capítulo 4 vai-se calcular e analisar a variação do campo eléctrico na vizinhança de uma linha aérea.

Começar-se-á por analisar o campo eléctrico de uma linha aérea de 400KV em esteira, com uma distância entre dois postes consecutivos de 300m, com dois condutores por fase e 2 condutores de guarda, muito utilizada para a transmissão de energia eléctrica em Portugal. A configuração da linha e as suas características podem ser observadas na Figura 5.1 e na tabela 5.1, respectivamente.

Para uma linha de 400Kv, com $S = 1400\text{MVA}$, o vector das correntes das fases I_f é definido pelas correntes sinusoidais a 50Hz com 2kA de valor eficaz desfasadas de 120° entre si. Esta linha será utilizada com caso base, para efeitos de comparação com outras linhas.

Tal como foi referido na secção 4.2 o campo será calculado considerando a altura média dos condutores, ou seja, desprezando o efeito não uniforme da linha.

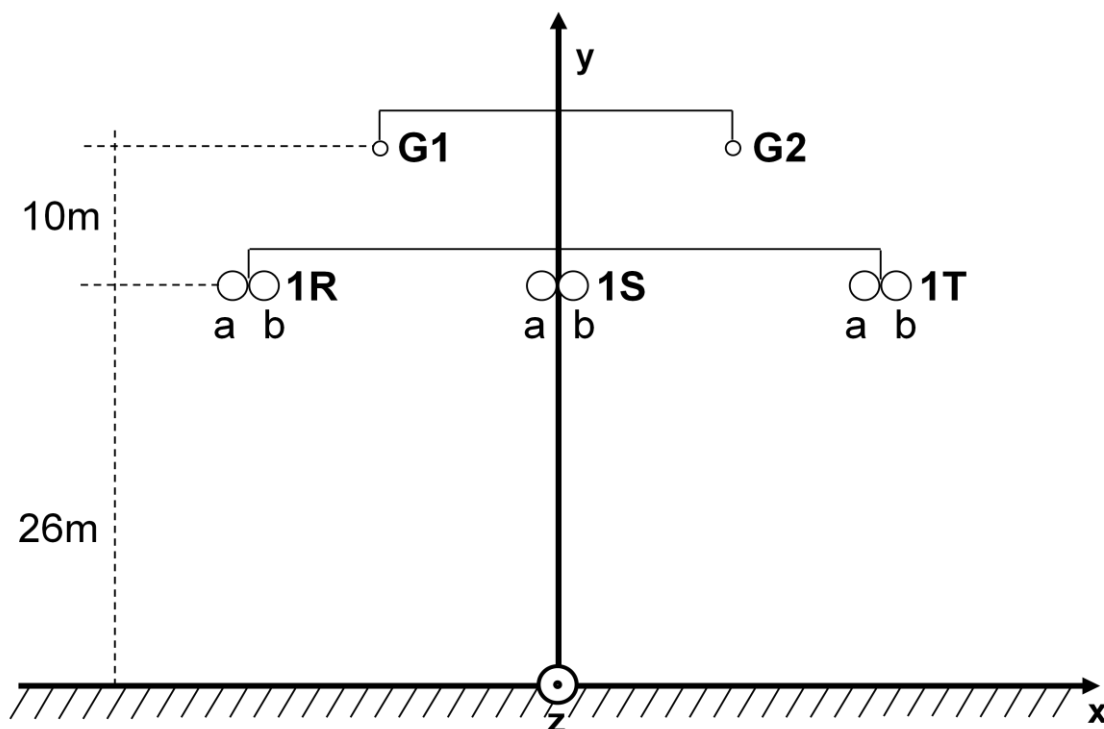


Figura 5.1 - Geometria de uma linha aérea em esteira (caso base), vista no poste ($z=0$).

A distância considerada entre condutores da mesma fase foi de 0,4m, sendo de 12m entre fases.

Tabela 5.1 - Características dos condutores da linha.

Condutor	Diâmetro (m)	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Flecha (m)
1Ra	0,0318	-12,2	26	7
1Rb	0,0318	-11,8	26	7
1Sa	0,0318	-0,2	26	7
1Sb	0,0318	0,2	26	7
1Ta	0,0318	11,8	26	7
1Tb	0,0318	12,2	26	7
G1	0,0146	-8	36	4
G2	0,0146	8	36	4

O ponto P de observação do campo eléctrico corresponde à posição do cérebro humano e tem como coordenadas $x_p = 0\text{ m}$, considerando que o ser humano se encontra exactamente no meio do corredor da linha e $y_p = 1,75\text{ m}$ considerando um ser humano adulto.

A intensidade do campo eléctrico no Ponto P, originado pela linha em esteira de 400KV da Figura 5.1 é:

$$E_p = 0,651 \text{ KV/m} \quad (\text{Eq.5.1})$$

Fazendo variar o ponto de observação transversalmente ou seja, variando x_p entre -50 e $+50\text{m}$ obtém-se:

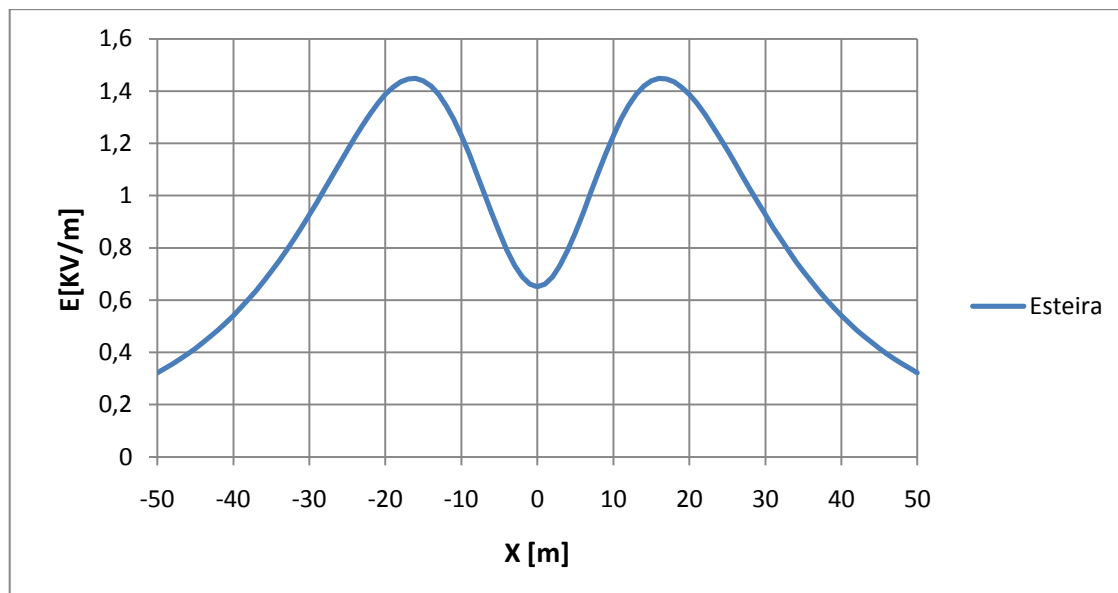


Figura 5.2 - Variação do campo eléctrico E com a distância X ($x \in [-50\text{m}; 50\text{m}]$, $y = 1,75\text{m}$), para uma linha aérea em esteira (caso base).

Através da análise da Figura 5.2 verifica-se que valor máximo do campo eléctrico ocorre para $X = -16$ e $X = 16\text{m}$:

$$E_{max} = 1,448 \text{ KV/m} \quad (\text{Eq.5.2})$$

5.1.1 - Influência da geometria da linha no cálculo do campo eléctrico

Nesta secção vão-se analisar diferentes configurações geométricas de uma linha aérea de 400KV quanto ao valor do campo eléctrico emitido por estas.

De modo a comparar as diferentes configurações de uma forma verosímil, vai-se manter os parâmetros dos condutores, as flechas, a distância ao solo dos condutores mais próximos deste e a distância entre condutores da mesma fase .

Começar-se-á pela análise de uma linha com disposição vertical, depois uma linha em triângulo e por fim uma linha em triângulo invertido. Após esta análise será feita uma comparação do comportamento do campo eléctrico na vizinhança da linha para as diferentes geometrias.

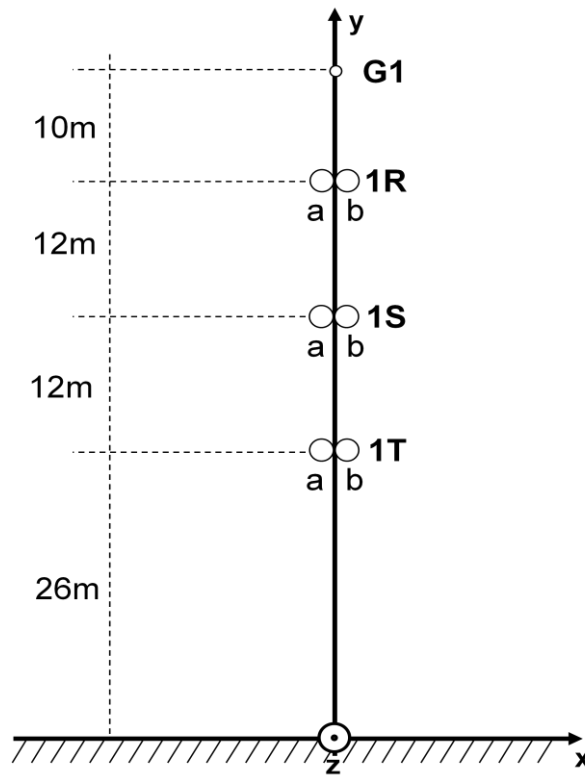


Figura 5.3 - Representação geométrica da linha com disposição vertical, vista do poste ($z=0$).

Usando o mesmo ponto de observação usado para a linha em esteira obtém-se:

$$E_p = 1,579 \text{ KV/m} \quad (\text{Eq.5.3})$$

Que corresponde também ao valor máximo do campo eléctrico emitido por esta linha.

O campo eléctrico originado pela linha em triângulo da Figura 5.4, no ponto de observação P é:

$$E_p = 0,902 \text{ KV/m} \quad (\text{Eq.5.4})$$

O valor máximo para esta linha ocorre em $X = -10$ e $X = 10$:

$$E_{max} = 1,079 \text{ KV/m} \quad (\text{Eq.5.5})$$

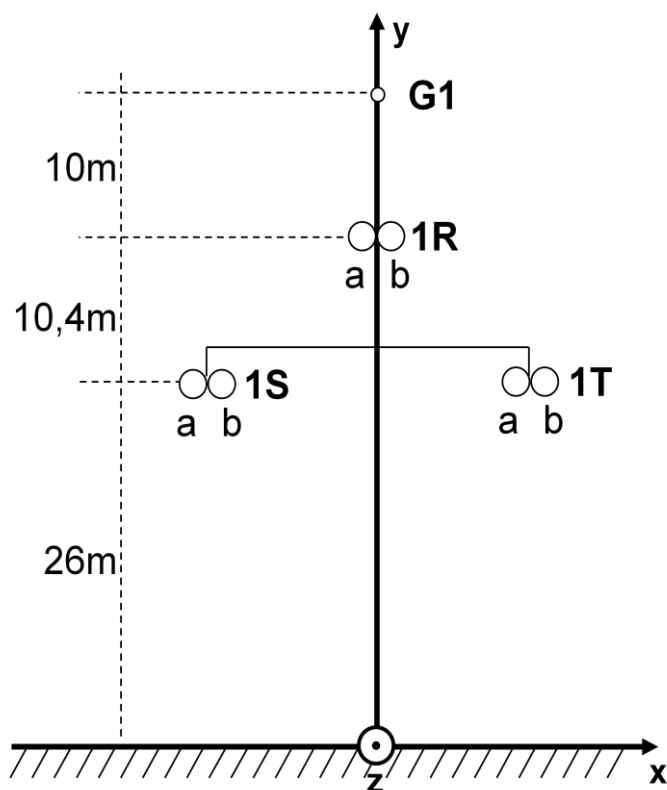


Figura 5.4 - Representação geométrica da uma linha em triângulo, vista do poste ($z=0$).

Atendendo á configuração em triângulo invertido da Figura 5.5:

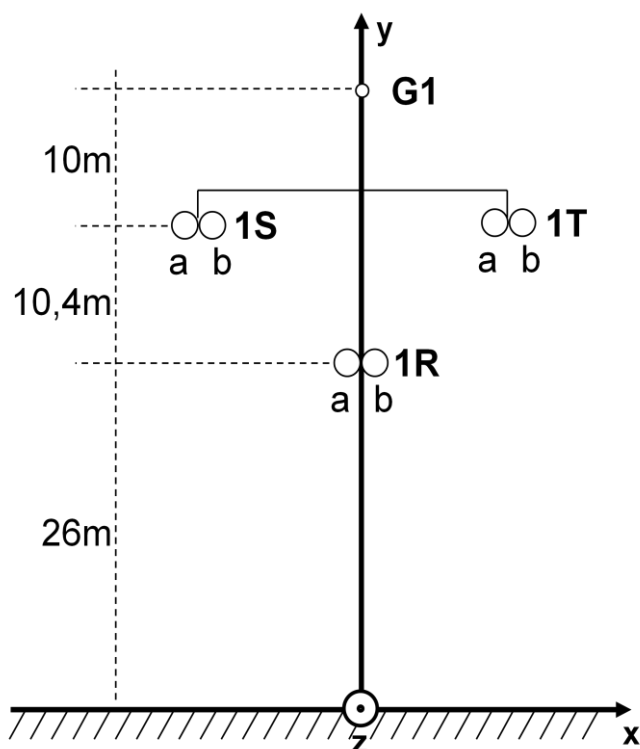


Figura 5.5 - Representação geométrica da uma linha em triângulo invertido, vista do poste ($z=0$).

O valor do campo eléctrico no ponto P corresponde a:

$$E_p = 1,328 \text{ KV/m} \quad (\text{Eq.5.5})$$

E corresponde ao valor máximo do campo emitido pela linha em triângulo invertido.

Tabela 5.2 - Valores do campo eléctrico obtidos para diferentes geometrias.

Configuração	Esteira	Vertical	Triângulo	Triângulo invertido
$E_p \text{ (KV/m)}$	0,651	1,579	0,902	1,328
$E_{max} \text{ (KV/m)}$	1,448	1,579	1,079	1,328

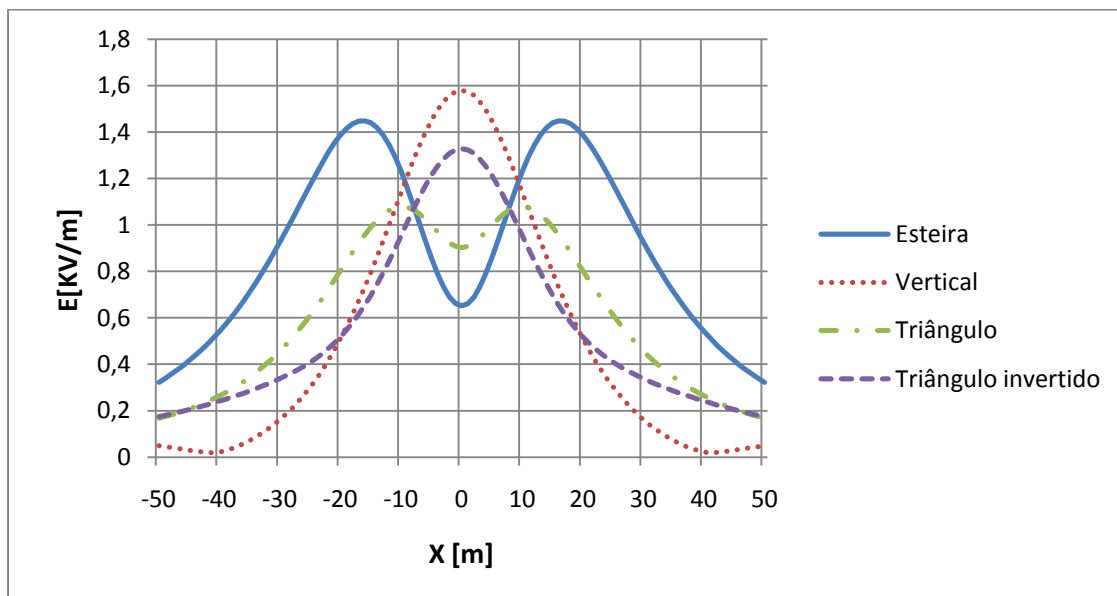


Figura 5.6 - Representação da variação do campo eléctrico E para diferentes geometrias ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).

É possível verificar através do gráfico 5.6 e da tabela 5.2 que a linha que emite o maior campo eléctrico na vizinhança da linha é a linha na vertical. No entanto, á medida que nos afastamos do centro do corredor da linha, este valor diminui rapidamente, apresentando a partir de $x = -20$ e $x = 20m$ os valores mais baixos de campo eléctrico em comparação com as outras geometrias estudadas

A geometria que apresenta valores máximos mais baixos é geometria em triângulo, no entanto, a geometria que apresenta valores de campo mais baixos no ponto de observação P é a geometria em esteira. Para a geometria em esteira, á medida que nos afastamos do centro do centro do corredor, nomeadamente, a partir de $x = -20$ e $x = 20m$ a diminuição do campo eléctrico é menos significativa do que nas outras geometrias, apresentando os valores mais altos de campo. Isto deve-se sobretudo, á largura do corredor onde estão os condutores, que é substancialmente maior quando comparada com as restantes geometrias.

5.1.2 - Influência da distância entre condutores de fase no cálculo do campo eléctrico

Usando a geometria em esteira da Figura 5.1 fez-se variar a distância D , entre condutores de fase:

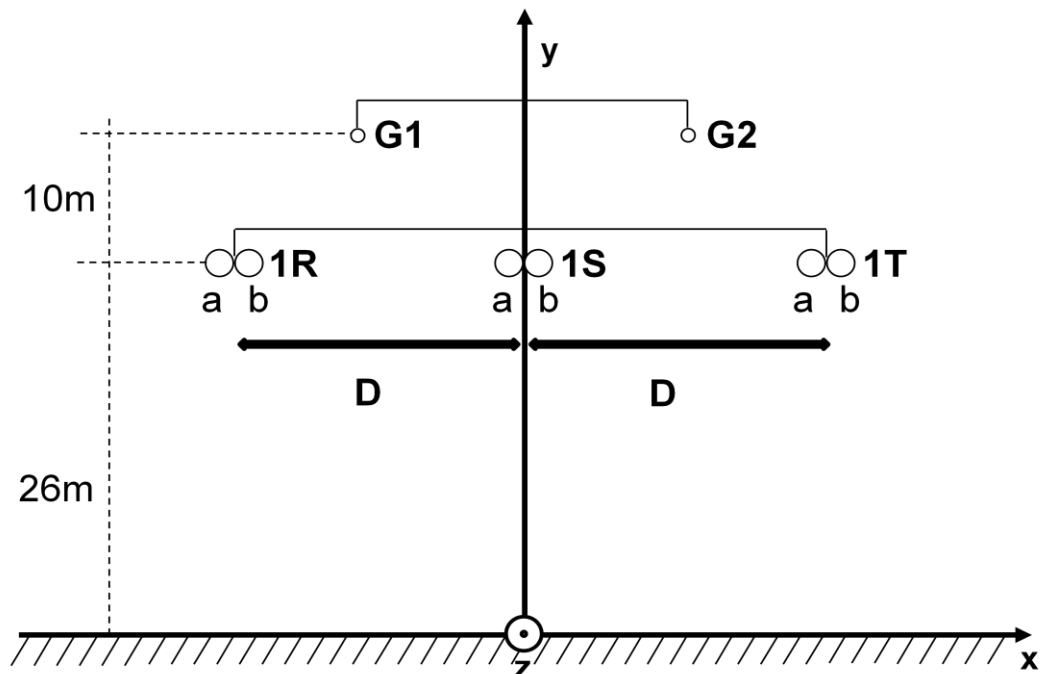


Figura 5.7 - Representação da distância D na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo eléctrico.

Os resultados obtidos para a variação do campo eléctrico com a distância D foram os seguintes:

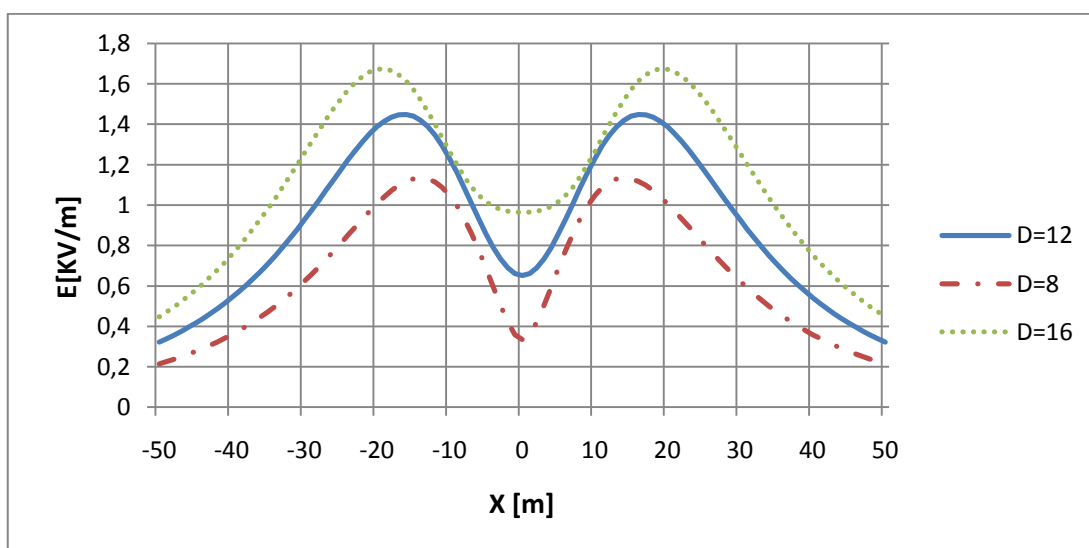


Figura 5.8 - Representação da variação do campo eléctrico E com a distância D ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira.

Quanto maior for a distância D entre condutores de fase maior é o campo eléctrico na vizinhança da linha. Uma solução para diminuir o campo eléctrico emitido por uma linha á superfície pode passar por diminuir a distância entre os condutores de fase.

5.1.3 - Influência da distância ao solo dos condutores de fase no cálculo do campo eléctrico

Para demonstrar a influência da distância ao solo dos condutores de fase no campo eléctrico emitido por linhas, utilizou-se a configuração em esteira da Figura 5.1 fazendo-se variar a altura H , entre a superfície e os condutores de fase.

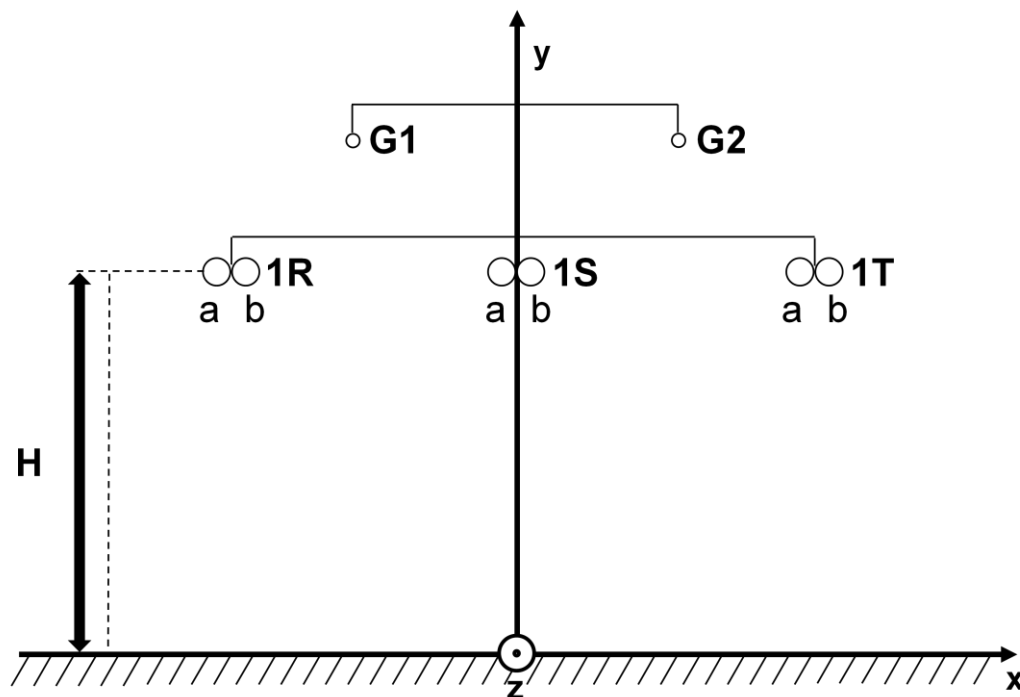


Figura 5.9 - Representação da distância H na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo eléctrico.

Quanto maior for a altura H dos condutores menor vai ser o campo eléctrico originado pela linha á superfície, como se pode verificar na Figura 5.9. Uma solução para reduzir o campo eléctrico poderia então passar por elevar os condutores de fase, construindo postes mais altos. No entanto, a elevação dos condutores implica a construção de postes mais elevados e de maiores dimensões, o que implica também um maior gasto económico na construção das linhas.

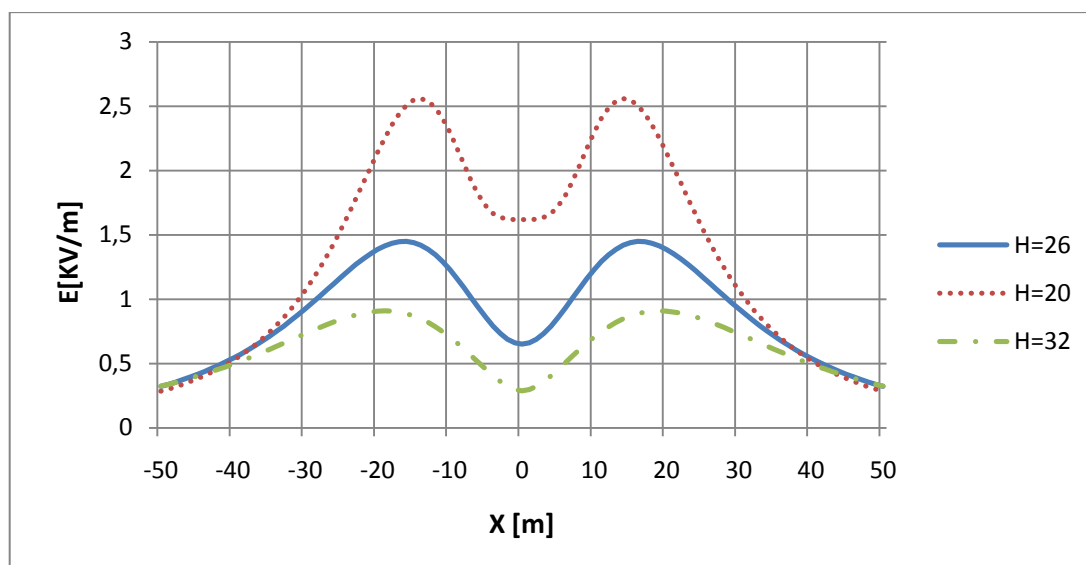


Figura 5.10 - Representação da variação do campo eléctrico E com a altura H ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira.

Da mesma forma se aumentarmos a flecha dos condutores estamos a aumentar o campo eléctrico originado pela linha á superfície, uma vez que quanto maior for a flecha menor a altura média dos condutores, ou seja menor é a altura entre a superfície e os condutores.

5.1.4 - Influência do número de condutores por fase no cálculo do campo eléctrico

Na secção 5.1.1 vimos a influência da geometria no campo eléctrico gerado por uma linha. Agora utilizando as diferentes geometrias das Figuras 5.1, 5.3, 5.4 e 5.5, mas com apenas um condutor por fase obteve-se os seguintes resultados:

Tabela 5.3 - Valores do campo eléctrico obtidos para diferentes geometrias com um condutor por fase.

Configuração	Esteira	Vertical	Triângulo	Triângulo invertido
E_p (KV/m)	1,013	2,404	1,5205	1,913
E_{max} (KV/m)	2,236	2,404	1,790	1,913

Como se verifica pela Tabela 5.3 existe um aumento significativo do campo eléctrico á superfície quando existe apenas um condutor por fase. Isto deve-se ao facto das cargas se distribuírem ao longo de apenas um condutor. O comportamento do campo eléctrico na vizinhança da linha, com um condutor por fase pode ser observado na Figura 5.11:

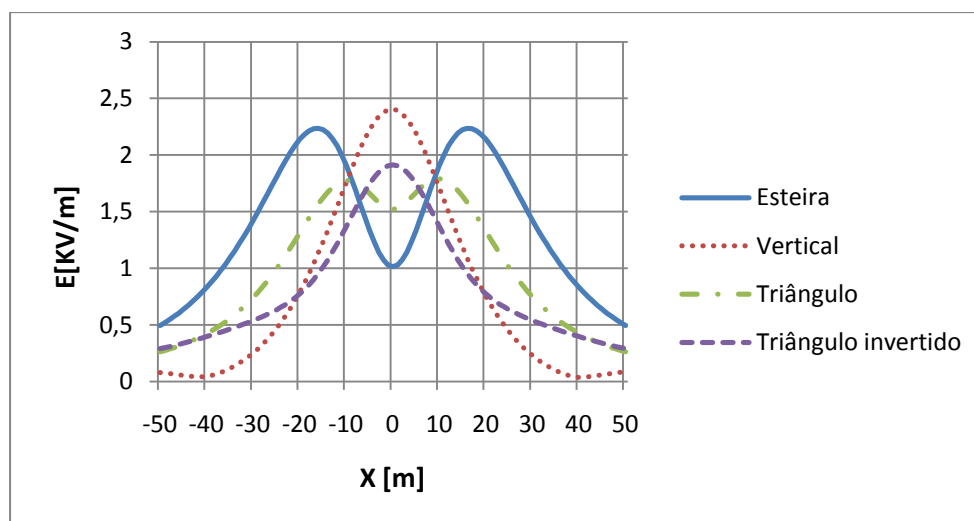


Figura 5.11 - Representação da variação do campo eléctrico E para diferentes geometrias, com um condutor por fase ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).

Fazendo uma análise comparativa dos gráficos das Figuras 5.11 e 5.6 conclui-se que o comportamento do campo eléctrico para as diferentes geometrias é similar, acrescentando apenas o facto dos valores do campo eléctrico serem mais elevados, para linhas com apenas um condutor por fase (Figura 5.11).

5.1.5 - Influência da tensão nominal no cálculo do campo eléctrico

Em Portugal, são utilizadas para transmissão de energia em Muita Alta Tensão (MAT), linhas com tensões nominais de 150, 220 e 400KV. Utilizando a configuração da linha em esteira da Figura 5.1 fez-se a simulação do comportamento do campo eléctrico na vizinhança da linha para as diferentes tensões nominais, mantendo constante os parâmetros geométricos dos condutores. Obteve-se os seguintes resultados:

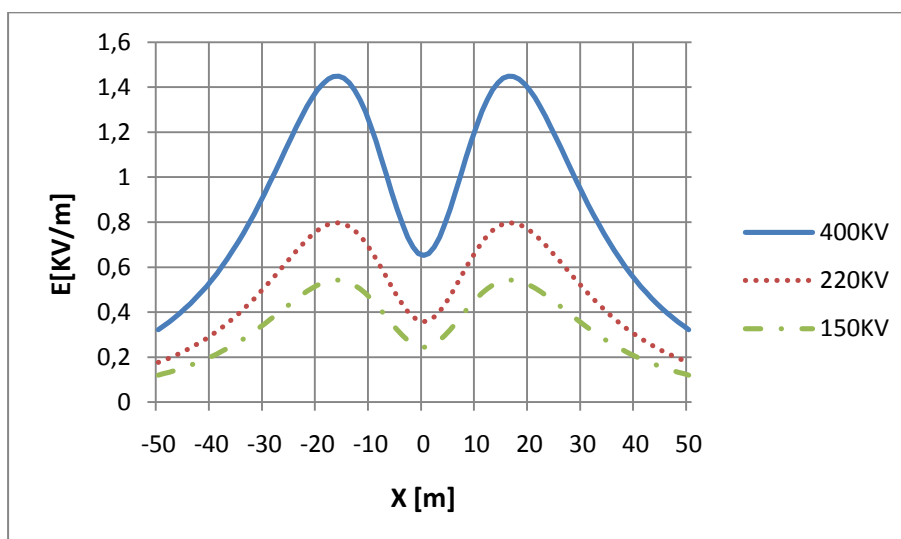


Figura 5.12 - Representação da variação do campo eléctrico E para diferentes níveis de tensão nominal, para a linha em esteira ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).

Através da análise da Figura 5.12, e tal como se previa, quanto menor for a tensão nominal da linha menor vai ser o campo eléctrico originado por esta.

5.2 - Campo magnético originado por uma linha aérea de 400KV

A partir das equações desenvolvidas na secção 4.3 para o cálculo do campo magnético em linhas aéreas de energia e a partir do programa desenvolvido em matlab utilizando essas mesmas equações, vai-se apresentar os resultados obtidos da simulação do campo magnético originado por uma linha aérea de 400KV. Para feitos de comparação será utilizado como caso base a configuração em esteira da linha da Figura 5.1, com os parâmetros dos condutores da tabela 5.1, considerando a condutividade eléctrica da terra $\sigma_t = 0,01\Omega/m^{-1}$, mas sem os condutores de guarda, uma vez que os cabos de guarda não têm uma influência significativa no campo magnético originado por uma linha á superfície. Devido á sua colocação acima dos condutores de fase, fazem diminuir o campo magnético entre 1 e 2% apenas [25].

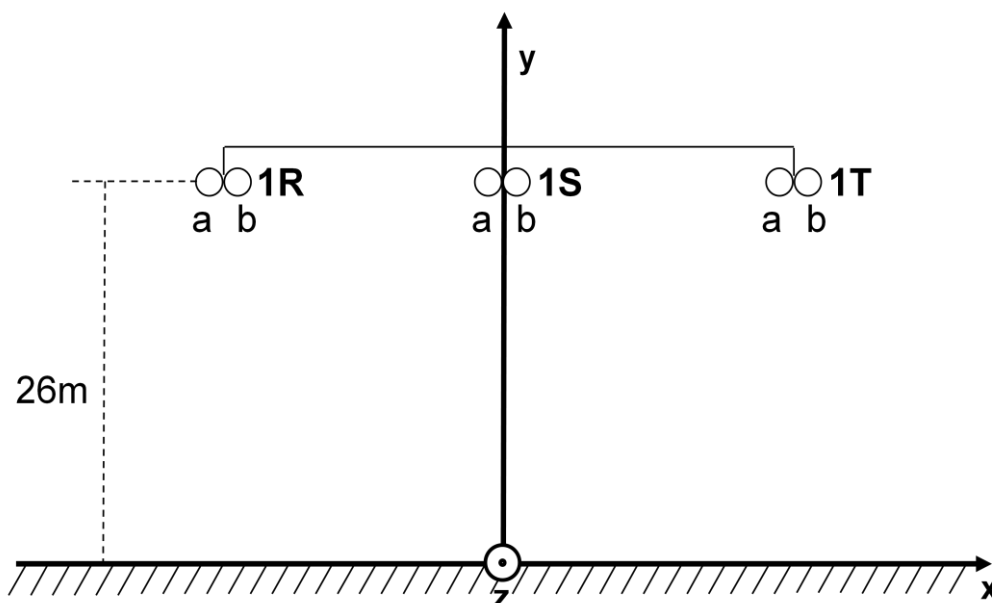


Figura 5.13 - Geometria de uma linha aérea em esteira, sem condutores de guarda (caso base), vista no poste ($z=0$).

Utilizando como ponto de observação o ponto $P(x_p = 0m ; y_p = 1,75m)$, o campo de indução magnética obtido no ponto P, originada pela linha da Figura 5.13 é:

$$B_p = 18,538 \mu T \quad (\text{Eq.5.6})$$

Fazendo variar a ordenada x_p entre -50 e $+50m$ obtém-se:

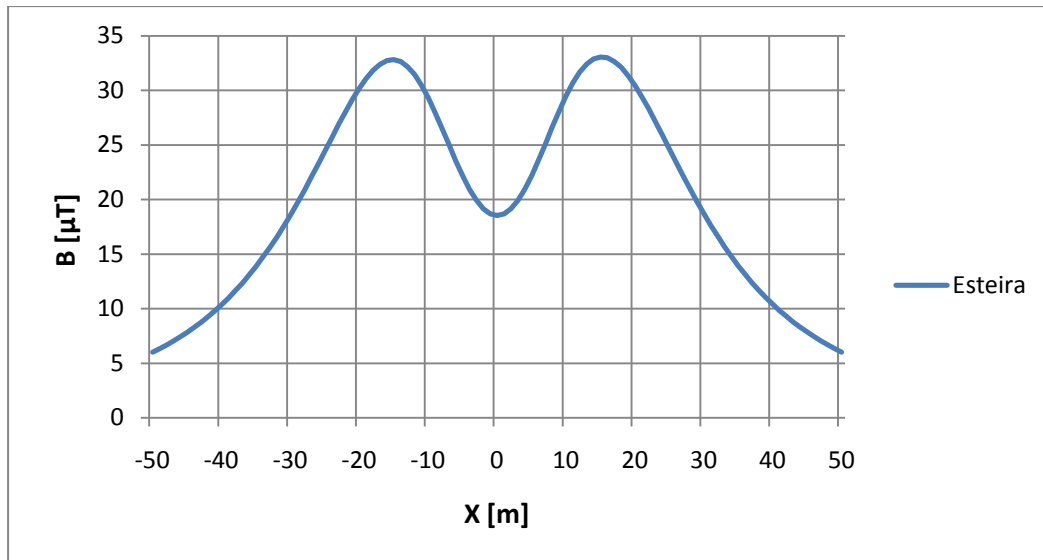


Figura 5.14 - Variação do campo de indução magnética B com a distância X ($x \in [-50m; 50m]$, $y = 1,75m$), para uma linha aérea em esteira (caso base).

O campo magnético de indução magnética atinge o seu máximo para valores de $X = -15$ e $X = +15$ m:

$$B_{max} = 33,064 \mu T \quad (\text{Eq.5.6})$$

Os resultados foram obtidos tendo em conta a não uniformidade da linha (catenária). De modo a verificar a importância de considerar a catenária no cálculo do campo magnético em detrimento da linha com altura média obteve-se:

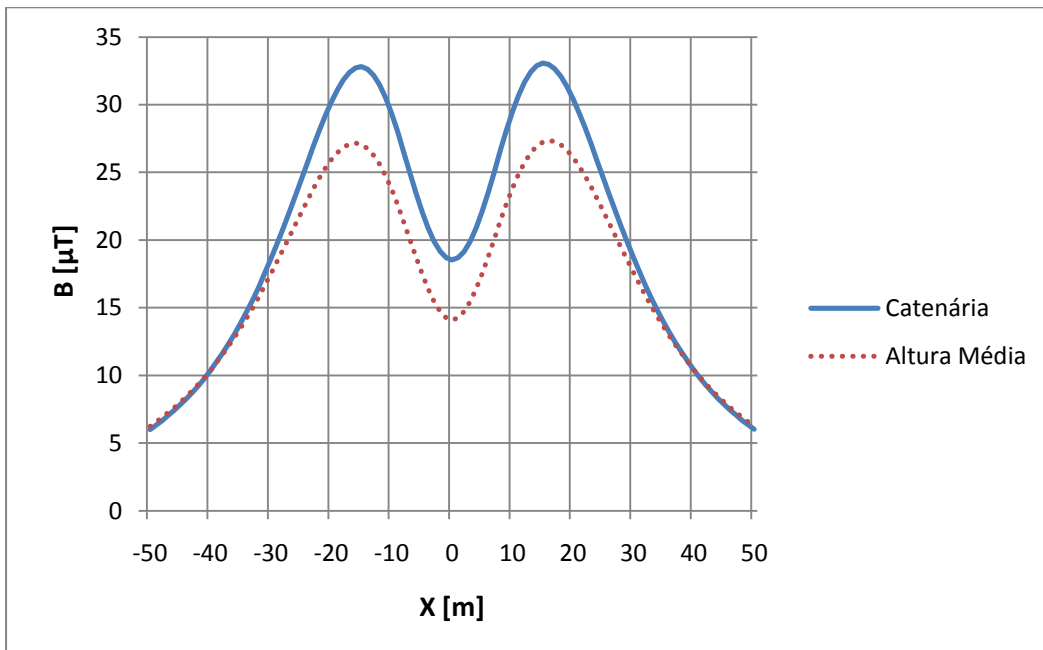


Figura 5.15 - Comparação entre a variação do campo de indução magnética B com a distância x ($x \in [-50m; 50m]$, $y = 1,75m$), considerando a linha não uniforme (catenária) e a linha com altura média, para uma linha em esteira.

Como se pode observar no gráfico da Figura 5.15 a situação em que é usada a linha com altura média faz uma estimativa do campo magnético por defeito, quando comparada com a situação real (catenária). Para o mesmo ponto de observação o campo de indução magnética originado pela linha com altura média é:

$$B_p = 14,093 \mu T \quad (\text{Eq.5.7})$$

Com o seu ponto máximo:

$$B_{max} = 27,356 \mu T \quad (\text{Eq.5.8})$$

a ocorrer para $X = -16$ e $X = +16m$. A consideração da linha com altura média produz uma redução de cerca de 17% do valor máximo do campo magnético, em relação á situação de não uniformidade da linha. Esta redução tão significativa, comprova a importância de considerar a não uniformidade da linha no cálculo do campo magnético ao contrário do que acontece no campo eléctrico.

Na Figura 5.16 está representada a variação do campo de indução magnética em função da distância em z :

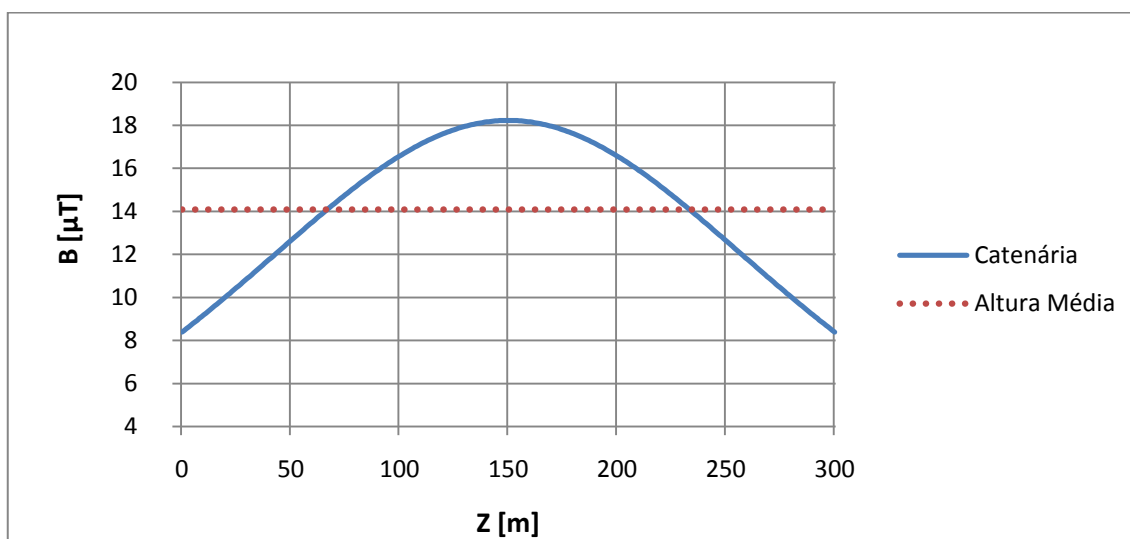


Figura 5.16 - Representação da variação do campo de indução magnética B com a distância z ($x = 0m$, $y = 1,75m$, $z \in [-50m; 50m]$), considerando a linha não uniforme (catenária) e a linha com altura média.

Mais uma vez, fica demonstrado que a utilização da linha considerando a sua altura média é uma aproximação simplificada da realidade.

5.2.1 - Influência da geometria da linha no cálculo do campo magnético

Analogamente ao que foi feito na secção 5.1.1 para o campo eléctrico, vai-se simular a influência da geometria da linha no cálculo do campo magnético. Serão analisadas as geometrias das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mas sem condutores de guarda:

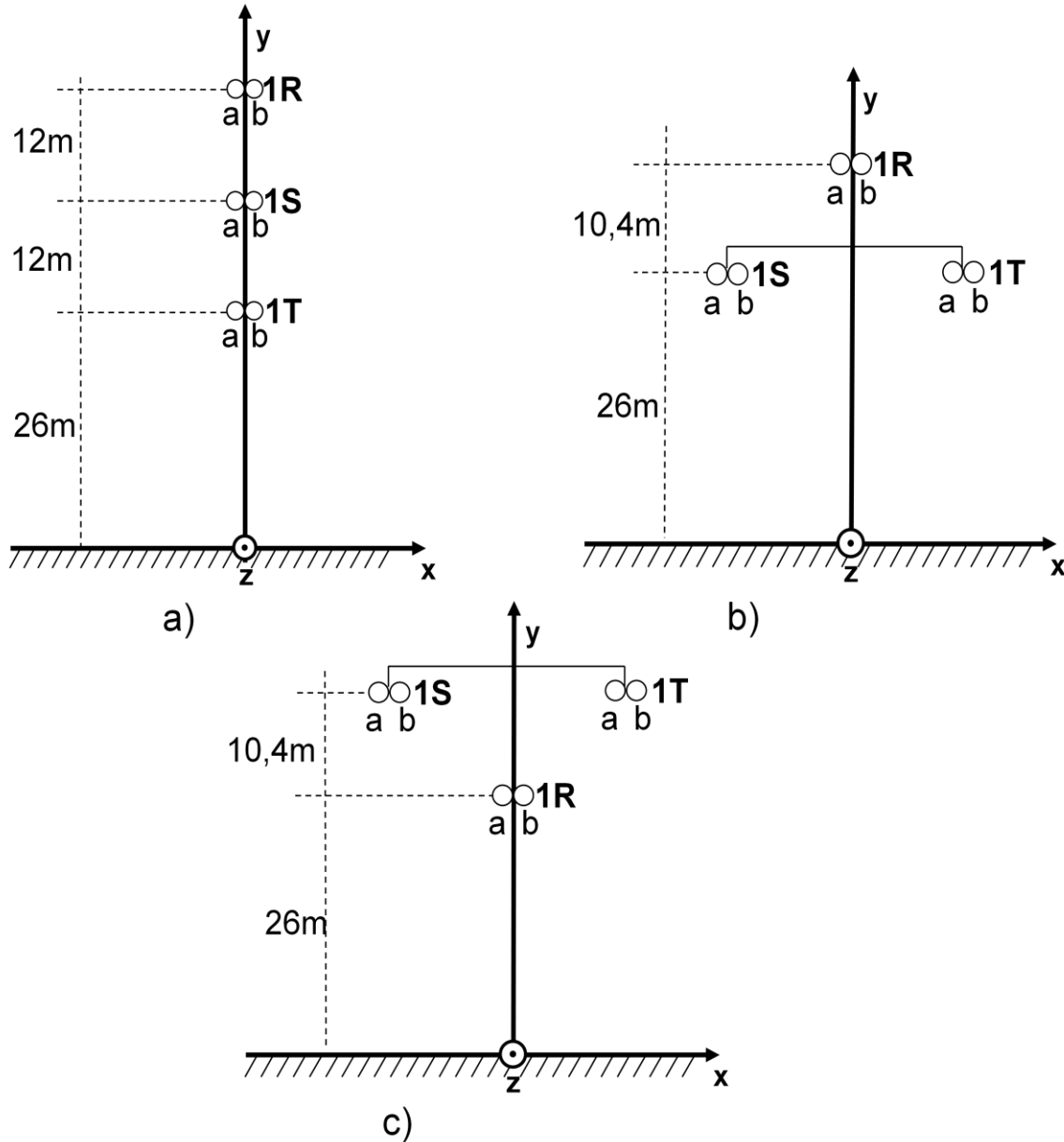


Figura 5.17 - Representação geométrica das diferentes configurações de linha em análise, vista do poste ($z=0$). a) Linha na vertical; b) Linha em triângulo; c) Linha em triângulo invertido.

Fazendo variar o campo de indução magnética em função da distância x obteve-se os seguintes resultados para as diferentes configurações da linha:

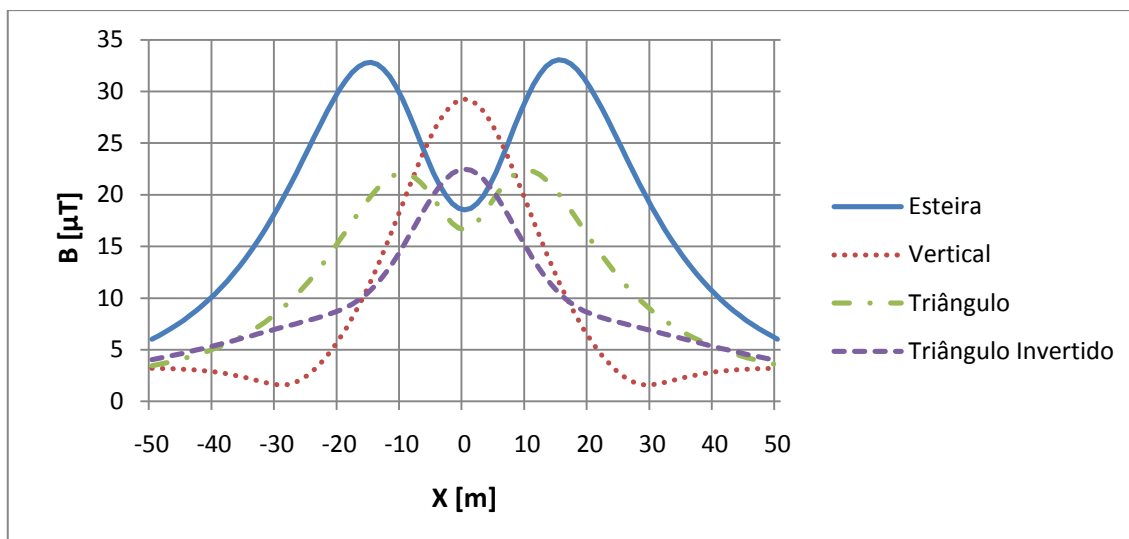


Figura 5.18 - Representação da variação do campo de indução magnética B para diferentes geometrias ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).

Tabela 5.4 - Valores do campo de indução magnética obtidos para diferentes geometrias.

Configuração	Esteira	Vertical	Triângulo	Triângulo invertido
B_p (μT)	18,538	29,258	16,618	22,482
B_{max} (μT)	33,064	29,258	22,359	22,482

Ao contrário do que acontece com o campo eléctrico a configuração que apresenta o maior campo de indução magnética na vizinhança da linha é a configuração em esteira, com excepção entre $X = -7$ e $X = 7m$. No entanto no ponto de observação $P(x_p = 0m; y_p = 1,75m)$ a configuração com maior campo magnético é a linha na vertical. Esta configuração apresenta também os valores mais baixos na vizinhança da linha a partir de $X = -17$ e $X = 17m$. A linha em triângulo apresenta o menor campo de indução magnética no ponto de observação P.

Tendo em conta os resultados obtidos, torna-se difícil eleger uma configuração como potencial limitadora do campo magnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia.

5.2.2 - Influência da distância entre condutores de fase no cálculo do campo eléctrico

Na secção 5.1.2 concluiu-se que quanto menor a distância D entre os condutores de fase menor o campo eléctrico originado pela linha à superfície. Nesta secção pretende-se demonstrar a influência da distância D entre condutores de fase no cálculo do campo de indução magnética na vizinhança da linha. Mais uma vez, para efeitos de comparação será utilizada a linha em esteira da Figura 5.13:

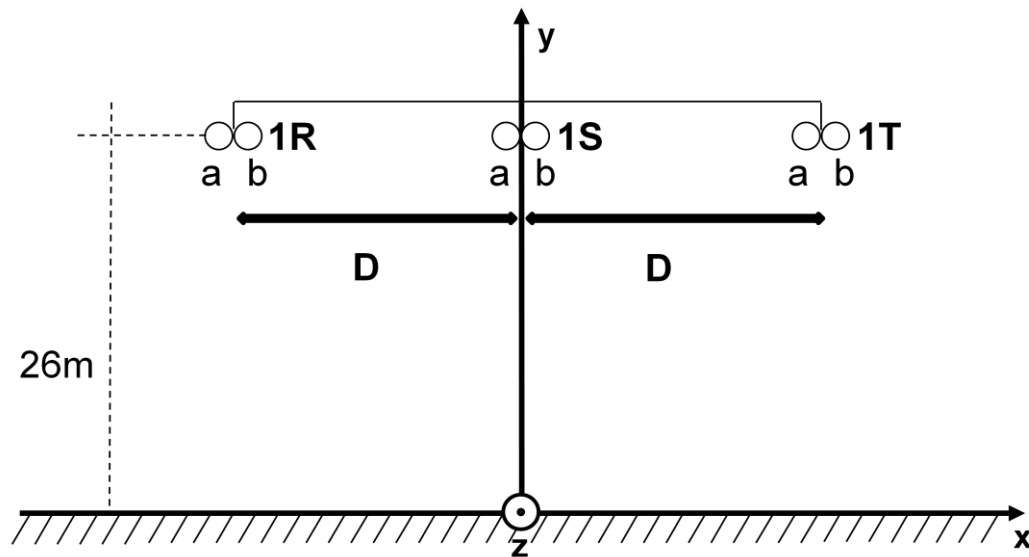


Figura 5.19 - Representação da distância D na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo magnético.

Os resultados obtidos são os seguintes (Figura 5.20):

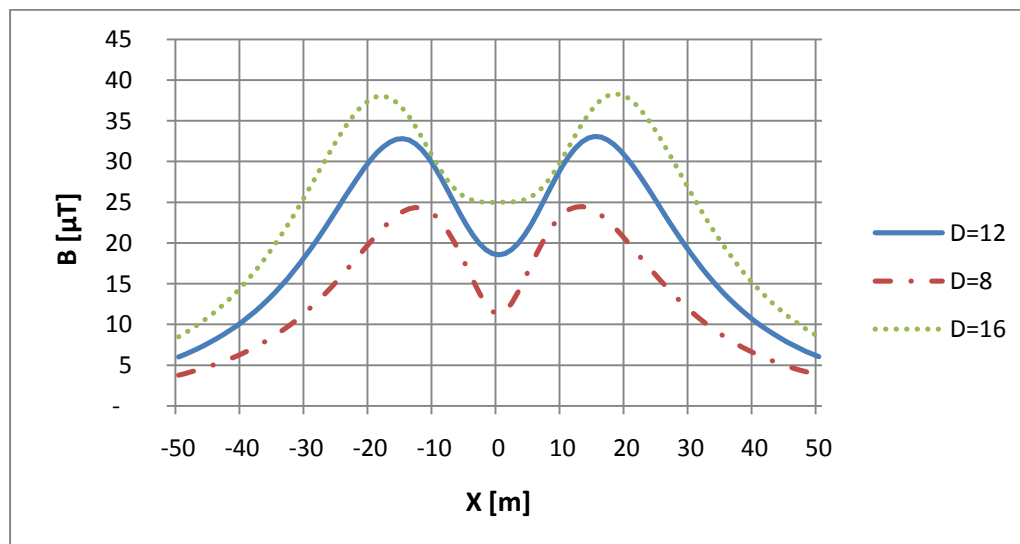


Figura 5.20 - Representação da variação do campo de indução magnética B com a distância D ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira.

Analogamente ao que acontece no campo eléctrico, quanto menor for a distância D entre condutores de fase menor o campo de indução magnética originado pela linha á superfície. Uma solução eficaz para reduzir os campos magnéticos das linhas pode passar por diminuir a distância entre condutores, mas limitada pela necessidade de manter as distâncias de isolamento entre condutores.

5.2.3 - Influência da distância ao solo dos condutores de fase no cálculo do campo magnético

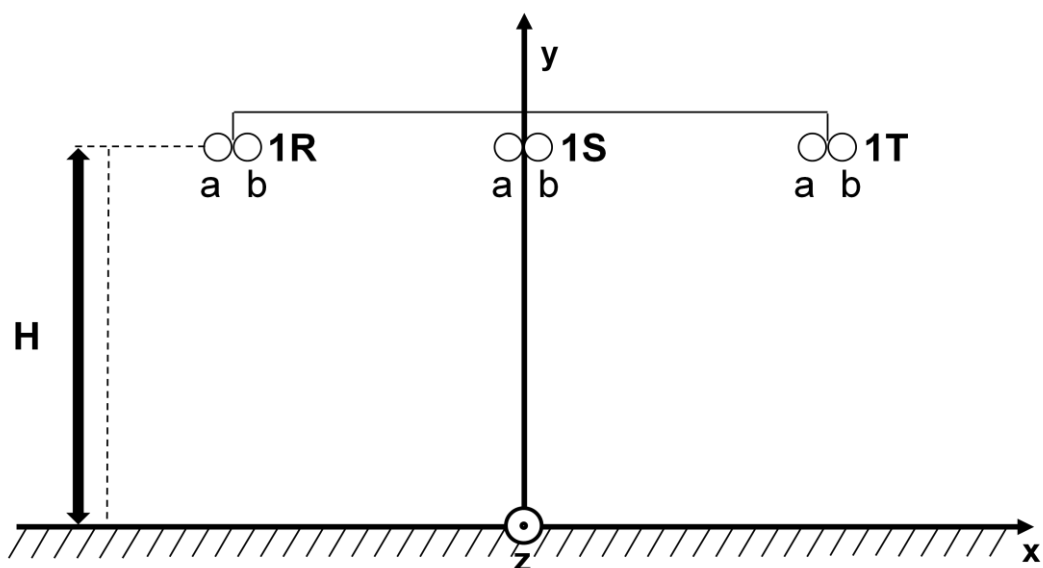


Figura 5.21 - Representação da distância H na linha em esteira, vista do poste ($z=0$), para o cálculo do campo magnético.

Variando a distância H ao solo dos condutores de fase obteve-se os seguintes resultados:

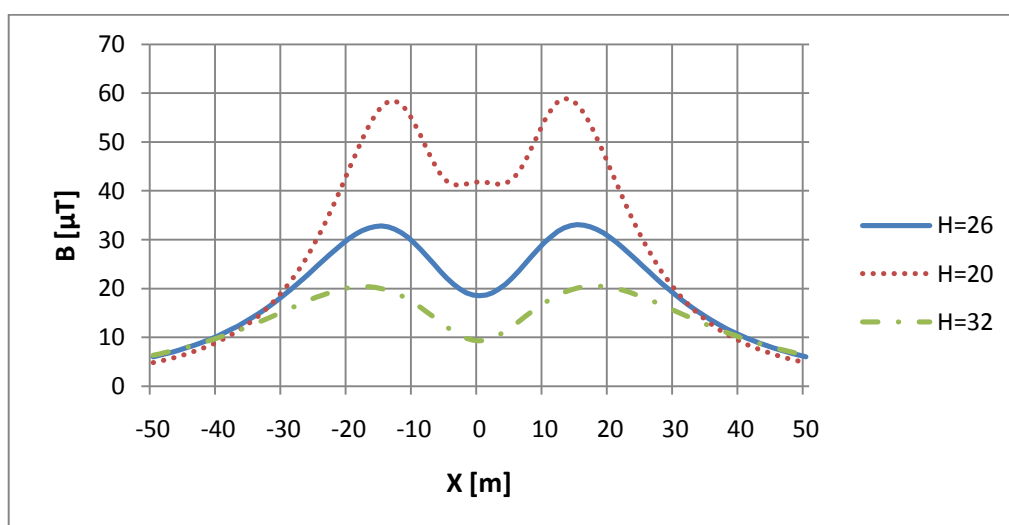


Figura 5.22 - Representação da variação do campo de indução magnética B com a altura H ($y = 1,75m$, $x \in [-50m; 50m]$) para a geometria em esteira.

Quanto menor for a distância entre a superfície e os condutores de fase maior é o campo originado pela linha na vizinhança da linha. Note-se que o valor máximo do campo de indução magnética para uma linha com os condutores a 20m de altura da superfície (vista do poste) é aproximadamente o dobro do valor máximo duma linha com os mesmos condutores a 26m de altura.

Uma solução para reduzir o campo magnético pode passar por elevar a altura dos postes, com a limitação dessa solução criar um aumento dos custos de construção das linhas, uma vez que a elevação da altura dos postes obriga á utilização de postes de maiores dimensões.

5.2.4 - Influência do número de condutores por fase no cálculo do campo eléctrico

Nesta secção vai estudar-se a influência do número de condutores por fase no cálculo do campo de indução magnética, fazendo a simulação do campo magnético originado pelas diferentes configurações da Figura 5.17 mas com apenas um condutor por fase e comparando os resultados com os valores obtidos para a situação em que são utilizados dois condutores por fase (Figura 5.18 e Tabela 5.4).

Após a simulação no matlab obteve-se:

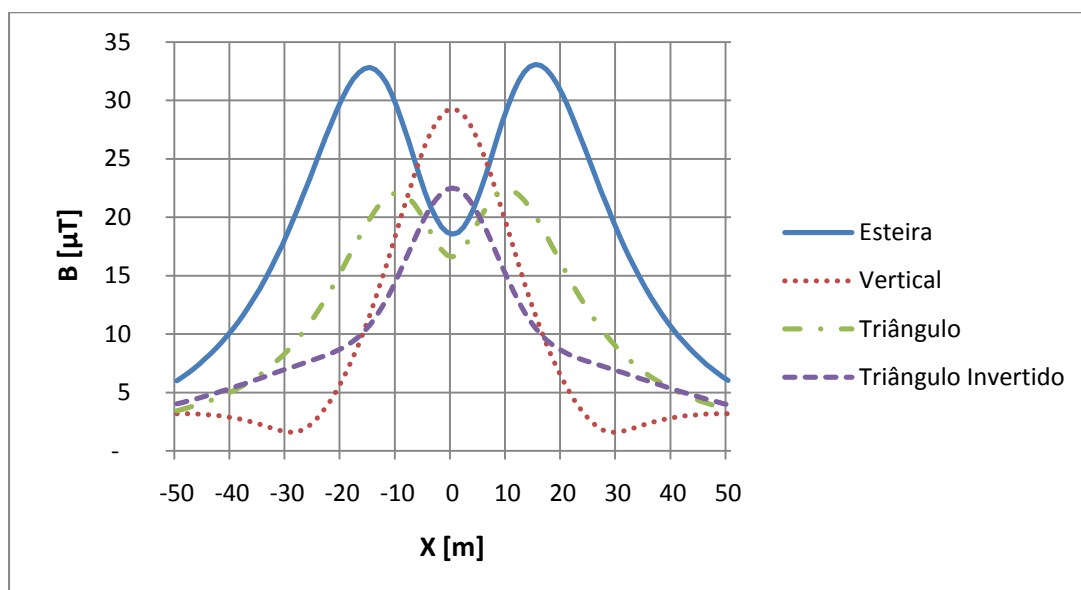


Figura 5.23 - Representação da variação do campo de indução magnética B para diferentes geometrias, com um condutor por fase ($y = 1,75m$ $x \in [-50m; 50m]$).

Tabela 5.5 - Valores do campo de indução magnética obtidos para diferentes geometrias com um condutor por fase.

Configuração	Esteira	Vertical	Triângulo	Triângulo invertido
B_p (μT)	18,546	29,263	16,624	22,488
B_{max} (μT)	33,070	29,263	22,362	22,488

Comparando os valores obtidos pela Tabela 5.4 e 5.5 observa-se um aumento pouco significativo do campo magnético quando se utiliza apenas um condutor por fase. Pode concluir-se que a diferença entre utilizar linhas com um condutor por fase ou linhas com dois condutores por fase é praticamente marginal no que diz respeito ao campo magnético.

5.2.5 - Influência da tensão nominal no cálculo do campo magnético

Nesta secção pretende-se estudar a influência da tensão nominal no campo magnético originado por uma linha aérea. Fez-se a simulação para valores de tensão de 150, 220 e 400KV da linha em esteira (Figura 5.13), mantendo a potência transmitida ($S = 1400MVA$). Obteve-se os seguintes resultados:

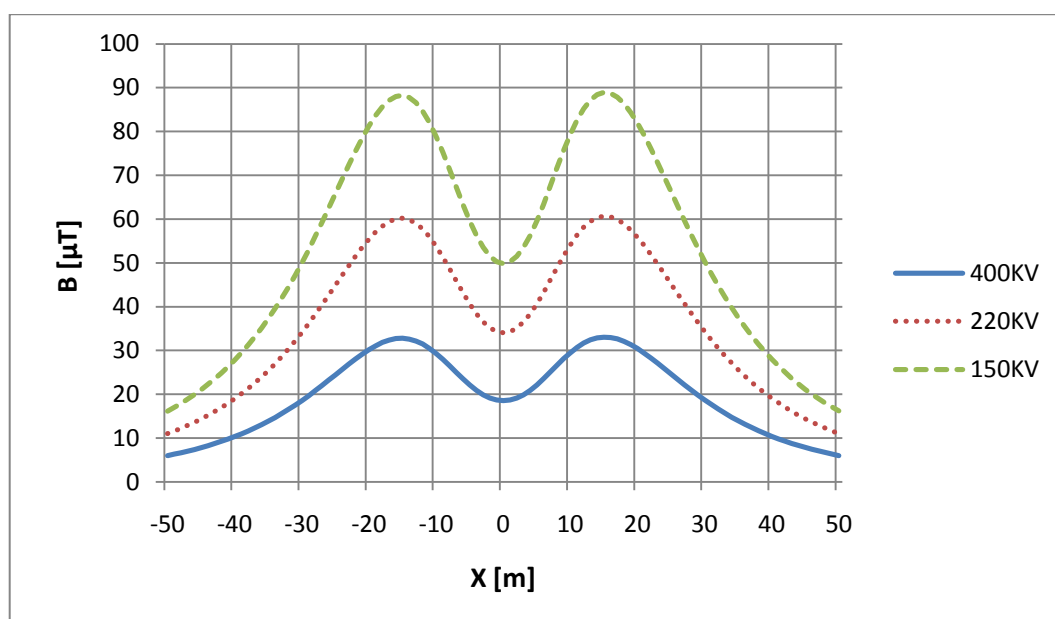


Figura 5.24 - Representação da variação do campo de indução magnética B para diferentes níveis de tensão nominal, para a linha em esteira ($y = 1,75m$ e $x \in [-50m; 50m]$).

Ao contrário do que acontece com o campo eléctrico, quanto maior for a tensão nominal da linha menor é o campo magnético originado por esta. Isto deve-se ao facto de, para a mesma potência transmitida, quanto maior for a tensão menor vai ser corrente a circular nos condutores e como se verifica na Eq.4.47, quanto menor a corrente no condutor menor a intensidade do campo magnético originado por este.

5.3 - Sumário

Neste capítulo foi analisada a linha aérea de transmissão de energia quanto ao campo eléctrico e magnético originado por esta. Como ferramenta de cálculo foi utilizado um programa desenvolvido em matlab, baseado nas equações do campo eléctrico e magnético apresentadas no capítulo 4. Foram testados diferentes tipos de linha, bem como diferentes geometrias obtendo-se resultados gráficos e numéricos, da variação do campo no ponto de observação P e na vizinhança da linha.

Estudou-se o campo eléctrico e magnético de forma independente de modo a analisar os factores que influenciam o cálculo de cada um dos campos separadamente.

Os principais resultados obtidos foram:

1. A geometria em esteira é a que apresenta menor valor de campo eléctrico no ponto de observação analisado.
2. Quanto menor a distância entre os condutores de fase menor o campo eléctrico e magnético originado pela linha.
3. A elevação da altura dos postes é um factor limitativo do campo eléctrico e magnético originado pela linha á superfície.
4. Utilizando apenas um condutor por fase obtém-se valores de campo eléctrico e magnético mais elevados, sendo que para o campo magnético este aumento seja pouco significativo.
5. Para a mesma potência transmitida, quanto maior a tensão nominal da linha maior o campo eléctrico e menor o campo magnético na vizinhança da linha.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões do estudo realizado, bem como algumas sugestões de estudos a desenvolver na área de investigação deste trabalho.

6.1 - Conclusões

Os campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEMEBF) estão presentes no quotidiano da maioria dos seres humanos. Sempre que exista condução de electricidade através de linhas de transporte, linhas de distribuição ou em diversas aplicações eléctricas são criados campos eléctricos e magnéticos na proximidade dessas linhas e aplicações.

Ao longo das últimas décadas muito se tem questionado sobre os possíveis riscos para a saúde associados à exposição aos CEMEBF, nomeadamente ao aumento da incidência de cancro. Estas questões levaram a que as principais organizações mundiais de saúde criassem uma plataforma de investigação onde foram efectuados estudos sobre os potenciais riscos da exposição aos CEMBF. Como resultado destes estudos foram instituídos limites básicos para a exposição pública ao campo eléctrico e magnético, adoptados por diversos países, incluindo Portugal. A Organização Mundial da Saúde (OMS) rejeita a convicção de que a exposição aos CEMEBF são prejudiciais à saúde, no entanto, continua a promover a investigação nesta área até que se cheguem a resultados conclusivos e recomenda que os países devem adoptar os limites básicos estabelecidos pela Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação Não Ionizante (ICNIRP) na sua legislação.

As linhas de transmissão de energia são uma fonte poderosa de CEMEBF. No intuito de compreender o comportamento do campo eléctrico e magnético originado pelas linhas estudaram-se diferentes tecnologias de transmissão de energia: cabos subterrâneos em corrente alternada, linhas de corrente contínua (HVDC) e a mais comum tecnologia de transmissão, as linhas aéreas de corrente alternada.

Em relação a esta última, foi desenvolvida, neste trabalho, uma metodologia de cálculo que permite analisar o campo eléctrico e magnético na vizinhança de uma linha aérea de corrente alternada, incluindo o ponto correspondente à altura média de um ser humano. Baseada em equações elementares do campo eléctrico e magnético e modelos simples das

linhas, esta metodologia permite obter resultados gráficos e numéricos do comportamento do campo eléctrico e magnético na vizinhança das linhas, tendo sido analisadas diferentes geometrias: configuração em esteira, vertical, triângulo e triângulo invertido.

Foram estudados possíveis factores que influenciam o cálculo do campo eléctrico e magnético originado pelas linhas aéreas de transmissão: geometria da linha, distância entre condutores de fase, distância ao solo dos condutores de fase, número de condutores por fase e tensão nominal da linha. As principais conclusões resultantes das simulações realizadas foram:

1. Campo eléctrico

- a) Influência da geometria - A linha em esteira foi a que produziu menor campo eléctrico no ponto de observação analisado e a linha na vertical foi a que originou um maior campo eléctrico para o mesmo ponto de observação.
- b) Distância entre os condutores de fase - Quanto menor a distância entre condutores de fase menor o campo eléctrico originado pela linha. Uma solução eficaz para reduzir o campo eléctrico é diminuir a distância entre condutores de fase, mas limitada pela necessidade de manter as distâncias de isolamento entre condutores.
- c) Distância ao solo dos condutores por fase - Quanto maior a distância ao solo dos condutores de fase menor o campo eléctrico originado pela linha. Uma solução eficaz para reduzir o campo eléctrico é elevar os condutores de fase. No entanto, a elevação dos condutores implica a construção de postes mais elevados e de maiores dimensões, o que implica também um maior gasto económico na construção das linhas.
- d) Número de condutores de fase - Aumentando o número de condutores de fase diminui o campo eléctrico originado pela linha.
- e) Tensão nominal da linha - Para a mesma potência transmitida, quanto maior a tensão nominal da linha maior o campo eléctrico á superfície.

2. Campo magnético

- a) Influência da geometria - A linha em triângulo foi a que produziu menor campo magnético no ponto de observação analisado e a linha em esteira a que produz o valor máximo mais elevado.
- b) Distância entre os condutores de fase - Analogamente ao que acontece no campo eléctrico, quanto menor a distância entre condutores de fase menor o campo magnético originado pela linha.
- c) Distância ao solo dos condutores de fase - Quanto maior a distância ao solo dos condutores de fase menor o campo magnético originado pela linha. Uma solução eficaz para reduzir o campo eléctrico é elevar os condutores de fase.
- d) Número de condutores por fase - Não foi observada uma variação significativa do campo magnético com o número de condutores por fase.
- e) Tensão nominal da linha - Para a mesma potência transmitida, quanto maior a tensão nominal da linha menor o campo magnético á superfície.

6.2 - Trabalhos futuros

A reflexão e o conjunto de actividades desenvolvidas no âmbito deste trabalho, desde o levantamento do estado de arte no domínio dos normativos relativos aos campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEMEBF), à análise numérica e gráfica do comportamento electromagnético originado pelas linha aéreas mais comumente utilizadas, passando pela análise detalhada de outras tecnologias de transmissão, tornaram evidente a possibilidade de aprofundar este trabalho com estudos complementares nomeadamente:

- Desenvolvimento de um modelo de cálculo que permita analisar o comportamento dos sistemas de transmissão em situações de instabilidade (sobretensões, sobreintensidades, variações de frequências).
- Desenvolvimento de um modelo de cálculo para linhas de transmissão HVDC.
- Análise da problemática dos CEMEBF em outros componentes dos sistemas de transmissão, nomeadamente, subestações e postos de transformação.

Anexos

Anexo A - Lei nº 30/2010

A lei de “protecção contra a exposição aos campos eléctricos e magnéticos derivados de linhas de instalações e de equipamentos eléctricos” publicada em Diário da República a 2 de Setembro de 2010, no contexto do trabalho realizado, contempla os seguintes artigos:

Artigo 1.º

Objecto

1 – A presente lei regula os mecanismos de definição dos limites da exposição humana a campos magnéticos, eléctricos e electromagnéticos derivados de linhas, de instalações ou de equipamentos de alta tensão e muito alta tensão, tendo em vista salvaguardar a saúde pública.

2 – Subsidiariamente, a presente lei visa preservar os interesses públicos da protecção do ambiente e, em especial, da paisagem e do ordenamento do território, dos possíveis impactes negativos proporcionados pelas linhas, instalações e equipamentos de alta e muito alta tensão a que se refere o número anterior.

Artigo 2.º

Limites de exposição humana

1 – Compete ao Governo regulamentar, por decreto -lei, os níveis da exposição humana máxima admitida a campos electromagnéticos, derivados das linhas, instalações ou equipamentos de alta e muito alta tensão a que se refere o artigo anterior, tanto para os casos de campos magnéticos, como para os de campos eléctricos, no quadro das orientações da Organização Mundial de Saúde e das melhores práticas da União Europeia.

2 – A regulamentação dos níveis da exposição humana aos campos magnéticos deve comportar patamares especialmente prudentes para as situações de:

- a) Unidades de saúde e equiparados, exceptuada a própria exposição derivada dos equipamentos e instrumentos indispensáveis ao normal funcionamento dessas instalações;
- b) Quaisquer estabelecimentos de ensino ou afins, como creches ou jardins -de -infância;
- c) Lares da terceira idade, asilos e afins;
- d) Parques e zonas de recreio infantil;
- e) Edifícios residenciais
- f) Espaços, instalações e equipamentos desportivos.

Artigo 5.º**Monitorização das populações residentes**

No cumprimento do princípio da precaução, prevenção e responsabilidade partilhada, cabe à Direcção -Geral da Saúde desenvolver a monitorização dos efeitos nas populações residentes nas áreas rurais e urbanas da exposição aos campos eléctricos e magnéticos derivados de linhas de instalações e de equipamentos eléctricos.

Artigo 6.º**Promoção do conhecimento, da informação e da investigação**

Com vista a possibilitar, em permanência, o acesso e a difusão da informação técnica mais actualizada sobre as matérias objecto da presente lei, o Governo adopta as necessárias medidas para:

- a) A promoção da investigação nacional nestes domínios;
- b) A articulação, em redes do conhecimento e de permuta de experiências e de saberes, com instituições, entidades e países que se dediquem às matérias objecto da presente lei;
- c) Criar sistemas de disponibilização permanente de informação aos cidadãos sobre estas temáticas;
- d) Criar um sistema de monitorização dos níveis de radiação electromagnética e de vigilância epidemiológica em áreas consideradas sensíveis.

Referências bibliográficas

- [1] Nussenzveig, H. Moysés. Curso de física básica, S. Paulo, Vol. 3, 1997
- [2] WHO. Disponível em http://www.who.int/pehemf/publications/facts/fs322_ELF_fields_portuguese.pdf. Acesso em Maio/2010.
- [3] ICNIRP. Disponível em <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>. Acesso em Abril/2010.
- [4] Jornal Oficial das Comunidades Europeias em Linha: EUR-Lex. Disponível em <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:199:0059:0070:PT:PDF>. Acesso em Maio/2010.
- [5] Diário da República: DRE. Disponível em <http://www.dre.pt/pdf1s/2004/11/275B00/68346838.pdf>. Acesso em Maio/2010.
- [6] Instituto Superior Técnico de Lisboa. Disponível em <https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/164948/1/CEMEBF>. Acesso em Maio/2010.
- [7] IARC. Disponível em <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol80/mono80.pdf>. Acesso em Maio/2010.
- [8] Liberato, Paulo & Monteiro, Carolina, A Electricidade e a saúde: Os campos electromagnéticos de frequência reduzida, REN, 2008.
- [9] WHO. Disponível em http://193.136.221.5/item/administracao/project_documentation/monIT_Ext_Tec_0615_03_FactSheet263.pdf. Acesso em Maio/2010.
- [10] Environmental Health Criteria Monograph N.º 238. Disponível em http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html. Acesso em Maio/2010.
- [11] National Center for Biotechnology Information - NCBI. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/453167>. Acesso em Maio/2010.
- [12] National Center for Biothecnology Information - NCBI. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9203424>. Acesso em Maio/2010.
- [13] National Center for Biotechnology Information - NCBI. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10221320>. Acesso em Maio/2010.
- [14] National Center for Biotechnology Information - NCBI. Disponível em <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2363785/pdf/84-6691630a.pdf>. Acesso em Maio/2010
- [15] Paiva, José Pedro Sucena, Redes de energia eléctrica: uma análise sistémica, 2ª Edição, Lisboa , 2007.
- [16] R.S.L.E.A.T - Regulamento de Segurança de Linhas Eléctricas de Alta Tensão - Edição DGE.

- [17] EMFs. Disponível em <http://www.emfs.info/Sources+of+EMFs/Overhead+power+lines/specific/400+kV+underground+magnetic.htm>. Acesso em Julho/2010.
- [18] EMFs. Disponível em <http://www.emfs.info/Sources+of+EMFs/Underground/height+for+underground.htm>. Acesso em Julho/2010.
- [19] Abb. Disponível em [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/7fc521c17951a33ac1256fda004f778d/\\$File/Interlig%20Elos%20HVDC%20web.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/7fc521c17951a33ac1256fda004f778d/$File/Interlig%20Elos%20HVDC%20web.pdf). Acesso em Julho/2010.
- [20] Abb. Disponível em http://www.twolf.com/pub/energy/technology_abb.pdf. Acesso em Julho/2010.
- [21] Electricity Commission. Disponível em <http://www.electricitycommission.govt.nz/pdfs/submissions/pdfstransmission/NI-GUP-Mar07/MakinJ-M4.pdf>. Acesso em Julho/2010.
- [22] Mamishev, A.V.; Nevels, R.D.; Russell, B.D.; "Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol.11, no.3, pp.1571-1576, Jul. 1996.
- [23] Amiri, R.; Hadi, H.; e Marich, M.;, The influence of sag in the Electric Field calculation around High Voltage Overhead transmission lines," Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2006 IEEE Conference on , pp.206-209, 15-18 Oct. 2006.
- [24] General Electric Company, "Transmission Line Reference Book: 345kV and above", Electric Power Research Institute, 2nd ed., 1982.