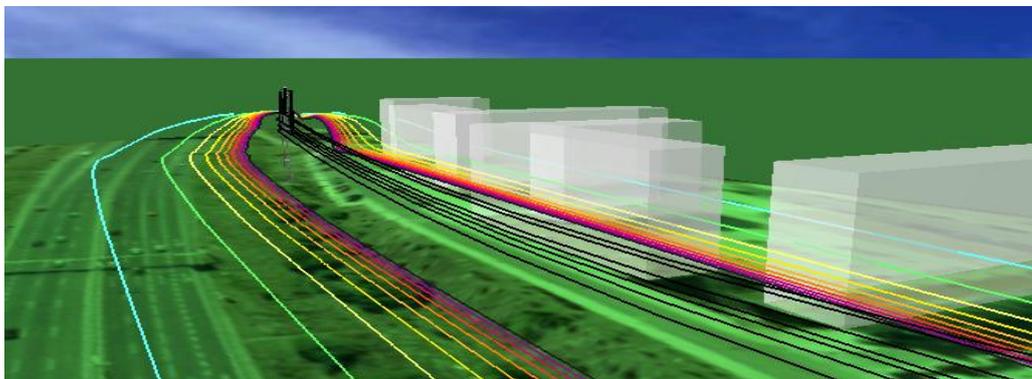




INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa



Estimativa de Campos Magnéticos Gerados por Linhas Aéreas de Distribuição, em Locais de Exposição Continuada

Luís Miguel Marreiros Rosa

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

Júri

Presidente: Professor Paulo José da Costa Branco

Orientador: Professor José Luís Costa Pinto de Sá

Vogal: Professora Maria Eduarda de Sampaio Pinto de Almeida Pedro

Outubro de 2010

Agradecimentos

Utilizo este espaço para agradecer a todas as pessoas que de uma forma directa ou indirecta me ajudaram a chegar até aqui, e que me possibilitaram ultrapassar os desafios durante o desenvolvimento deste projecto tanto a nível pessoal como a nível académico.

Em especial, gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Pinto de Sá, pelo apoio e disponibilidade sempre demonstradas, com os seus conhecimentos nos mais diversos momentos, esclarecendo as dúvidas existentes e atribuindo novas tarefas que permitiram uma evolução favorável do trabalho.

Aos meus pais, irmão e família pelo seu apoio incondicional que permitiu todo este percurso.

Aos meus amigos, que estiveram sempre presentes, desde o início à conclusão desta dissertação.

A todos eles deixo aqui expresso o meu Agradecimento.

Resumo

Os campos magnéticos gerados por equipamentos de transmissão e distribuição de energia, juntamente com os possíveis efeitos crónicos associados à exposição prolongada aos mesmos têm sido objectos de estudo e preocupação ao longo das últimas décadas.

É neste âmbito dos possíveis efeitos crónicos associados à exposição prolongada a campos magnéticos que surge este trabalho. O objectivo do mesmo é então, para algumas linhas aéreas de distribuição tipo, criar modelos tridimensionais das linhas e extrapolar os campos magnéticos para locais próximos de exposição pública prolongada.

Para tal faz-se uso de um software especializado de cálculo de campos magnéticos, o EFC-400 da empresa Narda, e de medidas de campo magnético realizadas na proximidade das linhas a estudar.

As linhas aéreas de distribuição estudadas tentaram ser seleccionadas de modo a abranger todo o tipo existente em Portugal. As linhas estudadas foram então três linhas simples e duas duplas. As linhas simples são de 10, 30 e 60kV enquanto que as duplas são de 30 e 60kV.

Os resultados obtidos mostram que, para as cargas médias diárias, só nos edifícios próximos da linha dupla de 60kV é que os campos magnéticos obtidos ultrapassam o valor de $1\mu\text{T}$ (valor limite de referência adoptado pela Suíça).

Palavras-chave: campo magnético, linha aérea de distribuição, extrapolação

Abstract

The magnetic fields generated by power transmission/distribution equipments along with the possible chronic effects associated with them have been objects of study and concern over last decades.

This work comes in this context of magnetic field possible chronic effects. The objective of this work is then, for some overhead distribution lines, to create three-dimensional models of the lines and to extrapolate the magnetic fields for close location with continuous exposure.

For this makes use of specialized appropriated software, the EFC-400 from Narda company, and magnetic field measurements made in the vicinity of the overhead lines.

The overhead lines studied attempt to cover every kind of overhead distribution lines existents in Portugal. The overhead lines are then three simple ones and two double ones. The simple ones are of 10, 30 and 60kV and the double ones are of 30 and 60kV.

The obtained results show that, for the daily media charge, the only situation where the magnetic fields exceed the value of $1\mu\text{T}$ (reference limit value adopted by Switzerland) is in the residential buildings just near the 60kV double line.

Keywords: magnetic field, overhead distribution line, extrapolate

Índice

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	v
Índice	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Figuras	x
Lista de Siglas	xiv
Nomenclatura	xv
1 Introdução	1
2 Enquadramento teórico	5
2.1 Normas referenciadas	5
2.1.1 EN 50413 (2008)	6
2.1.2 CEI 61786 (1998)	6
2.1.3 CEI 62110 (2008)	6
2.1.4 CIGRÉ WG C4-203 (2009)	7
2.2 Selecção das Linhas Aéreas	8
2.3 Campo Magnético das linhas	9
2.4 EFC-400 – Electric and Magnetic Field Calculation.....	10
2.4.1 Cálculo do Campo Magnético.....	11
3 Descrição Geral do Estudo	13
3.1 Modelação / Calibração	13
3.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada	16
4 Linha de 10kV Simples	18
4.1 Modelação / Calibração	18
4.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada	25
5 Linha de 30kV Simples	29
5.1 Modelação / Calibração	29
5.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada	35
6 Linha de 30kV Dupla	40
6.1 Modelação / Calibração	40
6.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada	47
7 Linha de 60kV Simples	53

7.1	Modelação / Calibração	53
7.2	Extrapolação para locais de exposição prolongada	63
8	Linha de 60kV Dupla	68
8.1	Modelação / Calibração	68
8.2	Extrapolação para locais de exposição prolongada	79
9	Conclusões e Desenvolvimentos Futuros	84
	Referências Bibliográficas	86
Anexo A	Menus de configuração do EFC-400	88
Anexo B	Informação sobre os apoios	92
Anexo C	Informações adicionais da linha 10kV simples	94
Anexo D	Informações adicionais da linha 30kV simples	96
Anexo E	Informações adicionais da linha 30kV dupla	98
Anexo F	Informações adicionais da linha 60kV simples	100
Anexo G	Informações adicionais da linha 60kV dupla	104

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Valores limite referência recomendados pelo CE e adoptados por Portugal.....	1
Tabela 4.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1, com 70A.....	22
Tabela 4.2 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 2, com 85A.....	23
Tabela 4.3 – Erros entre os valores medidos e calculados para os perfis 1 e 2	24
Tabela 4.4 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 60A	27
Tabela 4.5 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 60A	27
Tabela 5.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1.....	33
Tabela 5.2 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 2.....	33
Tabela 5.3 – Erros entre os valores medidos e calculados para os perfis 1 e 2	35
Tabela 5.4 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 140A	37
Tabela 5.5 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 140A	37
Tabela 6.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1.....	45
Tabela 6.2 – Erros entre os valores medidos e calculados para o único perfil.....	47
Tabela 6.3 – Campo magnético ao longo do perfil 9 com corrente de 45A em ambas as linhas	49
Tabela 6.4 – Campo magnético ao longo do perfil 10 com corrente de 45A em ambas as linhas	49
Tabela 6.5 – Campo magnético ao longo do perfil 11 com corrente de 45A em ambas as linhas	49
Tabela 7.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1, vão 27/28	58
Tabela 7.2 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 2, vão 27/28	58
Tabela 7.3 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 4.....	59
Tabela 7.4 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 5, vão 28/29.....	59
Tabela 7.5 – Erros entre os valores medidos e calculados para os perfis 1, 2, 4 e 5.....	62
Tabela 7.6 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 6 com a corrente média diária 90A	64
Tabela 7.7 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 11 com a corrente média diária 90A	64
Tabela 8.1 – Campo magnético ao longo do perfil 1, com 390A em ambas as linhas	74
Tabela 8.2 – Campo magnético ao longo do perfil 2, com 420A em ambas as linhas	75
Tabela 8.3 – Campo magnético ao longo do perfil 3, com 430A em ambas as linhas	75
Tabela 8.4 – Campo magnético ao longo do perfil 4, com 430A em ambas as linhas	75

Tabela 8.5 – Erros entre os valores medidos e calculados para os vários perfis.....	78
Tabela 8.6 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 9 com a corrente média diária, 390A em ambas as linhas	80
Tabela 8.7 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 10 com a corrente média diária, 390A em ambas as linhas	80
Tabela B.1 – Detalhes das travessas (13)	92
Tabela B.2 – Alturas apoios de betão (13)	93
Tabela B.3 – Altura apoios metálicos (13).....	93
Tabela C.1 – Campo magnético medido no perfil 1	94
Tabela C.2 – Campo magnético medido no perfil 2	94
Tabela D.1 – Campo magnético medido no perfil 1	96
Tabela D.2 – Campo magnético medido no perfil 2	96
Tabela E.1 – Altura dos condutores medidas.....	98
Tabela E.2 – Campo magnético medido no perfil 1.....	98
Tabela F.1 – Altura dos condutores medidas.....	100
Tabela F.2 – Campo magnético medido no perfil 1	100
Tabela F.3 – Campo magnético medido no perfil 2.....	101
Tabela F.4 – Campo magnético medido no perfil 3.....	101
Tabela F.5 – Campo magnético medido no perfil 4.....	102
Tabela F.6 – Campo magnético medido no perfil 5.....	102
Tabela F.7 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 3 com corrente de calibração, vão 27/28	103
Tabela G.1 – Campo magnético medido no perfil 1	104
Tabela G.2 – Campo magnético medido no perfil 2	105
Tabela G.3 – Campo magnético medido no perfil 3	105
Tabela G.4 – Campo magnético medido no perfil 4	106

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Pontos de medição para determinação da média espacial	7
Figura 2.2 – Distribuição espacial do campo magnético sobre uma linha aérea.....	9
Figura 2.3 – Condutor na origem do sistema de coordenadas.....	12
Figura 3.1 – Exemplo do posicionamento do instrumento de medida e da definição do perfil de medida	14
Figura 3.2 – Exemplo de diagrama de carga do dia das medidas para a linha de 10kV simples, valores em amperes [A]	15
Figura 3.3 – Exemplo de um perfil no interior de uma habitação	17
Figura 4.1 – Posicionamento dos apoios da linha L1081	18
Figura 4.2 – Posicionamento dos apoios da linha L1081 em formato 3D	19
Figura 4.3 – Fotografias do local de realização das medidas (6) – vista do lado sul à esquerda, vista do lado norte à direita	19
Figura 4.4 – Configuração do apoio 13 em esteira horizontal sem cabo guarda.....	20
Figura 4.5 – Configuração do apoio 14 em trevo sem cabo guarda.....	20
Figura 4.6 – Identificação dos perfis de medição – relatório das medidas (6) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	21
Figura 4.7 – Catenária do condutor inferior para o modelo final, valores em metros [m]	21
Figura 4.8 – Imagem 3D da rua com a inclinação – vista do lado sul	22
Figura 4.9 – Campo magnético ao longo do perfil 1 com 70A, valores medidos e simulados....	23
Figura 4.10 – Campo magnético ao longo do perfil 2 com 85A, valores medidos e simulados..	24
Figura 4.11 – Campo magnético a 1.0m para corrente de 85A, imagem 3D	25
Figura 4.12 – Linhas de campo magnético a 1.0m para corrente de 85A, imagem 3D.....	25
Figura 4.13 – Identificação dos novos perfis localizados nas moradias mais próximas	26
Figura 4.14 – Linhas de campo magnético a 7.5m para corrente média diária 60A, imagem 3D	27
Figura 4.15 – Campo magnético ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 60A	28
Figura 4.16 – Campo magnético ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 60A	28
Figura 5.1 – Posicionamento dos apoios da linha L107	29
Figura 5.2 – Posicionamento dos apoios da linha L107 em formato 3D	30
Figura 5.3 – Fotografias do local de realização das medidas (7)	30
Figura 5.4 – Configuração dos apoios 15 e 16 em trevo com cabo de guarda	31
Figura 5.5 – Identificação dos perfis de medição – relatório das medidas (7) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	32
Figura 5.6 – Catenária do condutor inferior para o modelo final, valores em metros [m]	32
Figura 5.7 – Imagem 3D da rua com a inclinação – vista no sentido do ponto D para B	33
Figura 5.8 – Campo magnético ao longo do perfil 2, valores medidos e simulados.....	34

Figura 5.9 – Linhas de campo magnético a 1.0m, imagem 3D	35
Figura 5.10 – Identificação dos dois novos perfis sobre a moradia mais próxima.....	36
Figura 5.11 – Campo magnético ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 140A	37
Figura 5.12 – Campo magnético ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 140A	38
Figura 5.13 – Linhas de campo magnético a 4.0m para corrente 140A, imagem 3D	38
Figura 5.14 – Linhas de campo magnético a 4.0m para corrente de 140A, <i>zoom</i> na habitação	39
Figura 6.1 – Posicionamento dos apoios e identificação das linhas L3127 e L3128.....	40
Figura 6.2 – Posicionamento dos apoios da linha L3127/L3128 em formato 3D	41
Figura 6.3 – Fotografias do local de realização das medidas (8)	41
Figura 6.4 – Configuração dos apoios 11 e 12 em esteira vertical dupla sem cabo de guarda .	42
Figura 6.5 – Identificação do perfil 1 de medição – relatório das medidas (8) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	43
Figura 6.6 – Catenária do condutor inferior para o modelo final, valores em metros [m]	44
Figura 6.7 – Imagem 3D da rua com a inclinação – vista no sentido do ponto A para B	44
Figura 6.8 – Campo magnético ao longo do perfil 1, valores medidos e simulados.....	46
Figura 6.9 – Linhas de campo magnético a 1.0m, imagem 3D	47
Figura 6.10 – Identificação dos novos perfis localizados nas moradias mais próximas	48
Figura 6.11 – Campo magnético ao longo do perfil 9 com 45A em ambas as linhas	50
Figura 6.12 – Campo magnético ao longo do perfil 10 com 45A em ambas as linhas.....	50
Figura 6.13 – Campo magnético ao longo do perfil 11 com 45A em ambas as linhas	51
Figura 6.14 – Linhas de campo magnético a 4.0m para a corrente de 45A em ambas as linhas, imagem 3D.....	51
Figura 6.15 – Linhas de campo magnético a 4.0m para a corrente de 45A em ambas as linhas, <i>zoom</i> nas habitações.....	52
Figura 7.1 – Posicionamento dos apoios da linha L6112	53
Figura 7.2 – Posicionamento dos apoios da linha L6112 em formato 3D	54
Figura 7.3 – Fotografias dos locais de realização das medidas (9), à esquerda vão 27/28 e à direita vão 28/29.....	54
Figura 7.4 – Configuração dos apoios 27, 28 e 29 em trevo com cabo de guarda	55
Figura 7.5 – Identificação dos perfis de medição do vão 27/28 – relatório das medidas (9) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	56
Figura 7.6 – Identificação dos perfis de medição do vão 28/29 – relatório das medidas (9) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	56
Figura 7.7 – Catenária do condutor inferior no vão 27/28, valores em metros [m]	57
Figura 7.8 – Catenária do condutor inferior no vão 28/29, valores em metros [m]	57
Figura 7.9 – Campo magnético ao longo do perfil 1 do vão 27/28, valores medidos e simulados	60
Figura 7.10 – Campo magnético ao longo do perfil 2 do vão 27/28, valores medidos e simulados.....	60

Figura 7.11 – Campo magnético ao longo do perfil 4 do vão 28/29, valores medidos e simulados.....	61
Figura 7.12 – Campo magnético ao longo do perfil 5 do vão 28/29, valores medidos e simulados.....	61
Figura 7.13 – Linhas de campo magnético a 1.0m, imagem 3D	62
Figura 7.14 – Identificação dos novos perfis localizados nas moradias mais próximas	63
Figura 7.15 – Campo magnético ao longo do perfil 6 com a corrente média diária de 90A	65
Figura 7.16 – Campo magnético ao longo do perfil 11 com a corrente média diária de 90A	65
Figura 7.17 – Linhas de campo magnético a 10.0m sob vão 27/28 com corrente de 90A, imagem 3D.....	66
Figura 7.18 – Linhas de campo magnético a 10.0m sob vão 27/28 com corrente de 90A, imagem 3D.....	66
Figura 7.19 – Linhas de campo magnético a 4.0m sob vão 28/29 com corrente de 90A, imagem 3D.....	67
Figura 8.1 – Posicionamento dos apoios da linha L6124/L6125	68
Figura 8.2 – Posicionamento dos apoios da linha L6124/L6125 em formato 3D	68
Figura 8.3 – Fotografias do vão P50/52 – P51/53 sob o qual foram realizadas as medidas.....	69
Figura 8.4 – Fotografias do vão P51/53 – P52/54 sob o qual foram realizadas as medidas.....	69
Figura 8.5 – Configuração em esteira vertical dupla com cabo de guarda.....	70
Figura 8.6 – Identificação dos perfis de medição do vão P50/52 – P51/53, relatório das medidas (10) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	71
Figura 8.7 – Identificação dos perfis de medição do vão P51/53 – P52/54, relatório das medidas (10) à esquerda e software EFC-400 à direita.....	71
Figura 8.8 – Catenária do condutor inferior no vão P50/52 – P51/53, valores em metros [m] ...	72
Figura 8.9 – Catenária do condutor inferior no vão P51/53 – P52/54, valores em metros [m] ...	72
Figura 8.10 – Imagem 3D da zona exterior do vão P50/52 – P51/53 com a inclinação	73
Figura 8.11 – Imagem 3D da zona exterior do vão P51/53 – P52/54 com a inclinação	73
Figura 8.12 – Campo magnético ao longo do perfil 1 com 390A em ambas as linhas, valores medidos e simulados.....	76
Figura 8.13 – Campo magnético ao longo do perfil 2 com 420A em ambas as linhas, valores medidos e simulados.....	77
Figura 8.14 – Campo magnético ao longo do perfil 3 com 430A em ambas as linhas, valores medidos e simulados.....	77
Figura 8.15 – Campo magnético ao longo do perfil 4 com 430A em ambas as linhas, valores medidos e simulados.....	78
Figura 8.16 – Linhas de campo magnético a 1.0m com 430A em ambas as linhas, imagem 3D	79
Figura 8.17 – Identificação dos novos perfis localizados nos prédios mais próximos	79

Figura 8.18 – Campo magnético ao longo do perfil 9 com a corrente média diária de 390A em ambas as linhas	81
Figura 8.19 – Campo magnético ao longo do perfil 10 com a corrente média diária de 390A em ambas as linhas	81
Figura 8.20 – Linhas de campo a 10.0m com corrente média diária de 390A em ambas as linhas, zoom no prédio mais próximo	82
Figura 8.21 – Linhas de campo magnético a 10.0m com corrente média diária de 390A em ambas as linhas, imagem 3D	83
Figura A.1 – Menu de selecção do <i>template</i> , nas linhas aéreas modeladas neste trabalho o usou-se o <i>ptl_400</i>	88
Figura A.2 – Menu de selecção de apoios e configuração dos mesmos quanto à sua altura e posicionamento	88
Figura A.3 – Menu de configuração do sistema, definição da tensão, corrente e material dos condutores.....	89
Figura A.4 – Menu de configuração das travessas, definição do número, do comprimento e posicionamento das mesmas, ou seja, definição da configuração da linha (esteira, trevo, etc)	89
Figura A.5 – Menu de configuração do posicionamento dos condutores onde também se pode definir a catenária de forma manual	90
Figura A.6 – Menu de cálculo automático da catenária conforme se define a altura do condutor num determinado ponto entre os apoios	90
Figura A.7 – Menu de configuração da imagem de fundo, definição da escala, da posição e da gama de cores da imagem seleccionada	91
Figura C.1 – Diagrama de carga da linha L1081 dos dias das medidas, valores em amperes [A]	94
Figura D.1 – Diagrama de carga da linha L107 do dia das medidas, valores em amperes [A] ..	96
Figura E.1 – Diagrama de carga da linha L3127 e L3128 nos dias das medidas, valores em amperes [A]	98
Figura F.1 – Diagrama de carga da linha L6112 dos dias das medidas, valores em amperes [A]	100
Figura G.1 – Diagrama de carga da linha L6124 e L6125 do dia das medidas, valores em amperes [A]	104
Figura G.2 – Mapa do local de realização das medidas com infra-estruturas subterrâneas e suas correntes medidas no dia 25/05/2010 pelas 11:00, cabos BT a vermelho e cabos IP a rosa	106

Lista de Siglas

CEMEBF	Campos Electromagnéticos de Extremamente Baixa-Frequência
CEM	Campos Electromagnéticos
OMS	Organização Mundial de Saúde
ICNIRP	Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação Não Ionizante
CE	Conselho Europeu
EUA	Estados Unidos da América
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
EDP	Energias de Portugal
LABELEC	Estudos, Desenvolvimentos e Actividades Laboratoriais, SA
AC	Corrente Alternada
CEI	Comissão Electrotécnica Internacional
EN	Norma Europeia
CIGRÉ	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos
MT	Media Tensão
AT	Alta Tensão
BT	Baixa Tensão
PT	Posto de Transformação

Nomenclatura

B	Campo de Indução Magnética
E	Campo Eléctrico
μ_0	Permeabilidade Magnética do vácuo
H	Campo Magnético
J	Densidade de Corrente Eléctrica
r	Módulo do vector entre o condutor e o ponto de cálculo
I	Corrente Eléctrica

1 Introdução

Os Campos ElectroMagnéticos de Extremamente Baixa Frequência (CEMEBF, de 3Hz a 3kHz) existem onde quer que a electricidade seja gerada, transmitida ou distribuída em linhas ou cabos de energia, ou usada em dispositivos eléctricos. Desde que o uso da electricidade se tornou uma das principais bases do nosso modo de vida moderno, estes campos, de origem artificial, tornaram-se omnipresentes no nosso ambiente (1).

Há já algumas décadas que os efeitos dos CEMEBF sobre a saúde humana são um assunto amplamente investigado. Esta investigação envolve duas vertentes fundamentais, a vertente fisiológica que incide sobre os efeitos agudos (efeitos relacionados com a exposição momentânea), e a vertente epidemiológica que incide sobre os efeitos crónicos (efeitos relacionados com a exposição prolongada).

Quanto aos efeitos agudos, sendo sabido que os CEMEBF de origem artificial, a partir de certo nível de valor, são capazes de afectar alguns processos fisiológicos do corpo humano, a comunidade internacional reconheceu a necessidade de instituir limites protectores. Nesse sentido, na sequência do *Projecto Internacional de CEM* iniciado em 1996 e desenvolvido pela Organização Mundial de Saúde (OMS) em colaboração com outras entidades relevantes, em 1998 foram definidos num Guia da Comissão Internacional de Protecção contra a Radiação Não Ionizante (ICNIRP) valores de referência para a limitação da exposição a campos variáveis, fielmente vertidos na recomendação do Conselho Europeu 519/EC de 1999 e, mais tarde, na legislação Portuguesa, pela portaria 1421 de 2004 ainda em vigor.

Tabela 1.1 – Valores limite referência recomendados pelo CE e adoptados por Portugal

	Campo de Indução Magnética B [μT] ¹	Campo Eléctrico E [kV/m]
Público em Geral	100	5
Trabalhadores do Sector	500	10

A realçar que estes valores, que contêm elevados factores de segurança e são muito inferiores aos valores para os quais há registo de danos para a saúde humana, são muito raras vezes alcançados na proximidade de quaisquer equipamentos e instalações de energia eléctrica.

¹ No seguimento, a referência ao Campo de Indução Magnética B será feita como Campo Magnético, normalmente representado por H , sendo a relação entre os dois no vácuo de $B = \mu_0 H$.

Quanto à exposição prolongada, após a publicação dos resultados de uma investigação epidemiológica realizada nos EUA em 1979, surgiram suspeitas, de que os CEMEBF poderiam ter efeitos crónicos causadores de um aumento de incidência de diversas patologias. Muitos estudos epidemiológicos se sucederam nas duas décadas seguintes, tanto na Europa como nos EUA, no sentido de comprovar estas suspeitas. De todas as patologias estudadas só para a leucemia infantil linfoblástica aguda se observou, nos resultados, uma associação entre o aumento da patologia e a proximidade de linhas e equipamentos eléctricos. Em todo o caso, dada a raridade desta patologia, são muitos os cientistas que colocam sérias reservas à validade de estes resultados.

Face à manutenção das incertezas quanto à existência de efeitos crónicos por parte dos CEMEBF, a OMS classifica-os como possivelmente carcinogénicos e em 2007, numa monografia publicada (2), argumenta: *“É razoável e autoriza-se que se realizem outros procedimentos precaucionais apropriados à redução da exposição. Contudo, não se recomenda que os valores limite nos guias de exposição se reduzam a qualquer nível arbitrário em nome da precaução. Tal prática mina o fundamento científico sobre o qual os limites são baseados e é provável que seja uma maneira dispendiosa, e não necessariamente eficaz, de fornecer protecção (...) a energia eléctrica comporta óbvios benefícios para a saúde, sociais e económicos, e as medidas precaucionais não os devem comprometer”*.

Apesar destas recomendações, no sentido de acautelar os tais efeitos crónicos, alguns países têm vindo a adoptar valores muito inferiores aos de referência da ICNIRP e bastante semelhantes aos valores associados por algumas investigações a um aumento de incidência da leucemia infantil. No entanto, ao contrário dos limites definidos pelo ICNIRP, estes novos limites são para valores médios de campo e não para valores máximos de campo. A título de exemplo temos a Holanda que requer que a exposição média de crianças ao campo magnético não deve ultrapassar os 0.4 μT , a Suíça que definiu um limite fixo para instalações em áreas sensíveis de 1 μT e a Itália que define um limite fixo para novas instalações de 3 μT .

Tendo em conta todos estes acontecimentos e antecedendo uma possível decretação, em Portugal, de valores limite mais restritivos, a Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos (ERSE) aprovou um projecto para a caracterização dos campos magnéticos gerados por equipamentos da Rede de Distribuição a que haja exposição pública, denominado *“Gestão de Campos Magnéticos em Instalações da EDP”*. Neste contexto, já em Setembro do ano corrente, é publicado em Diário da República a lei 30/2010 que diz respeito à protecção contra a exposição aos campos eléctricos e magnéticos derivados de linhas, de instalações e de equipamentos eléctricos. Esta lei impõe que no prazo de 13 anos, todas as linhas, as instalações e os equipamentos de alta e muito alta tensão se devem encontrar localizados ou adaptados de forma a dar cumprimento aos limites de exposição humana que o Governo regulamentar. Uma vez que os limites actualmente regulamentados raramente são atingidos, prevê-se, que nestes

13 anos, o Governo venha a implementar novos limites mais restritivos. No entanto, tal como acontece para os outros países, esses novos limites mais restritivos, a existirem, serão para valores de campo médios e não para valores de campo máximos.

É então, no seguimento destes acontecimentos e em articulação com este projecto da ERSE que surge este trabalho.

O seu objectivo é extrapolar para locais de exposição pública prolongada (edifícios de habitação, escritórios, escolas, etc), através de simulações, o campo magnético B gerado por linhas aéreas de transmissão reais.

Esta extrapolação dos valores de campo magnético B é dividida em dois processos. O primeiro processo consiste em criar e calibrar modelos tridimensionais das linhas aéreas. O segundo processo consiste em, fazendo uso dos modelos criados, simular e calcular os valores de campo magnético nos referidos locais de exposição pública prolongada.

Para a realização do primeiro processo, de modo a garantir que os modelos criados representem as linhas de forma real, utilizam-se medidas de campo magnético realizadas na proximidade das linhas. Os modelos são calibrados de maneira a que, por simulação, se obtenham campos magnéticos similares aos medidos no local. Dada a importância das medidas na criação e calibração dos modelos, estas foram realizadas segundo regras e normas específicas para o efeito.

Todos os processos são realizados com a utilização de um software de simulação de campos electromagnéticos a altas e baixas frequências, o EFC-400 da empresa Narda, que com uma precisão bastante elevada simula os campos nos mais variados planos do espaço e apresenta os resultados em vários formatos.

Apesar da recente grande mediatização do tema, poucos são os projectos deste tipo existentes internacionalmente. Há a registar algumas publicações em Itália (3)(4)(5) em que se estudaram os campos magnéticos gerados em linhas, cabos e postos de transformação também fazendo uso deste software EFC-400 da Narda.

No entanto, este trabalho diferencia-se dos demais no sentido em que, dada a forma como são seleccionadas as linhas e são feitas as medidas de campo, irá permitir, uma extrapolação dos resultados para grande parte das linhas aéreas de distribuição de Portugal e posterior avaliação do número e localização das possíveis situações de risco existentes em Portugal.

No segundo capítulo começa-se por justificar as normas propostas para realização das medidas e as linhas aéreas seleccionadas face ao objectivo final do trabalho. Objectivo esse de

avaliar em que situação ficaríamos para o caso de decretação em Portugal de valores limites de campo mais restritivos, relacionados com os efeitos crónicos da exposição. Ainda neste capítulo faz-se uma breve introdução aos campos magnéticos gerados por uma linha aérea e descreve-se o software utilizado ao longo do trabalho tanto ao nível de opções possíveis como do método de cálculo que utiliza.

No capítulo 3 explica-se de uma forma geral toda a parte prática deste trabalho. Aqui explica-se que o trabalho está dividido em duas fases distintas, a fase de modelação / calibração, onde se cria um modelo à imagem real do equipamento eléctrico, que neste caso são linhas aéreas, e uma segunda fase de cálculo dos campos magnéticos em possíveis locais de exposição prolongada. Para cada uma das fases explica-se todas as opções possíveis de serem implementadas.

Nos capítulos 4, 5, 6, 7 e 8 faz-se a apresentação dos resultados e descrição dos modelos criados seguindo as indicações e opções descritas no capítulo 3.

Por fim, no capítulo 9, faz-se um apanhado de todos os resultados obtidos tiram-se conclusões quanto a estes e perspectivam-se possíveis trabalhos a realizar como complemento deste.

2 Enquadramento teórico

2.1 Normas referenciadas

Muitos são os modos possíveis de realização de medidas de campo, como tal, consoante a importância e o objectivo final, a comunidade internacional tem vindo a definir regras e métodos bastante específicos para efectuar essas medidas. Neste trabalho, as medidas foram realizadas com o objectivo final de extrapolação e estimação de campos noutros locais próximos de exposição prolongada.

Ao nível da extrapolação e estimação de campos, também várias opções se podem tomar conforme o objectivo final. Como neste trabalho a extrapolação dos campos é realizada no intuito de acautelar os efeitos crónicos dos campos magnéticos isto é, os efeitos da exposição prolongada aos campos, essa extrapolação deve ser realizada com os valores médios de carga (corrente eléctrica) para a obtenção dos campos médios. Contrariamente, se o objectivo é acautelar os efeitos agudos, caso dos valores definidos pelo ICNIRP e adoptados por Portugal, os valores são de campos máximos, ou seja, valores que nunca devem ser ultrapassados.

Assim sendo, com o objectivo final de avaliar a exposição prolongada aos campos, foram apontadas, de entre as mais recentes, as seguintes normas técnicas internacionais para a realização das medidas:

- EN 50413 (2008): *Basic Standard on Measurement and Calculation Procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electro-Magnetic Fields (0-300 MHz)*;
- CEI 61786 (1998): *Measurement of Low-Frequency Magnetic and Electric Fields with Regard to Exposure of Human Beings - Special Requirements for Instruments and Guidance for Measurements*;
- CEI 62110 Ed.1 (2008): *Measurement Procedures for Electric and Magnetic Field levels Generated by AC Power Systems with Regard to Human Exposure for overhead and underground lines*;
- CIGRÉ WG C4-203 (2009): *Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines*.

As medidas foram então realizadas segundo as normas apontadas.

2.1.1 EN 50413 (2008)

Esta norma basicamente caracteriza os campos de acordo com a sua frequência e proximidade. Com esta caracterização pretende-se fornecer elementos que permitam a definição de métodos de medida e cálculo de valores de campo associados à exposição humana.

Os campos de frequência inferior a 3kHz, como os em questão, são designados de Extremamente Baixa Frequência. Nestas frequências, a norma sublinha que o efeito dos campos se manifesta sempre na região reactiva (ou por outras palavras, que não se manifesta como radiações) e próximos, ou seja, que os pontos com valor idêntico são predominantemente esféricos e não planares.

A selecção de esta norma justifica-se pela imposição de apresentação de pelo menos 14 pontos de medida, das principais características específicas da fonte de campo e do instrumento de medida utilizado e suas configurações que constituem informação importante para a criação e calibração do modelo tridimensional.

A indicação das possibilidades de separar os campos magnéticos pelas suas fontes e calculá-los com formulários adaptados aos campos quase-estacionários também vai de encontro aos propósitos de individualizar os campos gerados por determinadas linhas aéreas e de utilizar um software de simulação de campos que resolve qualquer problema de campos quase-estacionários.

2.1.2 CEI 61786 (1998)

Esta norma pretende servir de guia para as medidas da raiz média quadrática dos valores de campo magnético e eléctrico quase-estacionários com frequências entre 15Hz e 9kHz.

Esta norma é seleccionada por, entre outras indicações, definir requisitos mínimos de incerteza nos instrumentos de medida utilizados.

2.1.3 CEI 62110 (2008)

Esta norma estabelece métodos de medida para níveis de campos magnéticos e eléctricos gerados por sistemas AC (de corrente alternada) de modo a avaliar os níveis de campos a que o corpo humano se encontra sujeito.

A norma abrange os locais acessíveis ao público e deixa de parte os locais de acesso condicionado aos trabalhadores do sector, indo directamente de encontro ao objectivo de analisar a exposição prolongada pública aos campos magnéticos e não a exposição momentânea de algum pessoal qualificado.

Para o caso de campo considerado não uniforme, nosso caso, a norma define uma regra de medida da média espacial de campo baseada em três pontos de medida que deverão ser situados à altura de 0,5, 1,0 e 1,5 metros relativamente ao solo ou soalho. Na proximidade de um equipamento ou parede, a medição deverá ser realizada à distância de 0,2 metros da respectiva superfície. O campo médio será a média aritmética dos três valores medidos.

Esta definição de 3 alturas de medida com o posterior cálculo da média enquadra-se completamente na exposição humana aos campos. Com este método calcula-se o valor médio espacial do campo na totalidade do corpo humano e não o valor a uma única altura, por exemplo ao nível da cabeça ou ao nível dos pés.

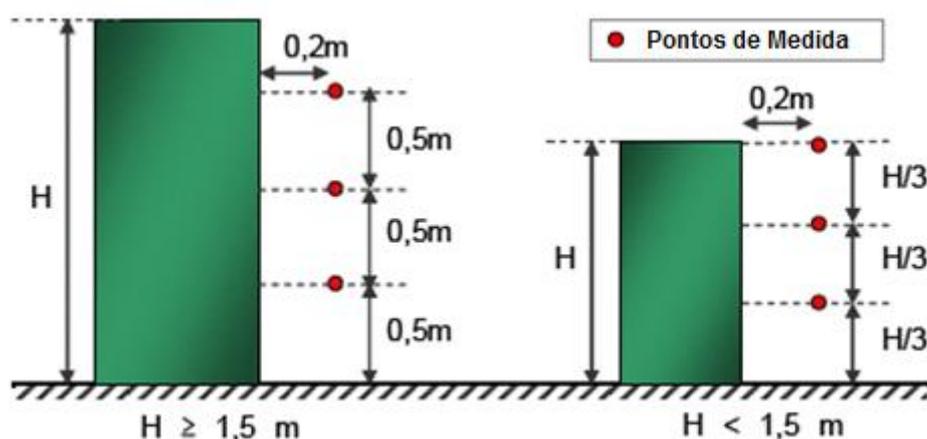


Figura 2.1 – Pontos de medição para determinação da média espacial

Esta norma estabelece ainda princípios para a determinação do perfil máximo de campo magnético para vários tipos de equipamentos, entre os quais linhas aéreas. O interesse de procurar pontos máximos de campo existe no intuito do posterior cálculo dos valores médios de campo nesses pontos. Valores esses que serão os valores médios máximos e representarão a pior situação média de exposição prolongada pública aos campos magnéticos.

O completo enquadramento destas regras no propósito de medir a exposição prolongada aos campos magnéticos que possa provocar efeitos crónicos fazem desta norma a referência-chave de estas medidas.

2.1.4 CIGRÉ WG C4-203 (2009)

Este documento pretende servir de guia técnico das melhores práticas de realização de medidas de campos eléctricos e magnéticos de baixa frequência na proximidade de equipamento de transporte e distribuição de energia. O documento define assim, cuidadosamente, as condições técnicas de efectivação das medidas.

De particular importância é o registo das correntes dos condutores para os quais é medido o respectivo campo magnético. No caso das linhas aéreas, é notada a importância do registo horário preciso que permita a sua correlação com os registos dos operadores da rede, dada a dificuldade técnica da medida directa das correntes. Os campos máximos deverão, depois, ser estimados para os picos de carga efectivamente registados. Caso este registo não seja possível a avaliação da carga máxima deverá ser sempre cuidadosamente estimada ou medida (por exemplo, com maxígrafos).

Juntamente com a norma EN 50413, ao exigir o registo de todas as condições em que são realizadas as medidas, fornece informações bastante importantes para a modelação e calibração dos modelos tridimensionais das linhas aéreas.

2.2 Selecção das Linhas Aéreas

Como o posterior objectivo deste trabalho é a extrapolação dos resultados para o resto das linhas aéreas do país, tentou-se seleccionar, em número representativo, linhas aéreas tipo da Rede de Distribuição quanto à estrutura e inserção urbana.

Quanto à estrutura queriam-se linhas simples e duplas de vários níveis de tensão, preferencialmente com cargas típicas e com várias geometrias dos apoios. Quanto à inserção urbana queriam-se preferencialmente linhas de inserção urbana média e densa.

Desse modo as linhas seleccionadas foram:

- Linha de 10kV simples, com apoios em esteira e trevo, sem cabo de guarda, com uma carga média de 60A numa zona de inserção urbana média;
- Linha de 30kV simples, com apoios em trevo, com cabo de guarda, com uma carga média de 140A numa zona de inserção urbana média;
- Linha de 30kV dupla, com apoios em esteira vertical dupla, sem cabo de guarda, com uma carga média de 45A em cada linha numa zona de inserção urbana média;
- Linha de 60kV simples, com apoios em trevo, com cabo de guarda, com uma carga média de 90A numa zona de inserção urbana média;
- Linha de 60kV dupla, com apoios em esteira vertical dupla, com cabo de guarda, com uma carga média de 390A em cada linha numa zona urbana de inserção urbana densa.

2.3 Campo Magnético das linhas

Sempre que a electricidade é gerada, transmitida ou distribuída em linhas ou cabos de energia, ou usada em dispositivos eléctricos são gerados campos magnéticos e eléctricos nas suas proximidades.

De um modo geral, para uma linha aérea, o campo magnético medido à altura, relativamente ao solo, de um ser humano, depende da sua distância ao solo e da geometria da sua disposição trifásica, e é proporcional à corrente que a percorre. A distância ao solo da linha, por outro lado, varia ao longo do percurso entre postes (vão) e atinge um mínimo, definido regulamentarmente por razões de segurança, perto do ponto médio do vão. Para linhas trifásicas, o campo magnético é aproximadamente proporcional à distância entre condutores, e inversamente proporcional ao quadrado da distância do condutor ao ponto de medida.

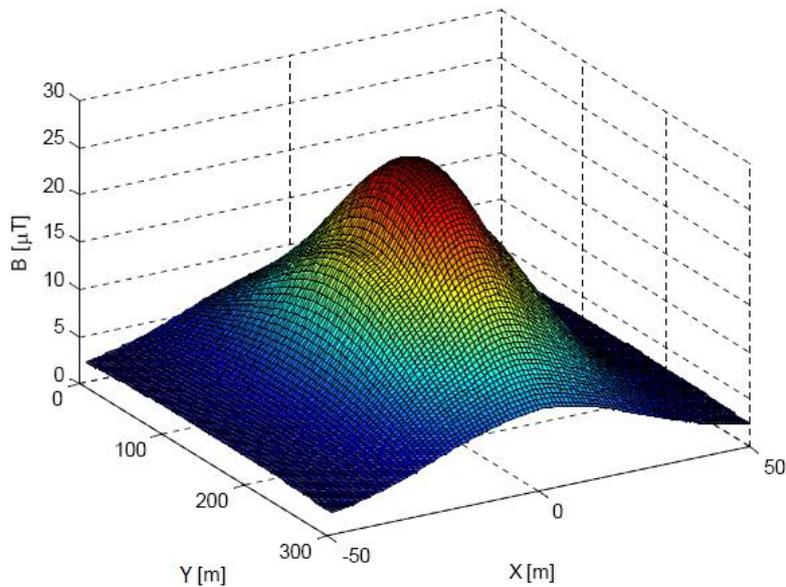


Figura 2.2 – Distribuição espacial do campo magnético sobre uma linha aérea

A Figura 2.2 ilustra uma distribuição tridimensional do campo magnético, medido à mesma distância do solo e evidenciando que, de acordo com o que foi dito, ele é mais intenso ao longo do vão sob os condutores, e sob o vão é máximo no ponto inferior da catenária que descreve a curva do condutor.

A nível matemático, o campo magnético gerado por uma linha aérea é descrito por duas das Leis de Maxwell (6), a Lei de Ampère:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \quad (2.1)$$

E a Lei de Gauss para o magnetismo:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

Para campos quase-estacionárias, nosso caso, desprezando as correntes de deslocamento da Lei de Ampère obtém-se a Lei de Biot-Savart:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.3)$$

Que possibilita o cálculo, com bastante precisão, do campo magnético gerado por um condutor.

Neste trabalho, ao se utilizar o software EFC-400 realiza-se o cálculo do campo magnético baseando-se na Lei de Biot-Savart. Esse cálculo é descrito mais à frente no capítulo 2.4.1.

2.4 EFC-400 – Electric and Magnetic Field Calculation

O programa EFC-400 da Narda Safety Test Solution foi o software escolhido e utilizado neste trabalho durante a modelação das linhas aéreas e seguinte extrapolação dos valores de campo.

O programa permite o cálculo de campos eléctricos e magnéticos de baixa frequência gerados por condutores eléctricos e outro tipo de equipamentos eléctricos. Este cálculo para baixas frequências é realizado através do uso da lei de Biot-Savart, possibilitando assim qualquer combinação arbitrária de condutores num espaço tridimensional. Dada a sua abordagem tridimensional, consegue resolver todos os problemas quase-estacionários na gama de baixas frequências.

O programa apresenta uma livreria com uma grande variedade de elementos, como por exemplo linhas aéreas, cabos, apoios e edifícios. Fazendo uso da sua grande capacidade de cálculo e vasta livreria, o programa permite a definição e alteração de bastantes parâmetros de configuração dos equipamentos que se pretende modelar.

Para o caso da modelação de uma linha aérea define-se o número e tipo de sistemas, ou seja, define-se a tensão, a corrente (módulo e fase), a frequência, o tipo de material dos condutores e o número de cabos de guarda de cada sistema. Define-se também o número e altura dos apoios, bem como o tipo de configuração (esteira, trevo, etc) através do posicionamento das travessas sobre os apoios. Sendo a catenária uma importante característica de uma linha, também esta pode ser definida e alterada no programa. Todos os menus em que se realizam estes processos de configuração estão representados no Anexo A.

Grande parte dos terrenos em que são instaladas as linhas aéreas, o solo é bastante irregular e bastante desnivelado, o que se reflecte nos campos obtidos. Como tal, o programa permite ainda que essas propriedades do solo façam parte do cálculo dos campos através da definição de perfis do solo. Estes perfis do solo são descritos sob a forma de uma tabela XY cujos valores são a altura do solo nessas coordenadas X e Y.

Os resultados dos cálculos podem ser representados nas mais variadas formas, tais como, planos XYZ em 2D e 3D, com e sem isolinhas. A plataforma 3D em conjunto com as isolinhas representa uma das mais-valias do programa.

Outra das características do programa que se revela bastante útil, e como tal também bastante utilizada, é a possibilidade de se importar para mapa de fundo, qualquer tipo de imagem a qualquer escala.

Quanto aos erros na realização do cálculo, para um exemplo de um condutor rectilíneo a incerteza máxima para o cálculo a 1m desse condutor é de 1E-7 para o fluxo magnético. Se se modelar geometrias mais complexas, fora dos elementos básicos, conforme a precisão que se selecciona o erro pode ir desde os 0.05% aos 5.2% no pior dos casos.

A realçar que este software é dos poucos que é considerado certificado pela norma CEI 62271-208 que, para além de fornecer um guia para a avaliação e documentação dos campos magnéticos externos gerados por equipamentos pré-fabricados e/ou normalizados, prevê também regras técnicas de cálculo dos campos, estabelecendo condições para a avaliação da precisão dos pacotes de software específicos aplicáveis.

2.4.1 Cálculo do Campo Magnético

O Campo magnético dos condutores é calculado através da equação de Biot-Savart como a sobreposição dos subcampos individuais de cada segmento do condutor. Cada segmento contribui para o campo completo:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^2} \quad (2.4)$$

Em que B e I são transformados em quantidades complexas para facilitar o cálculo.

Se assumirmos que o segmento i de comprimento L está na origem do sistema de coordenadas paralelo ao eixo x, Figura 2.3, a sua contribuição para o campo no ponto $P(x, y, z)$ é:

$$\left| \vec{B}_i \right| = \frac{\mu_0}{4\pi r} I_i \left[\frac{L_i - x_p}{\sqrt{(L_i - x_p)^2 + r^2}} + \frac{x_p}{\sqrt{x_p^2 + r^2}} \right] \quad (2.5)$$

Com as seguintes componentes vectoriais:

$$\begin{cases} B_{x_i} = 0 \\ B_{y_i} = -\frac{z_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \left| \vec{B}_i \right| \\ B_{z_i} = -\frac{y_p}{\sqrt{y_p^2 + z_p^2}} \left| \vec{B}_i \right| \end{cases} \quad (2.6)$$

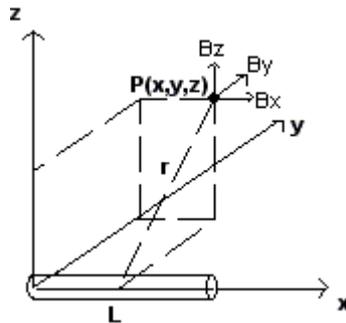


Figura 2.3 – Condutor na origem do sistema de coordenadas

Cada condutor é então, segundo este método, dividido por segmentos cuja quantidade pode ser definida pelo utilizador ou automaticamente pelo programa. Quanto maior o número de segmentos, até um certo limite, maior a precisão e o tempo do cálculo.

As contribuições de cada segmento são calculadas e somadas vectorialmente obtendo-se o vector final de campo:

$$\vec{B} = \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Com estes dados, o EFC-400 pode assim calcular o valor eficaz, o pico e cada uma das componentes do campo magnético (B , \hat{B} e B_x , B_y , B_z).

Durante este trabalho calculou-se sempre o valor eficaz do campo magnético B .

3 Descrição Geral do Estudo

Neste trabalho realizou-se o mesmo estudo para cinco linhas aéreas diferentes. Como tal, para cada uma das linhas aéreas, os mesmos processos e métodos foram sendo repetidos ao longo de todo o trabalho.

Desta forma, faz-se neste capítulo uma descrição geral do estudo para uma linha aérea qualquer, para nos capítulos seguintes apenas se apresentar as configurações e resultados finais de cada uma das linhas.

Tal como já foi dito na Introdução, cada estudo é dividido em dois processos diferentes. No primeiro processo, fazendo uso das medidas de campo realizadas, realiza-se a modelação e calibração do modelo tridimensional da linha à sua imagem real. No segundo processo, utilizando esse modelo já representativo da linha real, realiza-se a simulação e o cálculo do campo magnético para os locais próximos de exposição pública continuada (edifícios de habitação, escritórios, etc.).

Ambos os processos são realizados através do software EFC-400 descrito no capítulo anterior.

3.1 Modelação / Calibração

O que se pretende com este processo é criar e validar um modelo para a linha que se está a realizar o estudo. Para tal utiliza-se toda informação disponível nos relatórios de medida (7)(8)(9)(10)(11).

Neste processo começa-se por definir o posicionamento dos apoios e conseqüentemente a distância entre os mesmos. Para tal utilizam-se imagens aéreas da zona onde foram realizadas as medidas retiradas de dois websites (12)(13).

De seguida faz-se a definição de todo o tipo de configurações físicas mais específicas, tanto para os apoios como para os condutores. Nos apoios realça-se a altura do mesmo e a definição do tipo de configuração. Nos condutores, estando a distância entre si já definida pela configuração dos apoios imposta anteriormente, realça-se a definição da altura dos condutores no ponto médio entre apoios e conseqüentemente as suas catenárias.

Para as linhas duplas ainda existe a possibilidade de “jogar” com o posicionamento de cada uma das fases na configuração em esteira vertical, ou seja, alterar a ordem das fases. Contudo, sabendo à partida que uma correcta ordem de fases resultaria numa diminuição significativa dos campos obtidos e que no momento da construção destas linhas ainda não havia preocupações deste tipo, durante a modelação / calibração de todas as linhas nunca foi necessário realizar alterações deste tipo.

Faz-se a definição das configurações de sistema, tais como, a tensão e a corrente eléctrica.

Consoante se observe uma grande irregularidade do terreno com inclinações acentuadas que possam influenciar o cálculo dos campos também se define um perfil do solo que demonstre essas inclinações e irregularidades.

Já com todas estas configurações definidas passa-se à simulação do modelo e cálculo dos valores de campo magnético para os mesmos pontos dos perfis de medição.

Caso todas estas configurações e medidas estejam correctas e não exista nas proximidades nenhuma fonte de campo que possa influenciar significativamente os valores, os valores calculados coincidiriam com os medidos, o modelo criado seria dado como calibrado e este processo acabaria por aqui.

No entanto o que acontece é que normalmente existem algumas incertezas e imprecisões, tanto ao nível das configurações do modelo como ao nível do processo de realização das medidas, que conduzem a valores calculados diferentes dos valores medidos.

Estas incertezas incidem maioritariamente sobre a distância entre os condutores (configuração), percentagem de inclinação do terreno e carga da linha (corrente eléctrica). As imprecisões no processo de realização das medidas acontecem ao nível da altura dos condutores, da definição dos pontos de medida (perfil de medida) e das alturas a que são realizadas as medidas (0.5m, 1.0m e 1.5m).



Figura 3.1 – Exemplo do posicionamento do instrumento de medida e da definição do perfil de medida

A realçar que nas medidas a 0.5m e 1.5m, a definição dessas alturas é um pouco arbitrária. Se analisarmos a Figura 3.1 verifica-se que existe uma escala para realizar a medida à altura de 1 metro, no entanto, não havendo outras escalas, a colocação do instrumento de medida às outras alturas (0.5 e 1.5m) é realizada, “a olho”, por aproximação. Pelo mesmo motivo, também o posicionamento do instrumento de medida no local correcto do perfil de medida é um pouco arbitrário. Nessa mesma Figura 3.1, a corda que se vê sobre a estrada, é o método utilizado para a definição do percurso do perfil de medida.

Dada a irregularidade do diagrama de carga, Figura 3.2, também a definição da corrente é um pouco arbitrária.



Figura 3.2 – Exemplo de diagrama de carga do dia das medidas para a linha de 10kV simples, valores em amperes [A]

Deste modo é necessário fazer pequenos ajustes nas configurações do modelo (calibrar o modelo) de modo a obterem-se valores calculados e medidos similares.

Estes ajustes são então efectuados ao nível do valor das correntes, altura do ponto médio entre apoios (catenária), distância entre condutores e, no caso de existir perfil do solo, também na inclinação desse perfil. Esta calibração é então realizada de forma iterativa, isto é, faz-se alterações, verifica-se se os valores se aproximam ou se afastam do pretendido e, no caso de se aproximarem, com que relação o fazem. Repete-se este processo até não se conseguir melhorar mais a adequação entre os valores medidos e os valores calculados. Nessa situação avalia-se os erros e dá-se o modelo como calibrado, validado.

Optou-se por não se realizar ajustes ao nível das incertezas relacionadas com o processo de medida (alturas e localizações dos pontos de medida). No entanto é de registar que uma incerteza de 0.20m na altura a que é efectuada a medida (plausível) contribui com erros normalmente na ordem dos 2% podendo contudo atingir os 4% em alguns, raros, casos. Quanto à localização dos pontos dos perfis em que são realizadas as medidas, é nos pontos mais afas-

tados da linha, em que a distância entre pontos consecutivos é maior, que as incertezas são maiores. Nesses pontos mais afastados da linha, uma incerteza de 1m na localização do ponto (plausível) contribui com um erro que, para algumas situações, poderá atingir os 13%.

Por vezes, mesmo após muitas tentativas de calibração, os valores calculados mantêm-se discrepantes em relação aos medidos. Nesses casos, analisa-se a possibilidade de existência de outras fontes de campo magnético próximas desses pontos de valores discrepantes, que possam influenciar as medidas realizadas. Por exemplo linhas BT, cabos BT ou até mesmo postos de transformação. Um exemplo desta situação é a linha de 30kV dupla com várias linhas aéreas BT na proximidade.

Finalmente dois aspectos importantes a salientar. Primeiro é que ao longo deste processo de calibração teve-se o cuidado de utilizar sempre configurações possíveis de implementar na realidade e que respeitem sempre a lei. Segundo e bastante importante, é que como se optou por fazer ajustes em pelo menos três configurações diferentes, os modelos calibrados e validados não são únicos, isto é, existe a possibilidade de com um modelo diferente em algumas configurações se obter os mesmos valores de campo magnético.

3.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada

Todo este processo é realizado a partir do modelo da linha obtido no final do processo anterior, modelo calibrado e validado.

Começa-se então por identificar e seleccionar os “piores” locais de exposição pública, isto é, os locais mais próximos da linha e com valores de campo magnético mais elevados.

Identificados esses locais, que normalmente são moradias ou prédios de habitação, criam-se modelos à imagem desses edifícios. Nestes modelos dos edifícios, não sabendo porque tipo de estruturas metálicas são constituídos, optou-se por não definir qualquer tipo de efeito de blindagem. Deste modo, os modelos criados não influenciam em nada as simulações efectuadas, são meramente ilustrativos. Servem também para a definição dos planos a que se realizam as medidas na face das habitações.

Esta opção, apesar de simplista, em nada prejudica o estudo, pode até ser considerada como uma segurança. Isto porque, considerando a existência de estruturas metálicas, estas, a fazer algum efeito, esse efeito seria de blindagem (atenuante) e como tal os campos magnéticos obtidos seriam menores.

De seguida definem-se novos perfis para a extrapolação dos campos magnéticos. Estes perfis são posicionados no interior dos edifícios seleccionados a aproximadamente 1.0m das paredes exteriores. Escolheu-se este valor admitindo que uma pessoa, na maior parte do tempo, não se

encontram mesmo junto à parede. Na Figura 3.3 está ilustrado um exemplo da localização de um perfil no interior de uma habitação.



Figura 3.3 – Exemplo de um perfil no interior de uma habitação

Por fim simula-se e extrapola-se os valores de campo magnético para esses novos perfis.

Nesta fase, as simulações são feitas para o valor médio diário da corrente, sendo este valor calculado a partir dos diagramas de carga da linha do dia da realização das medidas, ver exemplo de um desses diagramas de carga na Figura 3.2.

A simulação e extrapolação dos campos é feita para várias alturas. Essas alturas são então escolhidas de modo a representar todos os pisos dos edifícios. Por exemplo, para o piso 1 escolhem-se as alturas de 3.5m, 4.0m e 4.5m. Para além destas alturas, realiza-se também simulações na face dos edifícios, isto é, no topo dos edifícios. No entanto, como ninguém está constantemente nesses locais, esta simulação não tem grande importância e é só realizada a título ilustrativo.

Tal como já foi explicado no capítulo 2, nesta fase é utilizado o valor médio diário da corrente e não o valor máximo porque o objectivo final deste estudo está relacionado com os possíveis efeitos crónicos resultantes da exposição prolongada aos campos magnéticos e não com os já confirmados efeitos agudos provocados por uma exposição instantânea.

É então com os valores dos campos magnéticos obtidos para a corrente média diária que se deve realizar a posterior avaliação quanto ao número e localização dos locais de riscos existentes em Portugal.

4 Linha de 10kV Simples

A linha de 10kV simples estudada, linha L1081, está situada numa zona de inserção urbana média próxima de Fanhões, Loures. O vão da linha que se propôs modelar, sobre o qual incidiram as medidas, é o vão entre os apoios 13 e 14. Sob este vão estão situadas algumas moradias de habitação, tal como a Figura 4.1 o comprova. Estas moradias são, neste caso, os tais locais próximos de exposição prolongada para os quais é realizada a extrapolação dos campos magnéticos.

4.1 Modelação / Calibração

Fazendo uso de imagens aéreas da zona retiradas de um website (12), os apoios são posicionados nos seus devidos locais. A distância entre os apoios é então de aproximadamente 240m.



Figura 4.1 – Posicionamento dos apoios da linha L1081

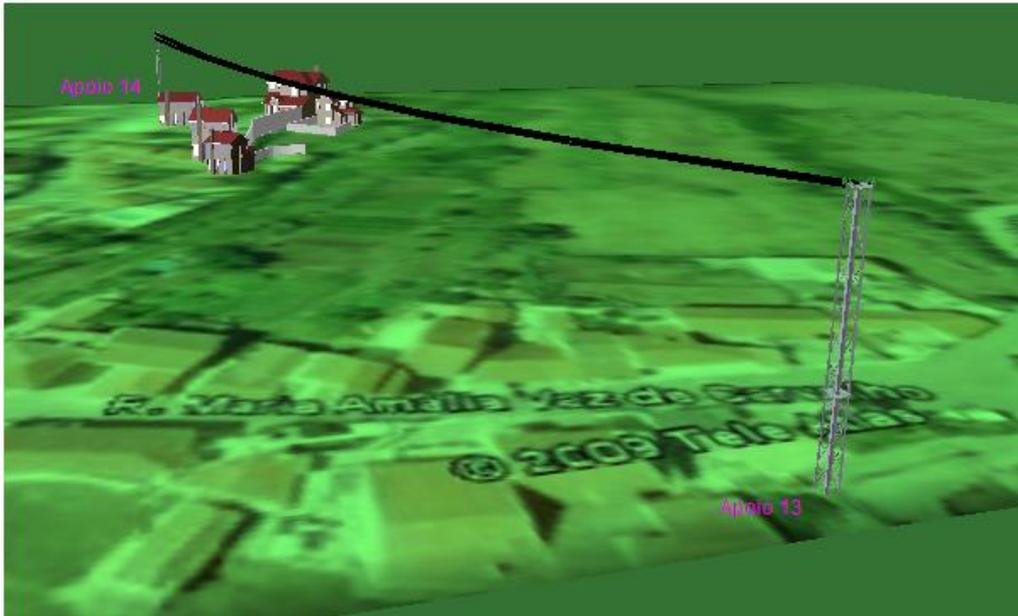


Figura 4.2 – Posicionamento dos apoios da linha L1081 em formato 3D



Figura 4.3 – Fotografias do local de realização das medidas (7) – vista do lado sul à esquerda, vista do lado norte à direita

As configurações físicas do modelo já calibrado são as seguintes.

Apoio 13:

- Altura total – 22m;
- Altura útil – 19.8m;
- Configuração em esteira horizontal sem cabo de guarda
 - Travessas com comprimentos de 0.89m posicionadas no topo do apoio a 19.8m de altura, Figura 4.4.

Apoio 14:

- Altura total – 22m;
- Altura útil – 19.8m;
- Configuração em trevo sem cabo de guarda
 - Travessas com comprimentos de 0.89m posicionadas a alturas de 19.8m, 19.05m e 18.3m, Figura 4.5.

Para a obtenção de estes valores consultou-se as tabelas do Anexo B retiradas de (14).



Figura 4.4 – Configuração do apoio 13 em esteira horizontal sem cabo guarda

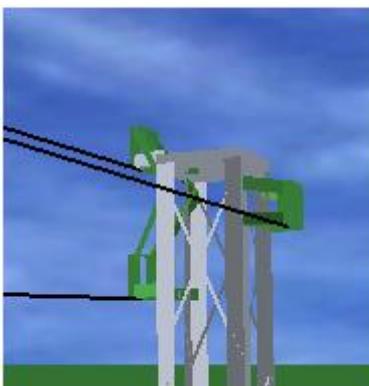


Figura 4.5 – Configuração do apoio 14 em trevo sem cabo guarda

As medidas e, como tal, a calibração do modelo foram realizadas segundo dois perfis, Figura 4.6. O perfil 1 é um perfil longitudinal à linha e tem início no ponto A. O perfil 2 é um perfil transversal à linha e passa pelos pontos A, B e C. Os pontos B e C estão situados nas projecções verticais de dois dos condutores das linhas.

O estabelecimento dos perfis de medição nesta zona esteve condicionado, quer pelas curvas da rua estreita que passa sob a linha, quer pelos muros e vedações das propriedades privadas circundantes, como a Figura 4.3 o atesta.

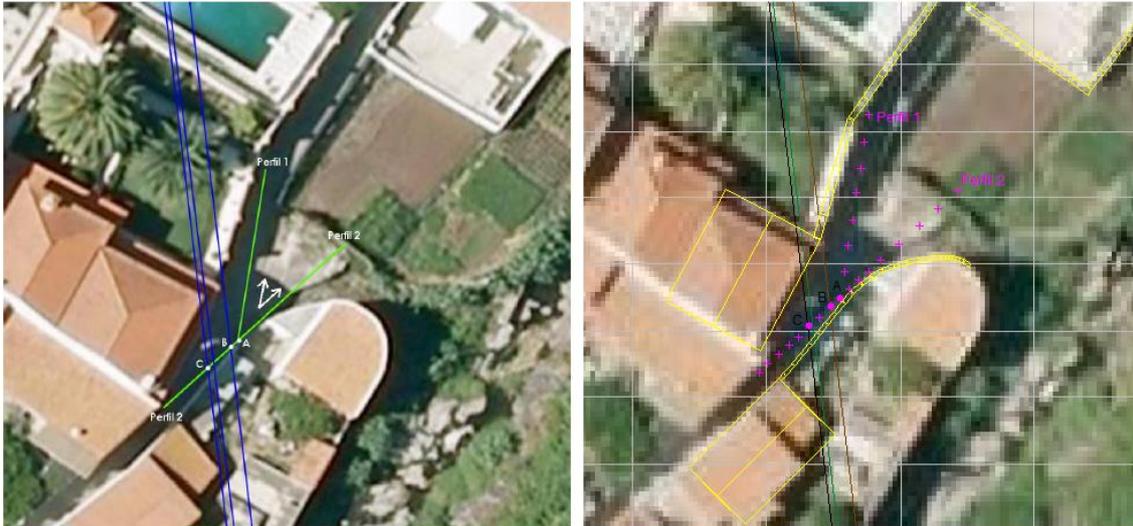


Figura 4.6 – Identificação dos perfis de medição – relatório das medidas (7) à esquerda e software EFC-400 à direita

Quanto à catenária, no modelo final tem-se o condutor inferior a passar no ponto C a uma altura de 16.841m que corresponde a uma altura de 16.907m no ponto médio entre apoios e uma flecha de aproximadamente 2.15m. Os outros condutores têm catenárias semelhantes.

Esta altura de 16.841m imposta no modelo final resulta numa diferença na ordem dos 3% em relação ao medido no local.

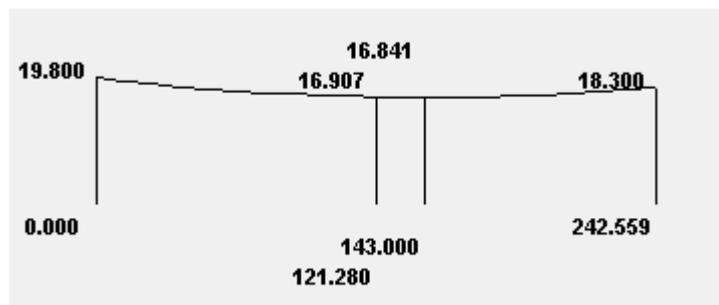


Figura 4.7 – Catenária do condutor inferior para o modelo final, valores em metros [m]

Em relação ao terreno, o desnível verificado na rua que serve de base para o estabelecimento do perfil 1, Figura 4.3, conduziu à definição de um perfil de solo que represente esse mesmo desnível. O perfil de solo definido, ilustrado na Figura 4.8, impõe uma inclinação, crescente no sentido sul-norte, próxima dos 15% ao longo dessa rua.



Figura 4.8 – Imagem 3D da rua com a inclinação – vista do lado sul

Quanto às configurações de sistema tem-se uma tensão de 10kV e, conforme se esteja a simular o perfil 1 ou o perfil 2 impôs-se uma corrente de 70A ou 85A respectivamente. Nas simulações utiliza-se estes diferentes valores de corrente eléctrica uma vez que as medidas foram realizadas em horas e dias diferentes, ou seja, foram realizadas com cargas de funcionamento diferentes. O diagrama de carga para esses dias, tal como outro tipo de informações adicionais associadas a esta linha, pode ser consultado no Anexo C.

Assim, com todas as configurações atrás especificadas que correspondem ao modelo final, para os perfis 1 e 2 obtêm-se os valores de campo magnético listados nas Tabelas seguintes.

Tabela 4.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1, com 70A

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
A	0,081	0,087	0,092
2	0,087	0,093	0,099
4	0,090	0,096	0,102
6	0,091	0,097	0,103
8	0,093	0,099	0,105
10	0,095	0,102	0,108
12	0,097	0,104	0,111
14	0,097	0,103	0,110

Na Tabela 4.2 os pontos estão assinalados pela distância em metros [m] ao ponto A. As distâncias no perfil 2 são positivas no sentido assinalado na Figura 4.6 por uma seta.

Tabela 4.2 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 2, com 85A

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-5	0,091	0,096	0,102
-4	0,093	0,099	0,105
-3	0,095	0,101	0,107
-2	0,097	0,103	0,109
-1	0,098	0,104	0,111
C	0,099	0,105	0,112
	0,099	0,105	0,112
B	0,099	0,105	0,112
1	0,099	0,105	0,112
2	0,099	0,105	0,112
3	0,099	0,105	0,112
4	0,098	0,104	0,110
5	0,096	0,101	0,108
7	0,092	0,097	0,103
9	0,086	0,091	0,096
11	0,081	0,085	0,089
13	0,074	0,078	0,081

Nas Figuras Figura 4.9 e Figura 4.10 mostra-se a adequação dos valores obtidos por simulação face aos valores medidos. Os valores medidos podem ser consultados no Anexo C.

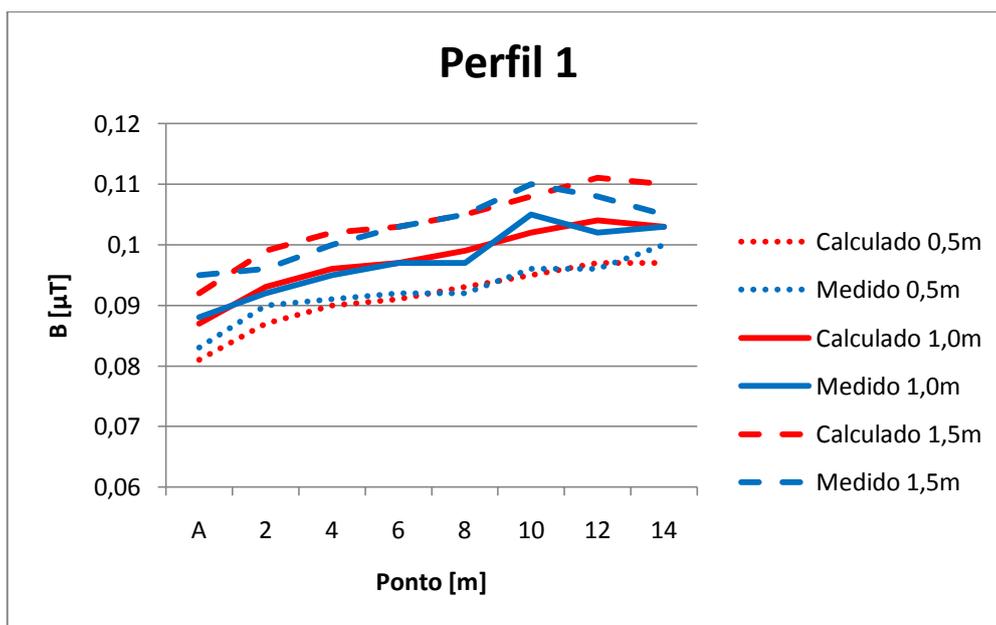


Figura 4.9 – Campo magnético ao longo do perfil 1 com 70A, valores medidos e simulados

Na Tabela 4.3 estão tabelados os erros médios e máximos entre os valores medidos e os valores calculados para os 2 perfis de medida. Os erros são calculados com os valores médios espaciais a 1.0m (média dos valores a 0.5m, 1.0m e 1.5m).

Tabela 4.3 – Erros entre os valores medidos e calculados para os perfis 1 e 2

Perfil	Erro Médio		Erro Máximo	
	[μT]	[%]	[μT]	[%]
1	0.001	1.2	0.002	2.3
2	0.006	5.4	0.010	9.0

Na Figura 4.10 verifica-se que existe uma discrepância, no perfil 2 do lado de C, entre os valores medidos e calculados, no entanto, tal como se comprova na Tabela 4.3 essa discrepância é, a nível absoluto, mínima. A nível relativo o erro máximo nesse perfil aproxima-se dos 10%, no entanto, face aos possíveis erros inerentes ao processo de medida referidos no capítulo 3, este erro não se revela problemático.

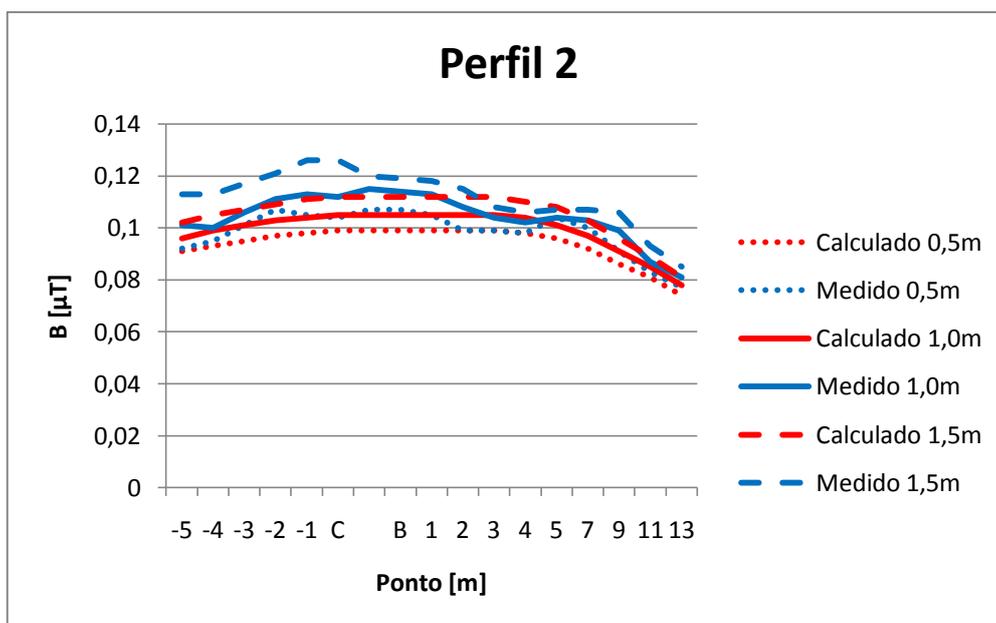


Figura 4.10 – Campo magnético ao longo do perfil 2 com 85A, valores medidos e simulados

Ao nível do perfil 1 a adequação entre os valores medidos e calculados é quase perfeita. Assim sendo, considera-se que o modelo criado representa de forma bastante realista a linha de 10kV simples L1081.

No seguimento ilustra-se a distribuição espacial de campo magnético obtida nas simulações a 1.0m de altura com o modelo final calibrado para a corrente de 85A.

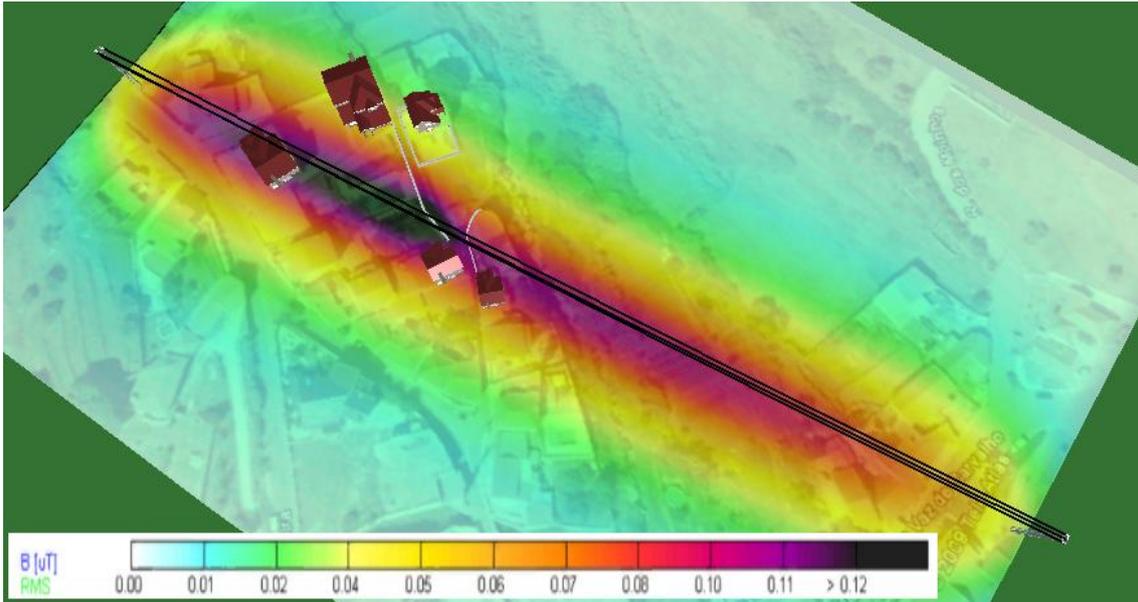


Figura 4.11 – Campo magnético a 1.0m para corrente de 85A, imagem 3D

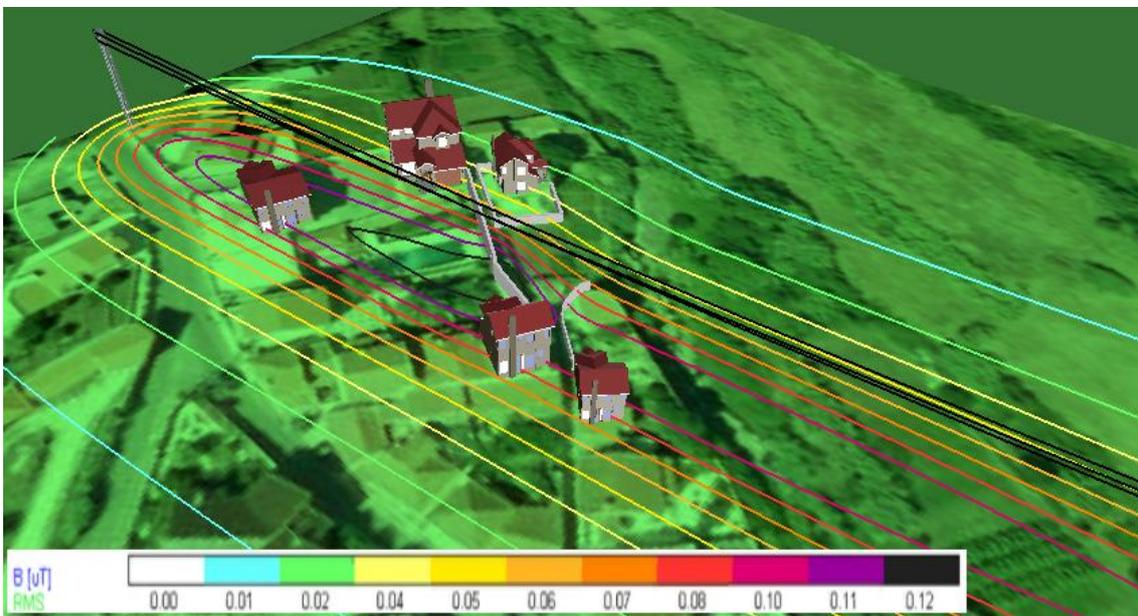


Figura 4.12 – Linhas de campo magnético a 1.0m para corrente de 85A, imagem 3D

4.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada

Para esta linha L1081 os locais próximos da linha de possível exposição prolongada são todos em moradias de habitação. Desta forma seleccionou-se as moradias que se encontram mais próximas do ponto de menor altura dos condutores e exactamente sob a linha.

Na Figura 4.13 identificam-se os seis novos perfis criados no interior das três moradias escolhidas para a extrapolação.



Figura 4.13 – Identificação dos novos perfis localizados nas moradias mais próximas

A moradia dos perfis 3 e 4 foi modelada com uma altura de 10m mais 1m de telhado (3 pisos) e as outras duas moradias foram modeladas com alturas de 7m mais 1m de telhado (2 pisos). Estes edifícios foram modelados sem qualquer tipo de blindagem, tal como se explica no capítulo 3.

Nesta fase as simulações foram realizadas ao nível dos 3 pisos, ou seja, às alturas de 0.5m, 1.0m, 1.5m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 7.0m, 7.5m e 8.0m. Indo de encontro ao que a norma CEI 62110 (2008) defende, fez-se uma média espacial em torno de 1.0m, 4.0m e 7.5m.

Tal como foi explicado no capítulo 3, nesta fase as simulações são realizadas com a corrente média diária. Para esta linha, a corrente média diária é de aproximadamente 60A. Este valor foi calculado a partir do diagrama de carga dos dias das medidas que se encontra no Anexo C.

Assim, com o valor médio diário da corrente de 60A no modelo final calibrado obtém-se para os perfis 3 e 4 os valores de campo magnético listados nas Tabelas Tabela 4.4 e Tabela 4.5.

Optou-se por apresentar estes perfis 3 e 4 por serem os que apresentam os valores de campo magnético mais elevados e desse modo representam a pior situação para os valores médios de carga.

Tabela 4.4 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 60A

Ponto [m]	B [μ T]							
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	7,0 m	7,5 m	8,0 m	Média a 1,0 m	Média a 7,5 m
6	0,068	0,072	0,076	0,161	0,174	0,189	0,072	0,175
5	0,069	0,074	0,078	0,171	0,187	0,204	0,074	0,187
4	0,071	0,075	0,080	0,181	0,198	0,218	0,075	0,199
3	0,072	0,076	0,081	0,190	0,209	0,231	0,076	0,210
2	0,073	0,078	0,083	0,197	0,218	0,242	0,078	0,219
1	0,074	0,079	0,084	0,204	0,226	0,252	0,079	0,227
F	0,075	0,080	0,085	0,210	0,233	0,261	0,080	0,235

Tabela 4.5 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 60A

Ponto [m]	B [μ T]							
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	7,0 m	7,5 m	8,0 m	Média a 1,0 m	Média a 7,5 m
F	0,075	0,008	0,085	0,210	0,233	0,261	0,080	0,235
-1	0,073	0,077	0,083	0,200	0,222	0,247	0,078	0,223
-2	0,071	0,076	0,080	0,191	0,211	0,235	0,076	0,212
-3	0,070	0,074	0,079	0,184	0,203	0,224	0,074	0,204
-4	0,068	0,073	0,077	0,177	0,194	0,214	0,073	0,195
-5	0,067	0,071	0,076	0,170	0,186	0,205	0,071	0,187
-6	0,066	0,070	0,074	0,164	0,178	0,195	0,070	0,179
-7	0,065	0,069	0,073	0,157	0,170	0,186	0,069	0,171

Na Figura 4.14 ilustra-se as linhas de campo magnético obtidas a 7.5m de altura com o valor médio diário da corrente de 60A.

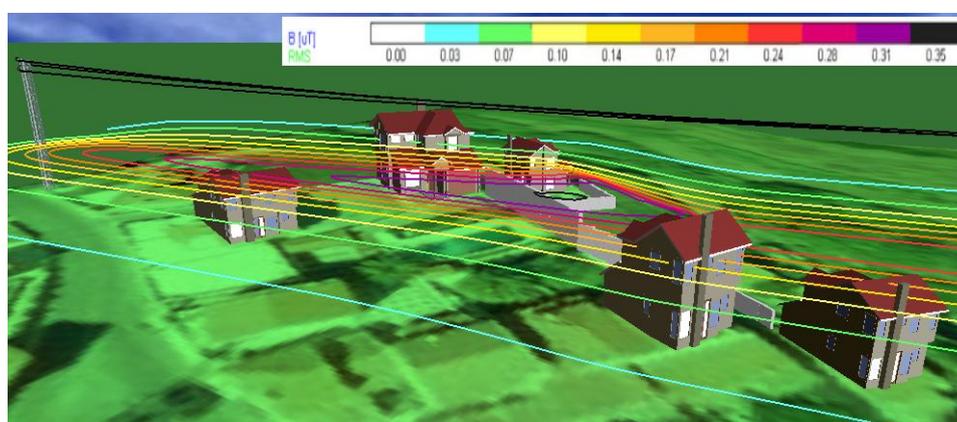


Figura 4.14 – Linhas de campo magnético a 7.5m para corrente média diária 60A, imagem 3D

Nas figuras Figura 4.15 e Figura 4.16 está representado o campo magnético ao longo dos perfis 3 e 4 respectivamente.

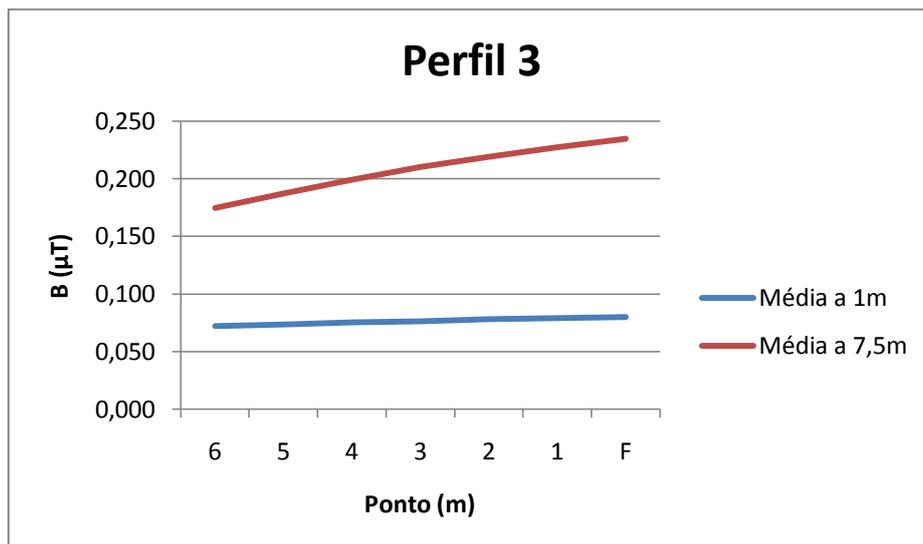


Figura 4.15 – Campo magnético ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 60A

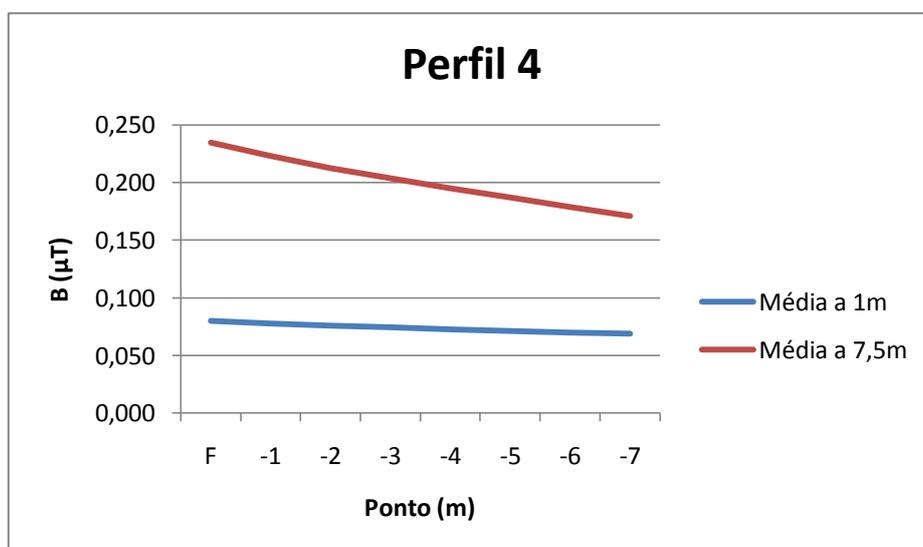


Figura 4.16 – Campo magnético ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 60A

Analisando os resultados, verifica-se que, como era esperado, é ao nível do andar mais elevado (2º andar a 7.5m) que os campos magnéticos são mais elevados. Nesse andar o valor máximo de campo é de 0.235 μ T para o ponto F.

A registrar que este valor é inferior aos limites de campo ultimamente adoptados, nomeadamente ao valor limite adoptado pela Suíça, 1 μ T, tomado como principal referência.

5 Linha de 30kV Simples

Esta linha de 30kV simples, denominada por L107, está situada numa zona de inserção urbana média nos arredores de Vila Franca de Xira. O vão da linha que se propôs modelar é o vão entre os apoios 15 e 16. Como se pode verificar na Figura 5.1, sob este vão e próximo do apoio 16 encontra-se uma moradia de habitação. Esta moradia é, para esta zona da linha, o local próximo de exposição prolongada para o qual se realiza a extrapolação dos campos magnéticos.



Figura 5.1 – Posicionamento dos apoios da linha L107

5.1 Modelação / Calibração

Utilizando imagens aéreas do local retiradas de um website (13), os apoios são identificados e colocados nos devidos locais. A distância entre apoios neste vão é de aproximadamente 150m.

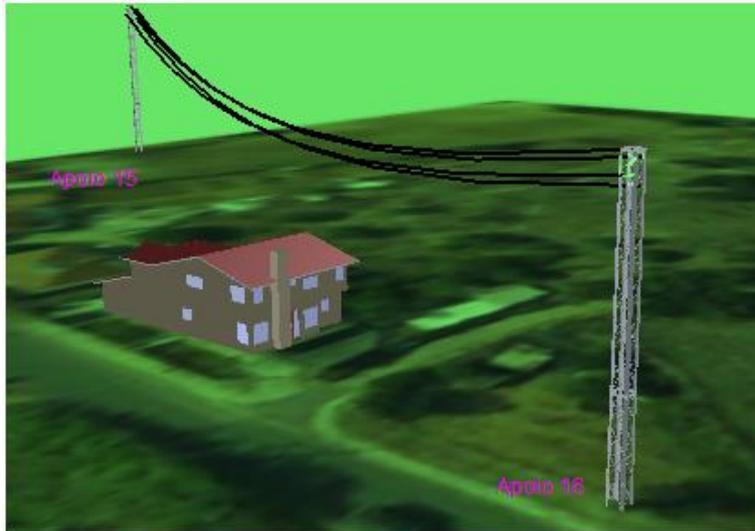


Figura 5.2 – Posicionamento dos apoios da linha L107 em formato 3D



Figura 5.3 – Fotografias do local de realização das medidas (8)

As configurações físicas que se definiram para os apoios foram as seguintes.

Apoio 16:

- Altura total – 22m
- Altura útil – 19.8m
- Configuração em trevo com um cabo de guarda, Figura 5.4
 - Travessas com um comprimento de 0.89m posicionadas a alturas de 19.3m, 18.55 e 17.8m;
 - Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 19.8m de altura.
- Base do apoio com um ângulo de 0° com eixo x.

Apoio 15:

- Altura total – 28m
- Altura útil – 25.8m
- Configuração em trevo com um cabo de guarda, Figura 5.4
 - Travessas com um comprimento de 0.89m posicionadas a alturas de 25.3m, 24.55m e 23.8m
 - Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 25.8m de altura
- Base do apoio com um ângulo de -27° com o eixo x devido à posição dos apoios adjacentes.

Chegou-se a estes valores através do cruzamento da informação cedida pela EDP com os valores tabelados no Anexo B, retirados de (14).

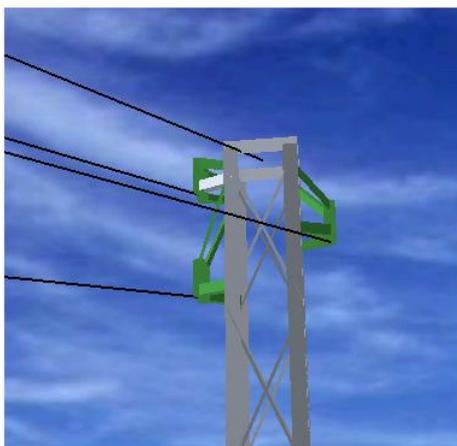


Figura 5.4 – Configuração dos apoios 15 e 16 em trevo com cabo de guarda

Apesar de a altura total dos apoios ser diferente, as suas configurações são similares, ou seja, as travessas têm os mesmos comprimentos e as mesmas distâncias entre si. Desse modo só se ilustra uma única figura com a configuração de ambos os apoios, Figura 5.4.

As medidas e a calibração do modelo foram efectuadas segundo dois perfis que se encontram identificados na Figura 5.5. O perfil 1 é um perfil longitudinal à linha, está afastado de cerca de 2m da projecção vertical da linha, contém os pontos A, B e C e foi definido no sentido de determinar o ponto de campo máximo nessa rua. O perfil 2 é um perfil transversal à linha e contém os pontos B e D. O ponto D está situado na projecção vertical do condutor inferior da linha.

Uma vez que os valores de campo magnético medidos nos pontos A, B e C são praticamente iguais, ver Anexo D, o perfil 2 foi escolhido de modo a tentar evitar obstáculos nas medidas. Na Figura 5.3, o posicionamento da corda no solo representa o percurso do perfil 2 das medidas.



Figura 5.5 – Identificação dos perfis de medição – relatório das medidas (8) à esquerda e software EFC-400 à direita

Quanto à catenária, no modelo final já calibrado tem-se o condutor inferior a passar a uma altura de 14.2m no ponto D do perfil 2 que corresponde a uma altura de 12.867m no ponto médio entre apoios e uma flecha de 7.9m. Os outros condutores mantêm as distâncias entre si apresentando catenárias semelhantes.

Esta altura de 14.2m no ponto D imposta no modelo final resulta numa diferença na ordem dos 2% em relação ao medido no local.

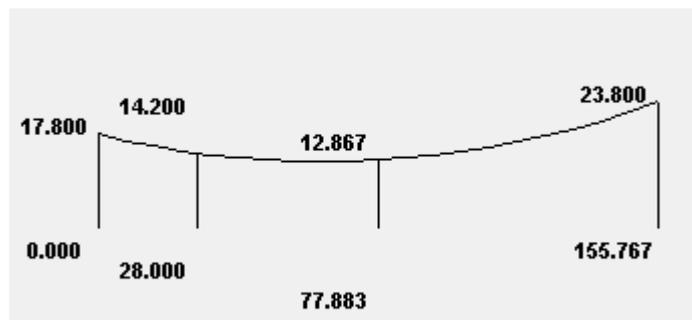


Figura 5.6 – Catenária do condutor inferior para o modelo final, valores em metros [m]

Em relação ao terreno, o acentuado desnível verificado na rua que serve de base para o estabelecimento de ambos os perfis, Figura 5.3, levou à modelação de um perfil de solo à imagem desse desnível. O perfil de solo modelado, ilustrado na Figura 5.7, define uma inclinação, crescente no sentido de D para B, próxima dos 30% ao longo de essa rua, sendo que no ponto D a altura do solo se considera ser aproximadamente 0m.



Figura 5.7 – Imagem 3D da rua com a inclinação – vista no sentido do ponto D para B

Ao nível das configurações do sistema, obviamente impôs-se uma tensão de sistema de 30kV e fazendo recurso ao diagrama de carga do dia das medidas, Anexo D, escolheu-se a corrente de 165A.

Com todas estas configurações, que correspondem ao modelo final calibrado, para os perfis 1 e 2 obtêm-se os valores de campo listados nas Tabelas Tabela 5.1 e Tabela 5.2. Na Tabela 5.2 os pontos estão assinalados pela distância em metros [m] ao ponto D da Figura 5.5.

Tabela 5.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
A	0,358	0,376	0,396
B	0,345	0,362	0,381
C	0,338	0,355	0,373

Tabela 5.2 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 2

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-19	0,137	0,140	0,143
-17	0,166	0,171	0,176
-15	0,208	0,215	0,222
-13	0,248	0,258	0,269
-11	0,273	0,286	0,300
-9	0,310	0,326	0,344
-7	0,318	0,335	0,352
-5	0,329	0,346	0,364
-3	0,341	0,358	0,377
-2	0,345	0,362	0,381

-1	0,346	0,362	0,381
D	0,346	0,362	0,381
1	0,347	0,363	0,381
2	0,346	0,362	0,380
3	0,344	0,360	0,377
5	0,333	0,347	0,363
7	0,314	0,326	0,340
9	0,289	0,300	0,312
11	0,263	0,272	0,281
16	0,197	0,202	0,208
21	0,143	0,146	0,150
26	0,103	0,105	0,107

Na Figura 5.8 mostra-se a adequação dos valores obtidos por simulação face aos valores medidos. Os valores medidos podem ser consultados no Anexo D.

Nesta mesma figura não se verifica qualquer tipo de discrepância entre os valores medidos e calculados que mereça rectificação.

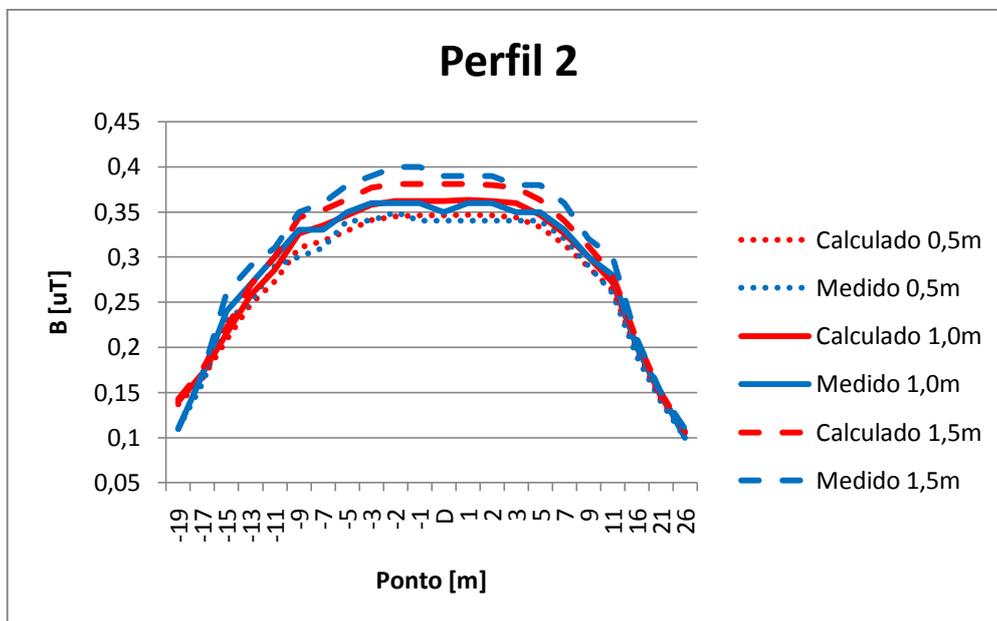


Figura 5.8 – Campo magnético ao longo do perfil 2, valores medidos e simulados

Na Tabela 5.3 estão listados os erros médios e máximos entre os valores medidos e os valores calculados para os dois perfis de medida. Os erros são calculados com os valores médios espaciais a 1.0m (média dos valores a 0.5m, 1.0m e 1.5m).

Quanto ao perfil 1, sendo este formado por apenas três pontos, os erros calculados são bastante reduzidos.

Tabela 5.3 – Erros entre os valores medidos e calculados para os perfis 1 e 2

Perfil	Erro Médio		Erro Máximo	
	[μ T]	[%]	[μ T]	[%]
1	0.004	1.1	0.01	2.7
2	0.007	3.3	0.03	27.3

Em relação ao perfil 2, o erro médio de 3.3% confirma a boa calibração efectuada. O erro máximo de 27.3%, por ser pontual e para o local mais afastado da linha (local onde o possíveis erros associados ao processo de medida são superiores) não se revela importante.

De seguida ilustra-se as linhas de campo magnético obtidas nas simulações a 1.0m de altura com o modelo calibrado que se descreveu.

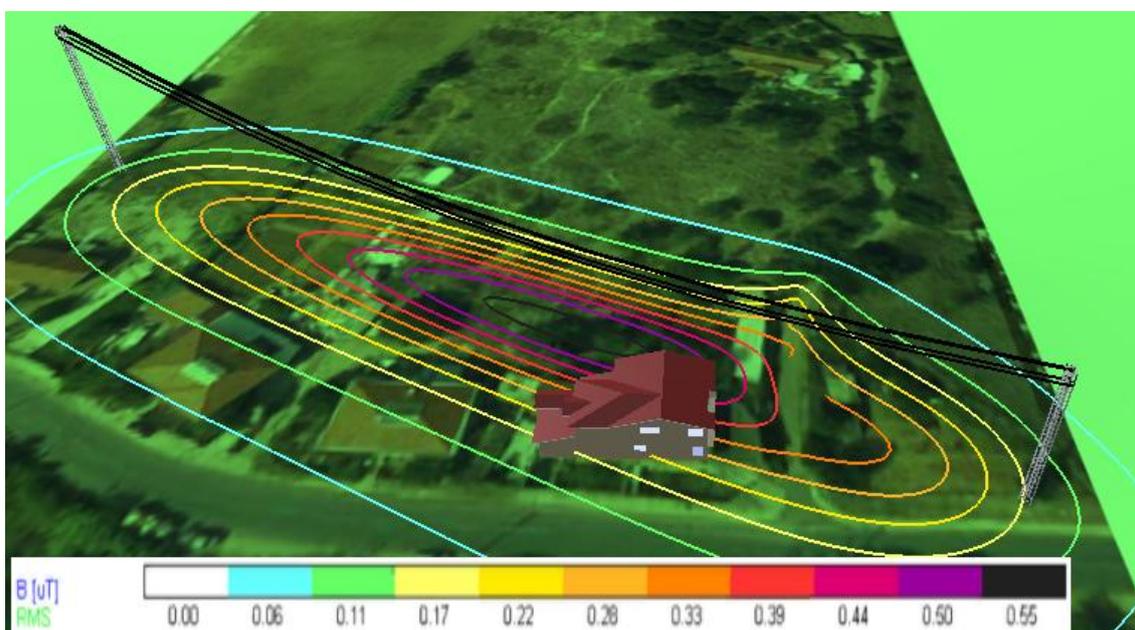


Figura 5.9 – Linhas de campo magnético a 1.0m, imagem 3D

5.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada

Nesta linha L107, o local escolhido para realizar a extrapolação é uma moradia de habitação que se encontra junto à rua que serviu de base para a realização das medidas.

Na Figura 5.10 identificam-se os dois novos perfis (perfil 3 e 4) criados no interior da moradia seleccionada para a extrapolação.



Figura 5.10 – Identificação dos dois novos perfis sobre a moradia mais próxima

A moradia foi modelada com uma altura de 7m mais 1m de telhado, o que corresponde a um edifício de dois pisos. Tal como é explicado no capítulo 3, não se impõe qualquer tipo de blindagem no modelo da moradia.

Nesta fase as simulações foram realizadas ao nível dos dois pisos, ou seja, às alturas de 0.5m, 1.0m, 1.5m, 3.5m, 4.0m e 4.5m, e ainda nas faces da habitação. Indo de encontro ao que a norma CEI 62110 (2008) defende, fez-se posteriormente uma média espacial em torno de 1.0m e 4.0m. A simulação nas faces da habitação corresponde ao topo das habitações (telhado).

Neste caso as simulações foram realizadas para o valor médio diário da corrente. Esse valor é de aproximadamente 140A e foi calculado a partir do diagrama de carga do dia das medidas que se encontra no Anexo D.

Tabela 5.4 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 140A

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 4,0 m
H	0,321	0,343	0,366	0,490	0,531	0,577	1,167	0,343	0,533
2	0,321	0,341	0,364	0,483	0,522	0,565	1,089	0,342	0,523
4	0,316	0,336	0,358	0,469	0,504	0,544	0,991	0,337	0,506
7	0,305	0,323	0,342	0,438	0,468	0,501	0,834	0,323	0,469
10	0,289	0,304	0,321	0,401	0,425	0,451	0,691	0,305	0,426
13	0,270	0,283	0,297	0,362	0,381	0,402	0,572	0,283	0,382
16	0,250	0,261	0,272	0,325	0,339	0,355	0,476	0,261	0,340
19	0,230	0,239	0,248	0,290	0,301	0,313	0,399	0,239	0,301

Tabela 5.5 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 140A

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 4,0 m
-10	0,196	0,203	0,211	0,245	0,255	0,264	0,341	0,203	0,255
-7	0,230	0,241	0,252	0,304	0,319	0,335	0,472	0,241	0,319
-4	0,269	0,284	0,300	0,377	0,401	0,427	0,684	0,284	0,402
-2	0,296	0,314	0,333	0,433	0,465	0,500	0,894	0,314	0,466
H	0,321	0,343	0,366	0,490	0,531	0,577	1,167	0,343	0,533

Nas figuras Figura 5.11 e Figura 5.12 está representado o campo magnético ao longo dos novos perfis.

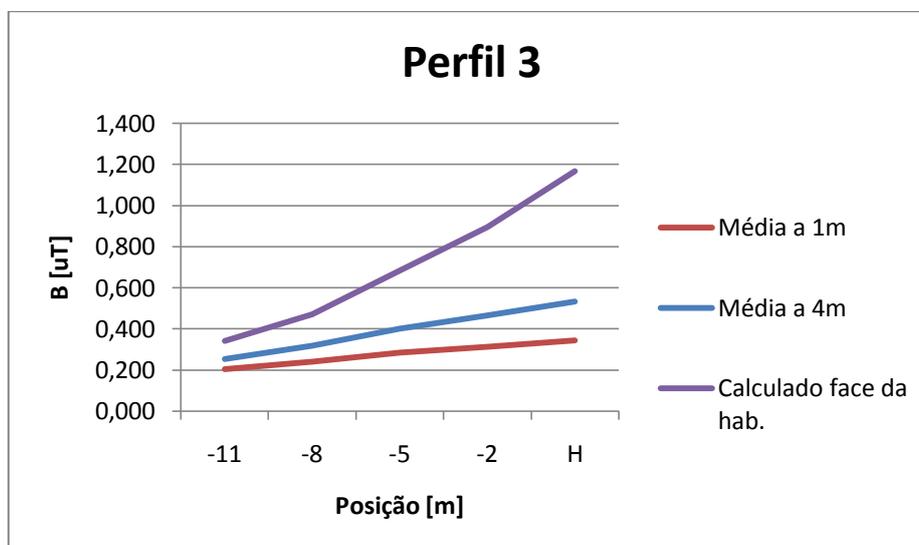


Figura 5.11 – Campo magnético ao longo do perfil 3 com a corrente média diária 140A

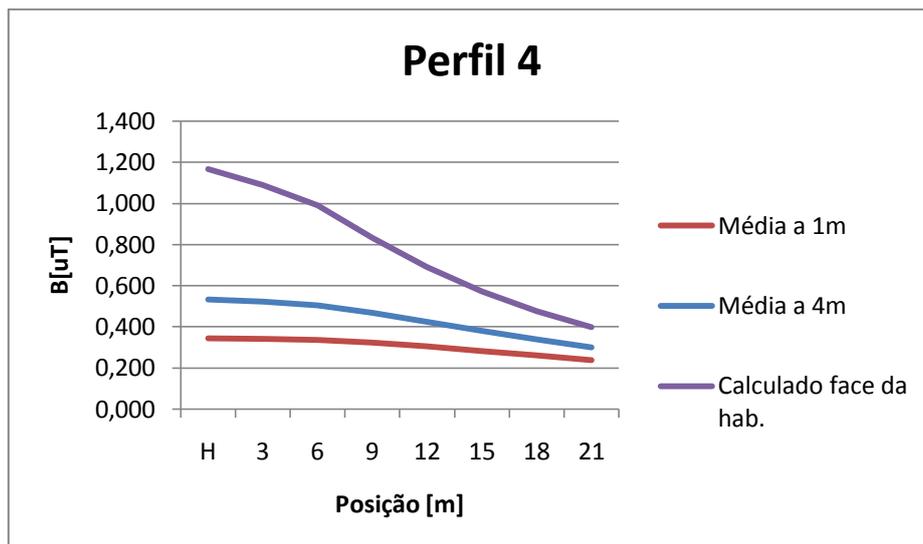


Figura 5.12 – Campo magnético ao longo do perfil 4 com a corrente média diária 140A

Analisando os resultados verifica-se mais uma vez que para os locais mais próximos da fonte (linha aérea) os campos são mais elevados. Para a altura de 4m, piso mais elevado, o campo atinge o máximo de 0.533 μT no ponto H. A registrar que deste modo se cumpre os limites de campo de 1 μT adoptados pela Suíça.

Nas figuras Figura 5.13 e Figura 5.14 ilustra-se as linhas de campo magnético obtidas a 4.0m de altura com a corrente média diária de 140A. Nestas imagens 3D representa-se a moradia só com as faces e com alguma transparência para se poder visualizar as linhas de campo no interior da habitação. Aqui pode-se confirmar que estes modelos dos edifícios não produzem qualquer efeito no campo magnético obtido.

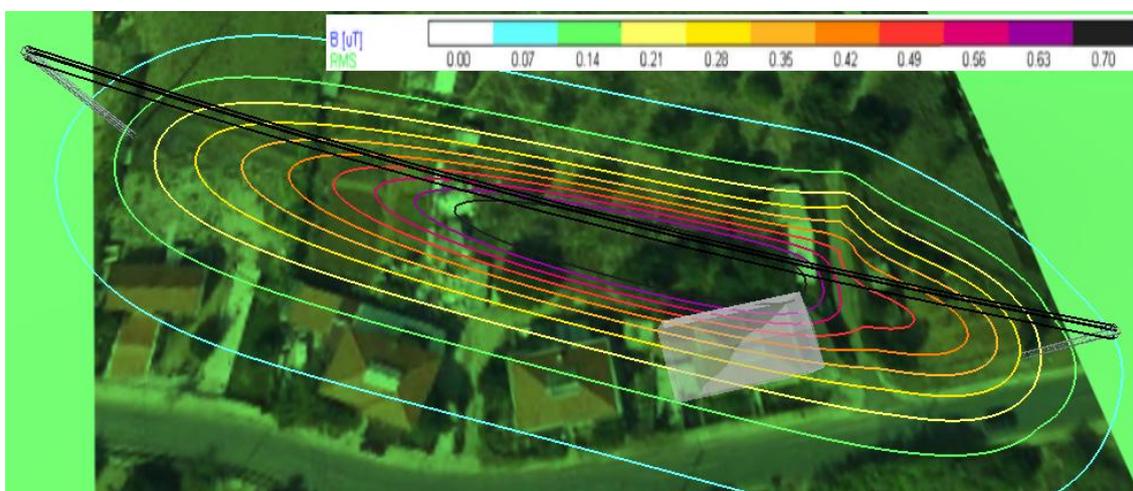


Figura 5.13 – Linhas de campo magnético a 4.0m para corrente 140A, imagem 3D

Na Figura 5.14 faz-se um *zoom* sobre a habitação mantendo-se a mesma escala de intensidade das linhas de campo da Figura 5.13.

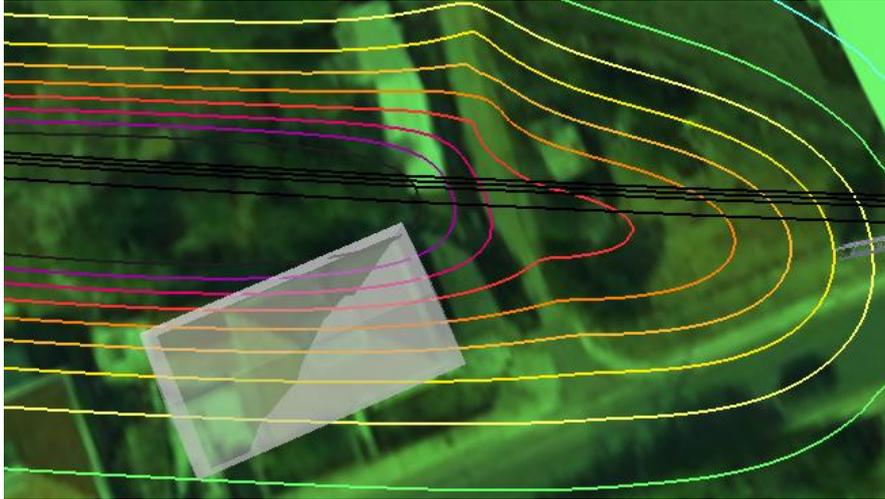


Figura 5.14 – Linhas de campo magnético a 4.0m para corrente de 140A, *zoom* na habitação

6 Linha de 30kV Dupla

A linha de 30kV dupla, formada pelas linhas L3127/L3128, está situada numa zona de inserção urbana média nos arredores de Vila Franca de Xira. O vão da linha que se propôs modelar, sobre o qual incidiram as medidas, é o vão entre os apoios 11 e 12. Sob este vão estão situadas algumas moradias, tal como a Figura 6.1 o ilustra. Estas moradias são os locais próximos de exposição prolongada para os quais é realizada a extrapolação dos campos magnéticos.

6.1 Modelação / Calibração

Fazendo uso de imagens aéreas da zona retiradas de um website (13), os apoios são posicionados nos devidos locais. A distância entre os apoios 11 e 12 é então de aproximadamente 58m.

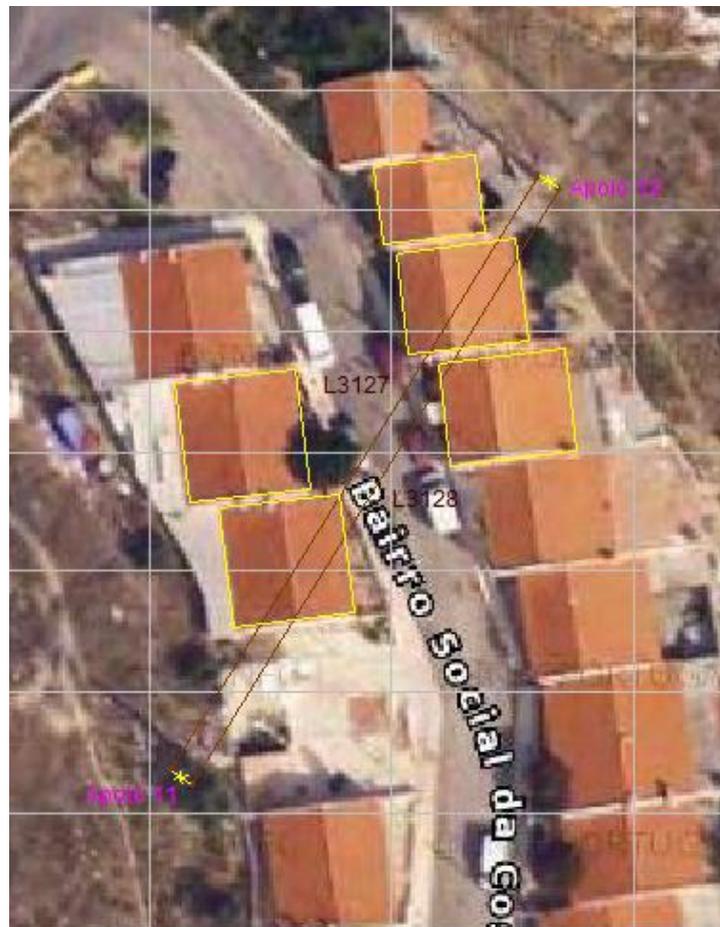


Figura 6.1 – Posicionamento dos apoios e identificação das linhas L3127 e L3128

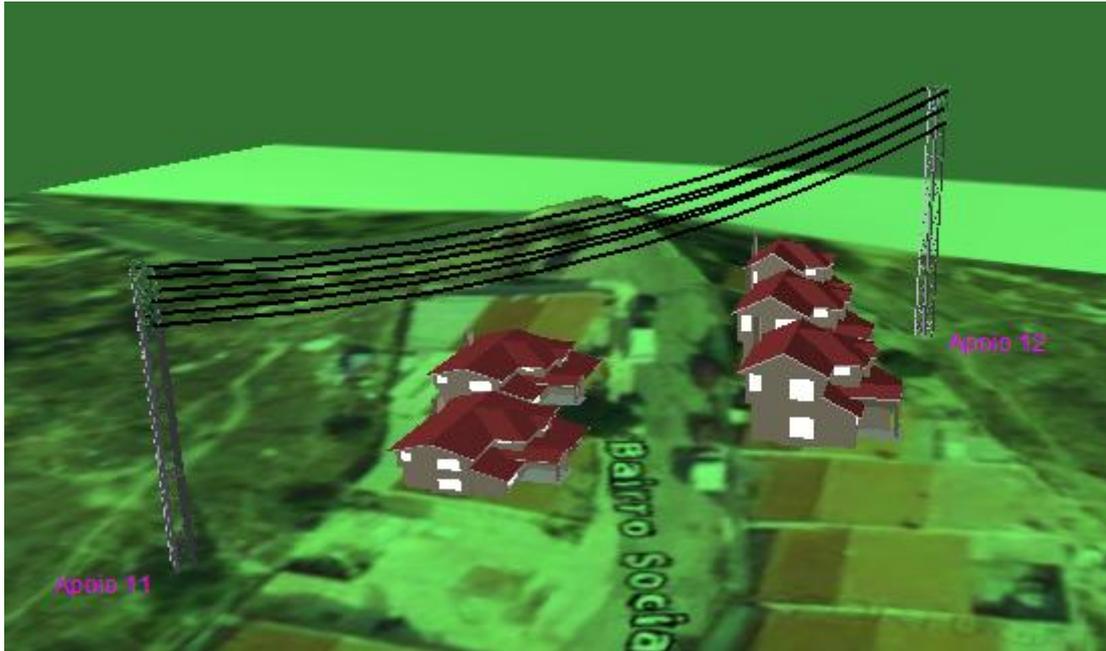


Figura 6.2 – Posicionamento dos apoios da linha L3127/L3128 em formato 3D



Figura 6.3 – Fotografias do local de realização das medidas (9)

As configurações físicas que se definiram para os apoios foram as seguintes.

Apoio 11:

- Altura total – 18m
- Altura útil – 16m
- Configuração em esteira vertical dupla sem cabo de guarda, Figura 6.4

- Travessas com um comprimento de 2m posicionadas a alturas de 16m, 14.8m e 13.6m
- Fases 1, 2 e 3 posicionadas por esta ordem desde a travessa mais alta até à mais baixa
- Base do apoio com um ângulo de -35° com o eixo x devido ao posicionamento dos apoios adjacentes.

Apoio 12:

- Altura total – 22m
- Altura útil – 19.8m
- Configuração em esteira vertical dupla sem cabo de guarda, Figura 6.4
 - Travessas com um comprimento de 2m posicionadas a alturas de 19.8m, 18.6m e 17.4m
 - Fases 1, 2 e 3 posicionadas por esta ordem desde a travessa mais alta até à mais baixa
- Base do apoio com um ângulo de -35° com o eixo x devido ao posicionamento dos outros apoios.

Chegou-se a estes valores através do cruzamento da informação cedida pela EDP com os valores tabelados no Anexo B retirados de (14).

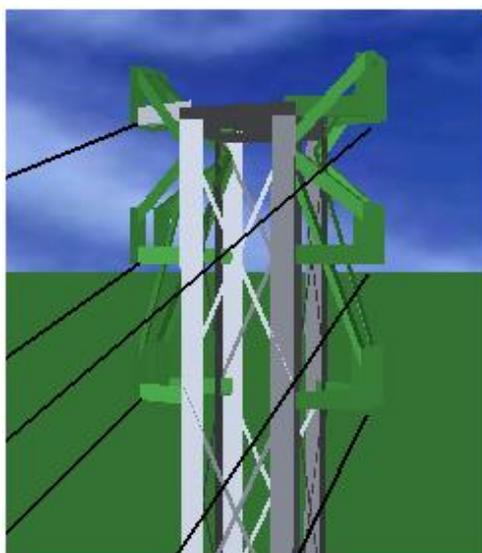


Figura 6.4 – Configuração dos apoios 11 e 12 em esteira vertical dupla sem cabo de guarda

Apesar de a altura total dos apoios ser diferente, as suas configurações são similares, ou seja, as travessas têm os mesmos comprimentos e as mesmas distâncias entre si. Desse modo só se ilustra uma única figura com a configuração de ambos os apoios, Figura 6.4.

Devido ao reduzido espaço disponível sob a linha na direcção longitudinal à linha, só se realizaram medidas segundo um único perfil. Esse perfil, nomeado de perfil 1, é um perfil transversal à linha e passa pelos pontos A e B. Os pontos A e B estão situados nas projecções verticais dos condutores inferiores de cada uma das linhas.

Não se tendo realizado as medidas no perfil longitudinal, o ponto de campo máximo da rua a partir do qual foi escolhido o posicionamento do perfil 1 foi obtido por determinação do ponto de altura mínima dos condutores. No Anexo E encontram-se tabelados os valores das alturas medidas no local para esse propósito. Na Figura 6.3, o posicionamento da corda no solo representa o percurso do perfil 1 de medição.



Figura 6.5 – Identificação do perfil 1 de medição – relatório das medidas (9) à esquerda e software EFC-400 à direita

Em relação à catenária, no modelo final calibrado tem-se o condutor inferior a passar a uma altura de 13.7m no ponto A que é sensivelmente o mesmo que o ponto médio entre apoios, e que corresponde a uma flecha de aproximadamente 1.7m. Os outros condutores mantêm as distâncias entre si apresentando catenárias semelhantes.

Esta altura de 13.7m no ponto A do modelo final resulta numa diferença na ordem dos 4% em relação ao medido no local, ver Anexo E.

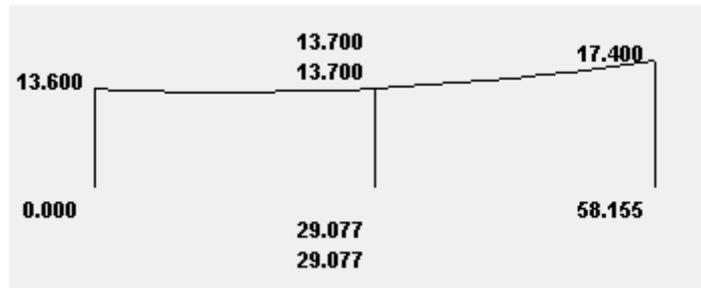


Figura 6.6 – Catenária do condutor inferior para o modelo final, valores em metros [m]

Quanto ao terreno, o acentuado desnível verificado na rua que serve de base para o estabelecimento do perfil 1, Figura 6.3, conduziu à definição de um perfil de solo que demonstre esse desnível. O perfil de solo criado, ilustrado na Figura 6.7, define uma inclinação, crescente no sentido de A para B, próxima dos 20% ao longo de essa rua.



Figura 6.7 – Imagem 3D da rua com a inclinação – vista no sentido do ponto A para B

Ao nível das configurações do sistema, quando se consultou o diagrama de carga do dia das medidas, Anexo E, verificou-se que a linha L3128 esteve sem carga praticamente durante o dia todo e como tal também durante a realização das medidas. Quanto à linha L3127 o valor retirado do diagrama de carga foi de 50A.

Esta situação de se ter realizado as medidas de campo com uma carga nula para a linha L3128 prejudica a calibração no sentido em que esses valores medidos não contêm praticamente nenhuma informação sobre essa linha L3128. Isto é, como a linha está sem carga, a influência desta nos valores medidos é praticamente nula. A única influência que poderá ter é então, devido ao seu posicionamento, uma possível mas mínima atenuação do campo gerado pela

outra linha L3127. Deste modo, mesmo que os valores obtidos por simulação sejam iguais aos medidos, não se pode garantir, da mesma forma que faz para a outra linha L3127, que a calibração da linha L3128 está correcta.

Assinalar que ao se aperceber desta situação deveria-se ter realizado novas medidas para um perfil de carga tipo e assim dar mais força ao modelo tridimensional criado.

De qualquer das formas, para a calibração final, utilizou-se uma tensão de sistema de 30kV e correntes de 50A na linha L3127 e 0A na linha L3128. Com essas correntes obteve-se para o perfil 1 os valores da Tabela 6.1.

Na Tabela 6.1 os pontos estão assinalados pela distância em metros [m] ao ponto A ou B, conforme o lado da linha.

Tabela 6.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-35	0,013	0,013	0,013
-30	0,018	0,019	0,019
-25	0,026	0,026	0,027
-20	0,035	0,036	0,037
-15	0,047	0,049	0,051
-13	0,054	0,056	0,059
-11	0,061	0,064	0,067
-9	0,069	0,072	0,076
-7	0,076	0,080	0,085
-5	0,083	0,088	0,093
-4	0,086	0,092	0,097
-3	0,090	0,096	0,102
-2	0,094	0,100	0,107
-1	0,100	0,107	0,114
A	0,103	0,110	0,118
	0,105	0,112	0,120
	0,106	0,114	0,122
	0,107	0,115	0,123
B	0,109	0,117	0,125
1	0,112	0,120	0,129
2	0,114	0,122	0,132
3	0,116	0,124	0,133
4	0,116	0,124	0,133
6	0,115	0,123	0,131
8	0,107	0,113	0,121
10	0,098	0,103	0,109
12	0,088	0,092	0,097
14	0,077	0,081	0,084

16	0,067	0,070	0,072
21	0,045	0,046	0,047
26	0,028	0,029	0,029
31	0,018	0,018	0,018
36	0,012	0,012	0,012
41	0,008	0,008	0,008

Na Figura 6.8 mostra-se a adequação dos valores obtidos por simulação face aos valores medidos. Os valores medidos podem ser consultados no Anexo E.

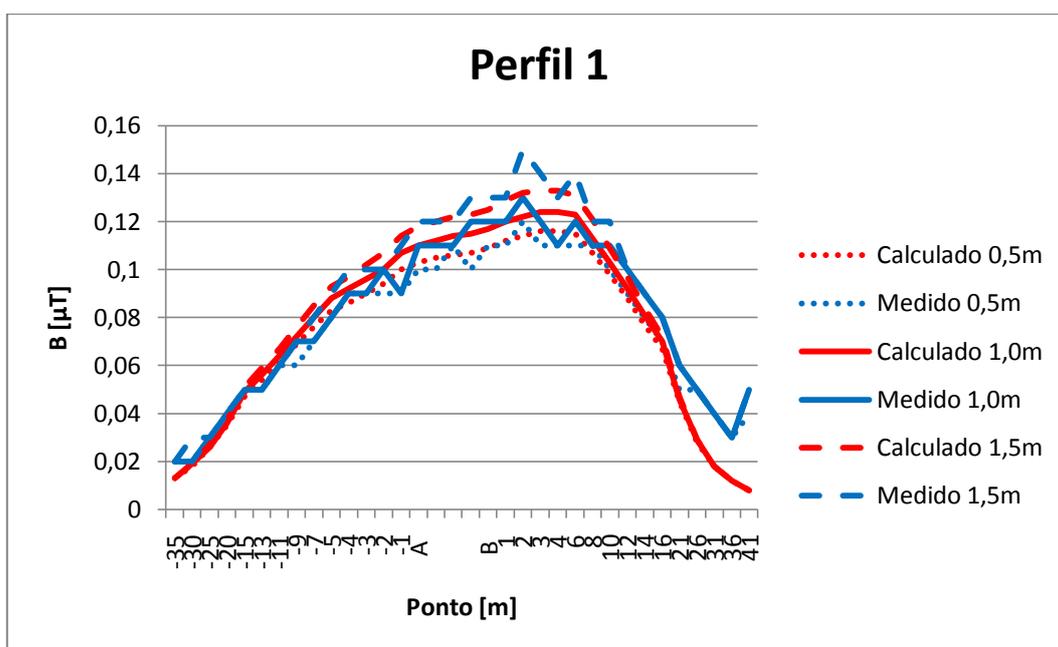


Figura 6.8 – Campo magnético ao longo do perfil 1, valores medidos e simulados

Analisando a mesma figura verifica-se que nos pontos mais afastados da linha para o lado do ponto B existe uma maior discrepância entre os valores medidos e calculados, nesses pontos os valores medidos são constantemente superiores.

Como os valores nesses pontos são bastante reduzidos, na ordem dos 0.06 μT , tal como se explicou no Capítulo 3, procurou-se analisar a possibilidade de existência de qualquer equipamento eléctrico que pudesse provocar essa discrepância.

Verificou-se então a existência de várias linhas BT localizadas sobre esses pontos, ver cima da subida da Figura 6.3, perfeitamente justificativas dessas discrepâncias mais acentuadas.

Para o resto dos pontos os valores medidos e obtidos são semelhantes.

Na Tabela 6.2 estão listados os erros médios e máximos, entre os valores medidos e calculados. Esses erros foram calculados para os valores de campos médios espaciais a 1.0m.

Na mesma tabela, apesar de se verificar que os erros relativos são elevados, o erro absoluto não é significativo face aos possíveis erros inerentes ao processo de medida já referidos no Capítulo 3.

De qualquer das formas esses erros relativos elevados em muito se devem à discrepância existente nos pontos próximos das linhas BT. Deste modo, pode-se afirmar que o modelo criado representa de forma real a linha de 30kV dupla L3217/L3218.

Tabela 6.2 – Erros entre os valores medidos e calculados para o único perfil

Perfil	Erro Médio		Erro Máximo	
	[μT]	[%]	[μT]	[%]
1	0.007	10.8	0.039	60

No seguimento ilustra-se as linhas de campo obtidas nas simulações a 1.0m de altura com o modelo que se descreveu.

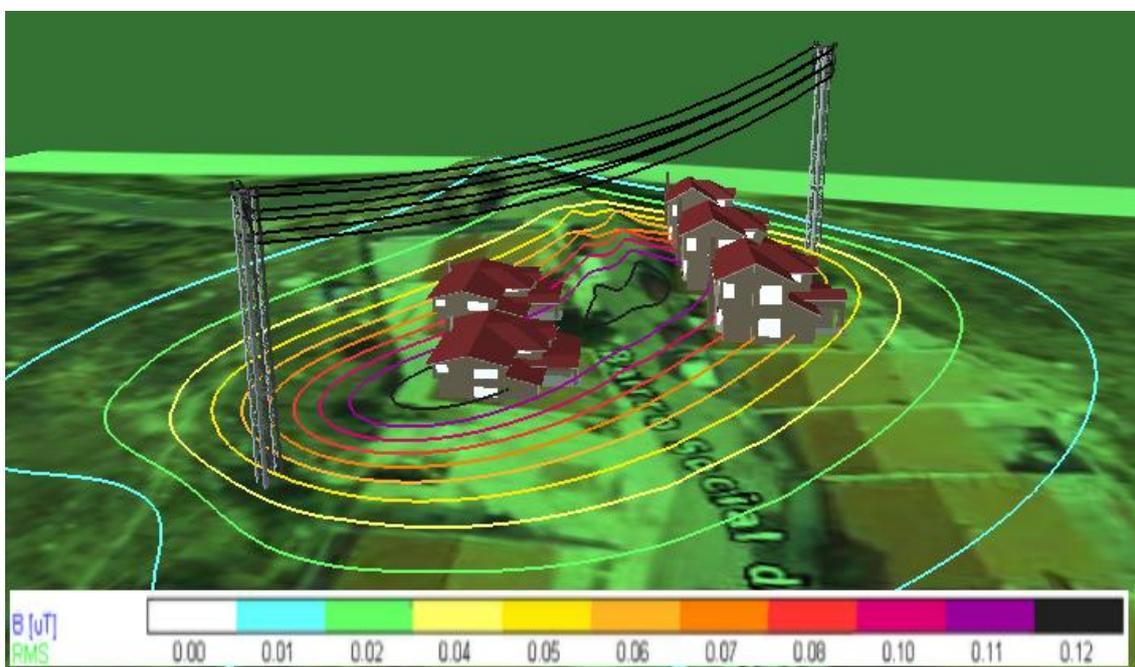


Figura 6.9 – Linhas de campo magnético a 1.0m, imagem 3D

6.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada

Nesta linha dupla L3127/L3128 os locais próximos da linha de exposição prolongada são as moradias de habitação. Selecionou-se então para realização das extrapolações, as habitações que se encontram mais próximas dos maiores valores de campo magnético obtidos.

Na Figura 6.10 identificam-se os doze novos perfis criados no interior das cinco habitações escolhidas.

As habitações dos perfis 2, 3, 4, 5 e 6 foram modeladas com uma altura de 3.5m (1 piso) e as habitações dos perfis 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 foram modeladas com uma altura de 7.0m (2 pisos). Mais uma vez, para estes modelos não se impõe qualquer tipo de blindagem.

Nesta fase as simulações foram realizadas ao nível dos dois pisos, ou seja, às alturas de 0.5m, 1.0m, 1.5m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, e ainda nas faces da habitação. Indo de encontro ao que a norma CEI 62110 (2008) defende, fez-se uma média espacial em torno de 1.0m e 4.0m.

Nesta fase as simulações foram realizadas com a corrente de 45A em ambas as linhas L3127 e L3128. Sabendo-se que o valor médio diário da corrente para a linha L3128 é próximo de 0A, estes valores de corrente foram escolhidos por 45A ser a corrente média diária da linha L3127 e se admitir, que num dia normal, também seria esse o valor médio diário para a linha L3128.

O cálculo desta média diária foi realizado a partir do diagrama de carga do dia das medidas que se encontra no Anexo E.



Figura 6.10 – Identificação dos novos perfis localizados nas moradias mais próximas

Desta forma, impondo-se as correntes de 45A em ambas as linhas, com o modelo criado obtém-se para os perfis 9, 10 e 11 os valores de campo magnético listados nas Tabelas Tabela 6.3, Tabela 6.4 e Tabela 6.5.

Tabela 6.3 – Campo magnético ao longo do perfil 9 com corrente de 45A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 4,0 m
H	0,128	0,137	0,147	0,200	0,217	0,236	0,383	0,137	0,218
1	0,133	0,143	0,153	0,208	0,225	0,246	0,398	0,143	0,226
2	0,137	0,147	0,158	0,213	0,232	0,252	0,407	0,147	0,232
3	0,141	0,150	0,161	0,217	0,236	0,256	0,410	0,151	0,236
4	0,143	0,152	0,163	0,219	0,237	0,258	0,408	0,153	0,238
5	0,144	0,153	0,164	0,219	0,237	0,257	0,402	0,154	0,238
I	0,144	0,153	0,164	0,217	0,234	0,254	0,391	0,154	0,235

Tabela 6.4 – Campo magnético ao longo do perfil 10 com corrente de 45A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 4,0 m
I	0,144	0,153	0,164	0,217	0,234	0,254	0,391	0,154	0,235
1	0,152	0,162	0,173	0,231	0,250	0,271	0,426	0,162	0,251
2	0,159	0,170	0,182	0,244	0,265	0,288	0,461	0,170	0,266
3	0,165	0,177	0,190	0,256	0,278	0,303	0,493	0,177	0,279
4	0,171	0,183	0,196	0,267	0,290	0,316	0,519	0,183	0,291
5	0,176	0,188	0,202	0,275	0,299	0,326	0,539	0,189	0,300
6	0,180	0,193	0,207	0,282	0,306	0,334	0,552	0,193	0,307
7	0,183	0,196	0,211	0,286	0,311	0,339	0,558	0,197	0,312

Tabela 6.5 – Campo magnético ao longo do perfil 11 com corrente de 45A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 4,0 m
H	0,128	0,137	0,147	0,200	0,217	0,236	0,383	0,137	0,218
1	0,134	0,143	0,154	0,209	0,227	0,247	0,399	0,144	0,228
2	0,139	0,148	0,159	0,216	0,234	0,255	0,410	0,149	0,235
3	0,143	0,152	0,163	0,220	0,239	0,260	0,413	0,153	0,240
4	0,145	0,155	0,166	0,223	0,241	0,261	0,409	0,155	0,242
5	0,147	0,157	0,168	0,223	0,241	0,261	0,400	0,157	0,242
6	0,148	0,158	0,168	0,222	0,238	0,257	0,385	0,158	0,239
7	0,148	0,157	0,168	0,218	0,234	0,251	0,367	0,158	0,234

Optou-se por apresentar estes perfis 9, 10 e 11 em detrimento de outros, por serem os que apresentam valores mais elevados de campo magnético e desse modo representam a pior situação para os valores médios de carga.

Nas figuras Figura 6.11, Figura 6.12 e Figura 6.13 está representado o campo magnético ao longo dos perfis 9, 10 e 11 respectivamente.

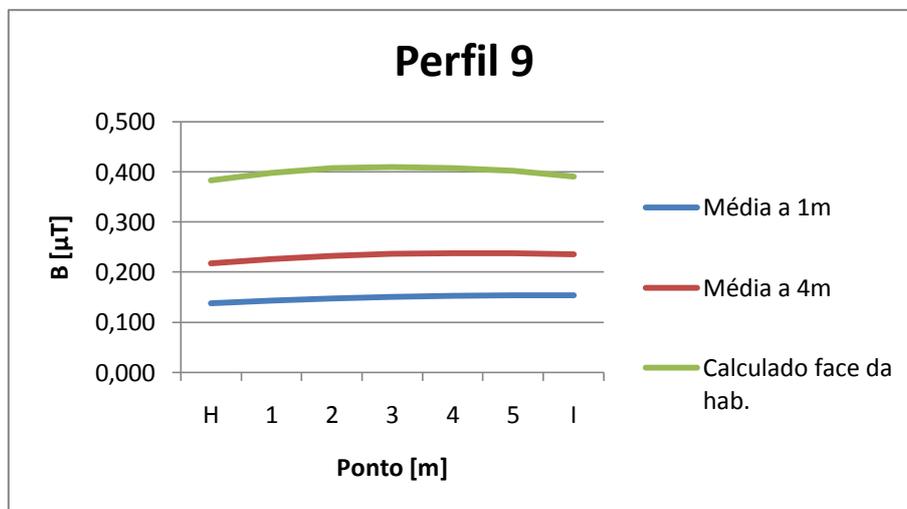


Figura 6.11 – Campo magnético ao longo do perfil 9 com 45A em ambas as linhas

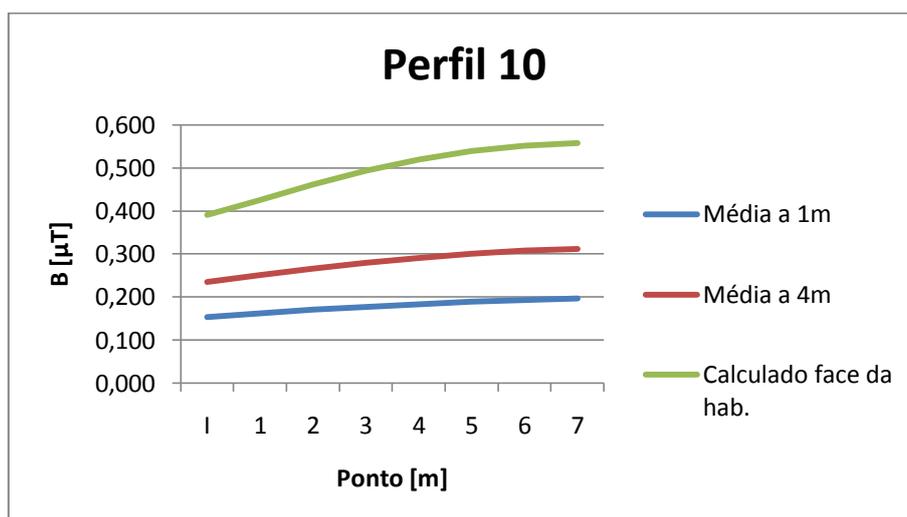


Figura 6.12 – Campo magnético ao longo do perfil 10 com 45A em ambas as linhas

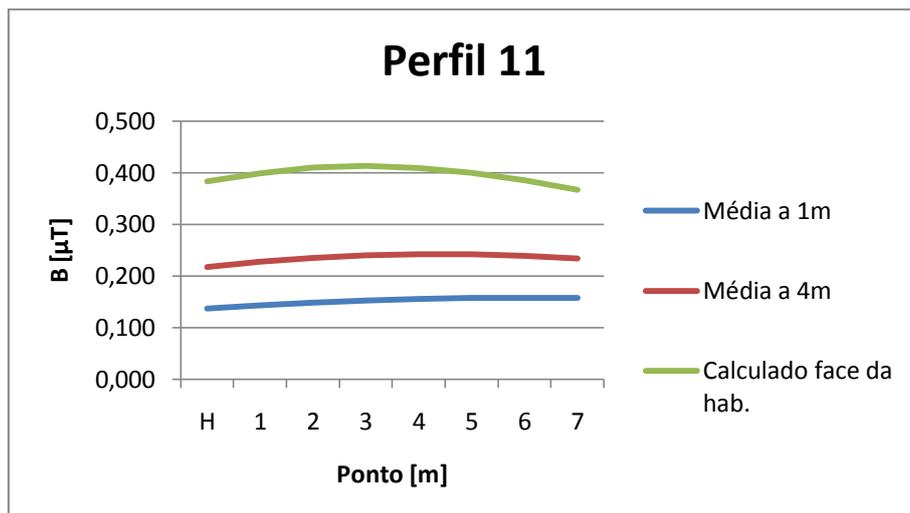


Figura 6.13 – Campo magnético ao longo do perfil 11 com 45A em ambas as linhas

Analisando os resultados verifica-se novamente que é à altura do topo da habitação e do piso mais elevado que se obtêm os valores de campo mais elevados. Para a altura de 4m, piso mais elevado, o campo atinge o máximo de 0.312 μT no ponto do perfil 10 mais afastado de I. A registrar que deste modo se cumpre os limites de campo de 1 μT adoptados pela Suíça.

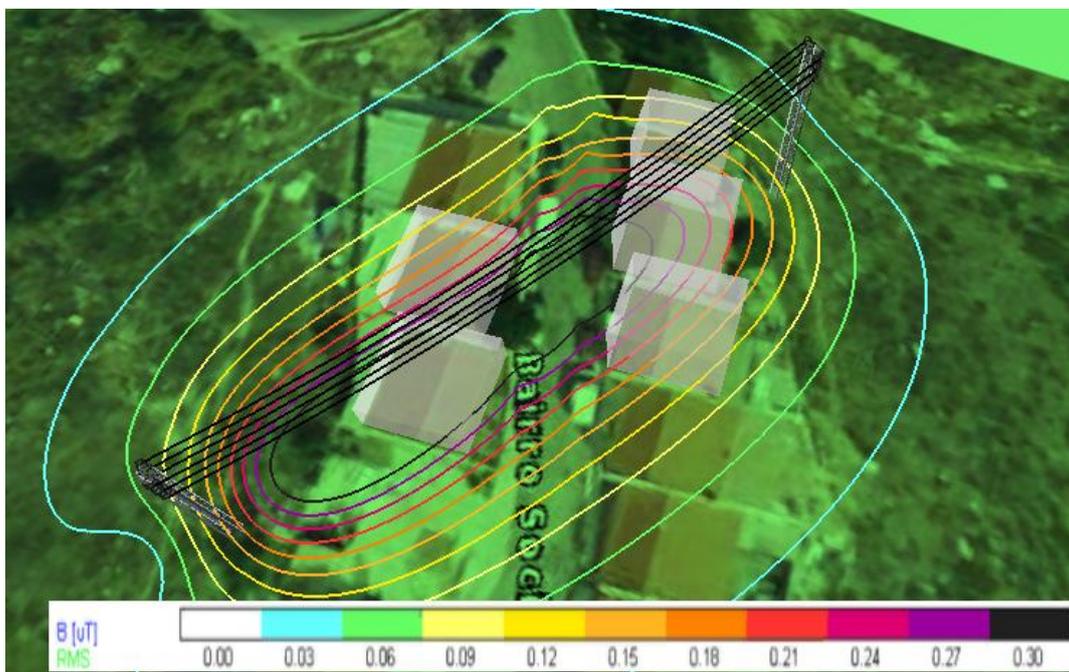


Figura 6.14 – Linhas de campo magnético a 4.0m para a corrente de 45A em ambas as linhas, imagem 3D

Nas figuras Figura 6.14 e Figura 6.15 ilustra-se as linhas de campo magnético obtidas a 4.0m de altura com a corrente eléctrica de 45A em ambas as linhas. Nestas imagens 3D representa-se as habitações só com as faces e com alguma transparência para se poder visualizar as

linhas de campo no interior das mesmas. Na Figura 6.15 faz-se um *zoom* sobre as habitações mais elevadas.

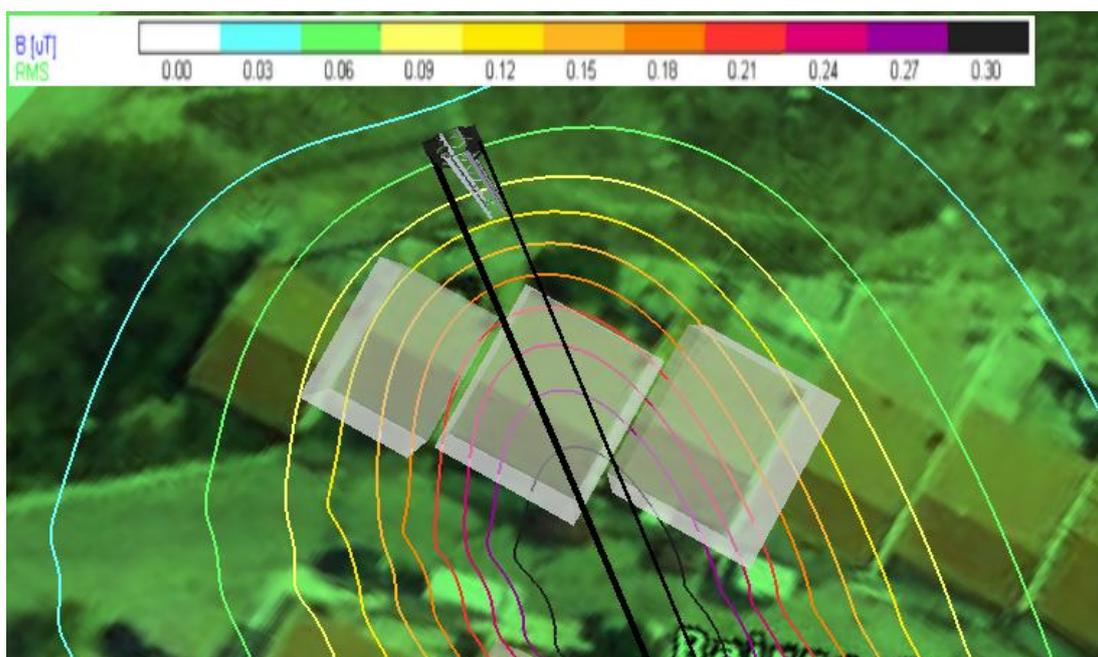


Figura 6.15 – Linhas de campo magnético a 4.0m para a corrente de 45A em ambas as linhas, *zoom* nas habitações mais elevadas

7 Linha de 60kV Simples

A linha de 60kV simples, denominada por L6112, está situada numa zona de inserção urbana média próxima de Oeiras. Para esta linha, utilizando as medidas realizadas (10), propôs-se modelar os dois vãos formados pelos apoios 27, 28 e 29. Como se pode verificar na Figura 7.1, sob ambos os vãos estão situadas habitações, sob o primeiro vão estão prédios enquanto sobre o segundo estão moradias. Estes edifícios (prédios e moradias) são os locais próximos de exposição prolongada para os quais é realizada a extrapolação dos campos magnéticos.

7.1 Modelação / Calibração

Utilizando imagens aéreas do local, retiradas de um website (12), os apoios são posicionados nos seus locais. As distâncias entre os apoios 27, 28 e 29 são de aproximadamente 158m e 120m respectivamente.



Figura 7.1 – Posicionamento dos apoios da linha L6112

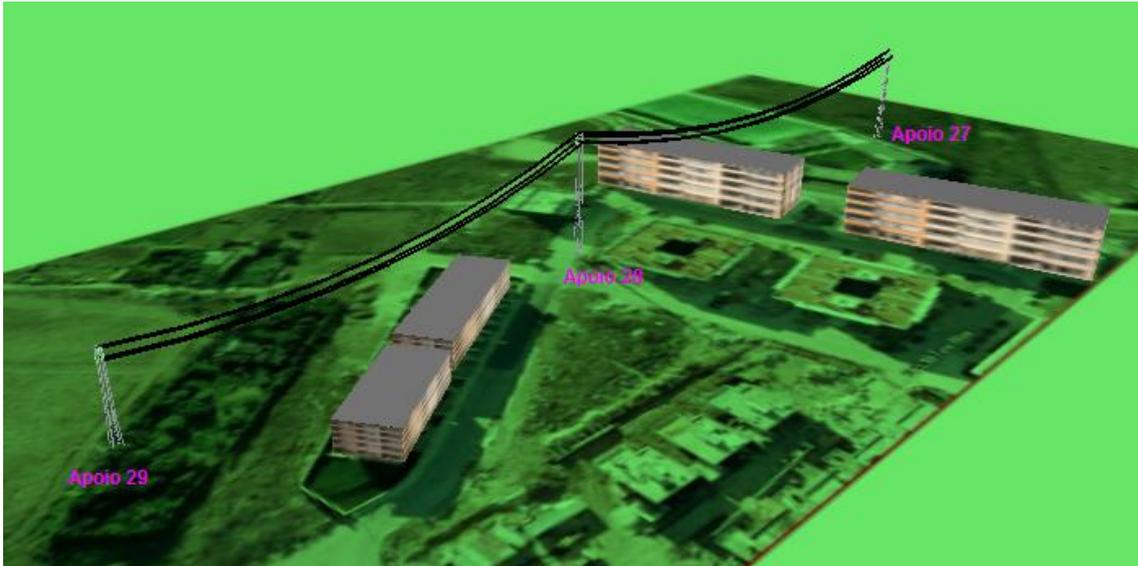


Figura 7.2 – Posicionamento dos apoios da linha L6112 em formato 3D



Figura 7.3 – Fotografias dos locais de realização das medidas (10), à esquerda vão 27/28 e à direita vão 28/29

As configurações físicas que se definiram para os apoios foram as seguintes.

Apoio 27:

- Altura total – 34m
- Altura útil – 31.4m
- Configuração em trevo com um cabo de guarda, Figura 7.4

- Travessas com um comprimento de 1.5m posicionadas a alturas de 30.4m, 29.4m e 28.4m
- Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 31.4m de altura
- Base do apoio com um ângulo de 0.835° com eixo x devido ao posicionamento dos apoios adjacentes.

Apoio 28:

- Altura total – 36m
- Altura útil – 33.4m
- Configuração em trevo com um cabo guarda, Figura 7.4
 - Travessas com um comprimento de 1.5m posicionadas a alturas de 32.4m, 31.4m e 30.4m
 - Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 33.4m de altura
- Base do apoio com um ângulo de 0.851° com eixo x devido ao posicionamento dos apoios adjacentes.

Apoio 29:

- Altura total – 22m
- Altura útil – 19.8m
- Configuração em trevo com um cabo de guarda, Figura 7.4
 - Travessas com comprimento de 1.5m posicionadas a alturas de 18.8m, 17.8m e 16.8m
 - Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 19.8m de altura
- Base do apoio com um ângulo de 0.867° com eixo x devido ao posicionamento dos apoios adjacentes.

Chegou-se a estes valores através do cruzamento da informação cedida pela EDP com os valores tabelados no Anexo B, retirados de (14).



Figura 7.4 – Configuração dos apoios 27, 28 e 29 em trevo com cabo de guarda

Apesar de a altura total dos apoios ser diferente, as suas configurações são similares, ou seja, as travessas têm os mesmos comprimentos e as mesmas distâncias entre si. Desse modo só se ilustra uma única figura com a configuração dos três apoios, Figura 7.4.

As medidas e a calibração do modelo foram efectuadas segundo cinco perfis, três sob o vão 27/28 identificados na Figura 7.5, e dois sob o vão 28/29 identificados na Figura 7.6.



Figura 7.5 – Identificação dos perfis de medição do vão 27/28 – relatório das medidas (10) à esquerda e software EFC-400 à direita

No vão 27/28, Figura 7.5, o perfil 1 é um perfil longitudinal à linha, está afastado de cerca de 2m da mesma e contém o ponto C. Os perfis 2 e 3 são perfis transversais à linha, paralelos entre si e passam pelos pontos A, D e B, E respectivamente. Os pontos A e B estão situados na projecção vertical do condutor inferior da linha e estão afastados de 4m. Os pontos D e E estão situados na projecção vertical do condutor mais à direita da linha. Realizaram-se ainda medidas da altura dos condutores nos pontos A, B, C e D, cujos resultados estão no Anexo F.



Figura 7.6 – Identificação dos perfis de medição do vão 28/29 – relatório das medidas (10) à esquerda e software EFC-400 à direita

No vão 28/29, Figura 7.6, o perfil 4 é um perfil longitudinal à linha, está afastado de cerca de 2m da mesma e contém o ponto F. O perfil 5 é transversal à linha e passa pelos pontos G e H. Estes pontos G e H estão situados nas projecções verticais de dois dos condutores da linha.

Quanto à catenária, para o vão 27/28 tem-se o condutor inferior a passar a uma altura de 20.4m no ponto A do perfil 2 que é sensivelmente o mesmo ponto que o ponto médio entre apoios e que corresponde a uma flecha de aproximadamente 9m. Os outros condutores mantêm as distâncias entre si apresentando catenárias semelhantes. Esta altura de 20.4m no ponto A do modelo final resulta numa diferença na ordem dos 9% em relação ao medido no local.

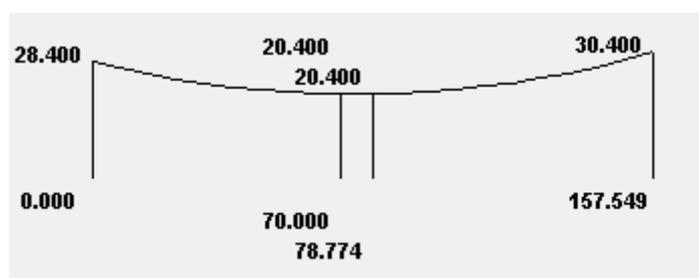


Figura 7.7 – Catenária do condutor inferior no vão 27/28, valores em metros [m]

Para o vão 28/29 tem-se o condutor inferior a passar a uma altura de 14.8m junto ao ponto F do perfil 4 que corresponde a uma altura de 16.06m no ponto médio entre apoios e uma flecha de 7.5m. Os outros condutores mantêm as distâncias entre si apresentando catenárias semelhantes. Esta altura de 14.8m no ponto F representa um erro na ordem dos 3% em relação ao medido no local.

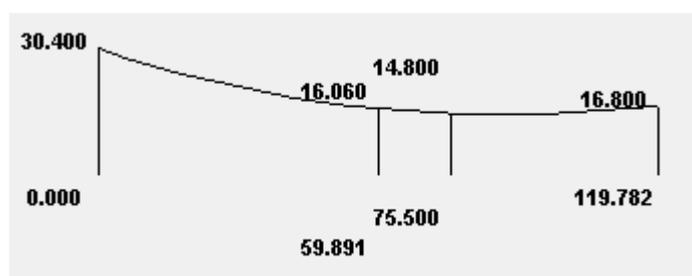


Figura 7.8 – Catenária do condutor inferior no vão 28/29, valores em metros [m]

Em relação ao terreno não se realizaram modelações. Para além de não existir nenhuma nota no relatório das medidas indicativa de existência de desníveis, também nas fotografias do local, Figura 7.3, não se verificam nenhuma inclinações significativas para serem modeladas.

Ao nível das configurações do sistema tem-se uma tensão de 60kV e, conforme se esteja a simular os perfil 2, 3 e 5 ou os perfis 1 e 4 impôs-se uma corrente de 99A ou 105A respectivamente. Nas simulações utiliza-se estes diferentes valores de corrente eléctrica uma vez que as medidas foram realizadas em horas diferentes e como tal com cargas diferentes. Se analisar-

mos os valores medidos, tabelados no Anexo F, confirma-se esta situação. Mesmos pontos de medida mas em perfis diferentes têm valores medidos diferentes.

Com todas estas configurações, que correspondem ao modelo final já calibrado, para os perfis 1 e 2 do vão 27/28 e 4 e 5 do vão 28/29 obtêm-se os valores de campo listados nas Tabelas Tabela 7.1, Tabela 7.2, Tabela 7.3 e Tabela 7.4.

Uma vez que os valores obtidos para o perfil 3 são bastante semelhantes aos obtidos para o perfil 2 optou-se por tabelar esses valores apenas no Anexo F.

Em ambas as tabelas, os pontos estão assinalados pela distância em metros [m] ao ponto nomeado mais próximo. Por exemplo, na Tabela 7.1, os pontos estão assinalados pela sua distância em relação ao ponto C.

Tabela 7.1 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 1, vão 27/28

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
C	0,180	0,188	0,196
2	0,181	0,189	0,197
4	0,182	0,189	0,197
6	0,182	0,190	0,198
8	0,182	0,190	0,198
10	0,182	0,190	0,198
12	0,182	0,189	0,198
14	0,181	0,189	0,197

Tabela 7.2 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 2, vão 27/28

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-5	0,156	0,162	0,169
-4	0,162	0,168	0,175
-3	0,167	0,174	0,181
-2	0,171	0,179	0,186
-1	0,175	0,183	0,191
A	0,179	0,186	0,194
	0,181	0,188	0,196
	0,182	0,189	0,198
	0,183	0,190	0,198
D	0,183	0,190	0,199
1	0,183	0,190	0,198
2	0,181	0,188	0,196
3	0,179	0,186	0,194
4	0,176	0,183	0,190
5	0,173	0,179	0,186

7	0,164	0,170	0,176
9	0,154	0,159	0,164
11	0,143	0,147	0,151
15	0,120	0,123	0,126
20	0,094	0,096	0,098
25	0,074	0,075	0,076
30	0,059	0,059	0,060

Tabela 7.3 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 4

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
F	0,318	0,337	0,358
2	0,314	0,333	0,354
4	0,310	0,329	0,349
6	0,305	0,323	0,343
8	0,300	0,318	0,337
10	0,295	0,312	0,330
12	0,289	0,305	0,323
14	0,283	0,298	0,316
16	0,276	0,291	0,308
18	0,269	0,284	0,300

Tabela 7.4 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 5, vão 28/29

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-2	0,293	0,309	0,327
-1	0,297	0,313	0,331
H	0,298	0,315	0,334
	0,298	0,315	0,334
	0,296	0,313	0,332
	0,293	0,310	0,328
G	0,288	0,305	0,323
1	0,280	0,297	0,314
2	0,271	0,287	0,304
3	0,261	0,276	0,292
4	0,250	0,263	0,278
5	0,237	0,250	0,264
7	0,213	0,223	0,234
9	0,188	0,196	0,205
11	0,165	0,171	0,179
15	0,126	0,130	0,134
20	0,091	0,093	0,096
25	0,067	0,069	0,070
30	0,052	0,053	0,053

Nas Figuras Figura 7.9, Figura 7.10, Figura 7.11 e Figura 7.12 mostra-se a adequação dos valores obtidos por simulação face aos valores medidos para os perfis 1, 2, 4 e 5. Os valores medidos podem ser consultados no Anexo F.

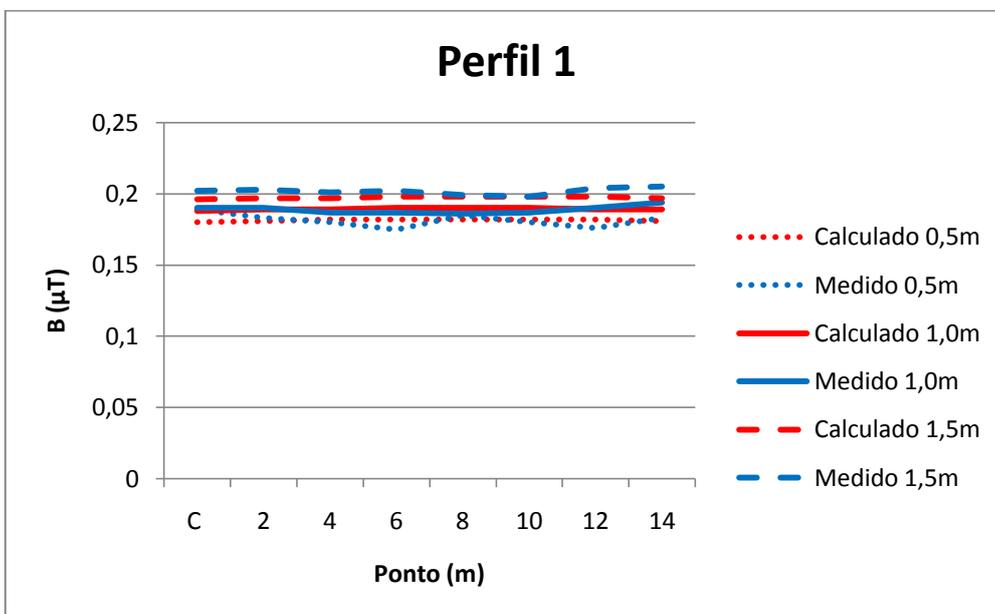


Figura 7.9 – Campo magnético ao longo do perfil 1 do vão 27/28, valores medidos e simulados

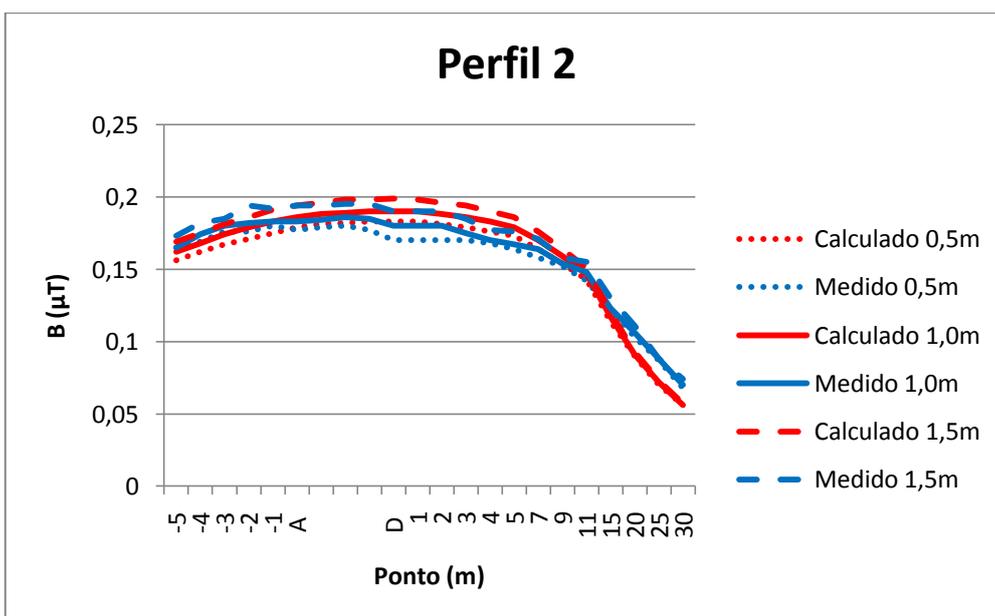


Figura 7.10 – Campo magnético ao longo do perfil 2 do vão 27/28, valores medidos e simulados

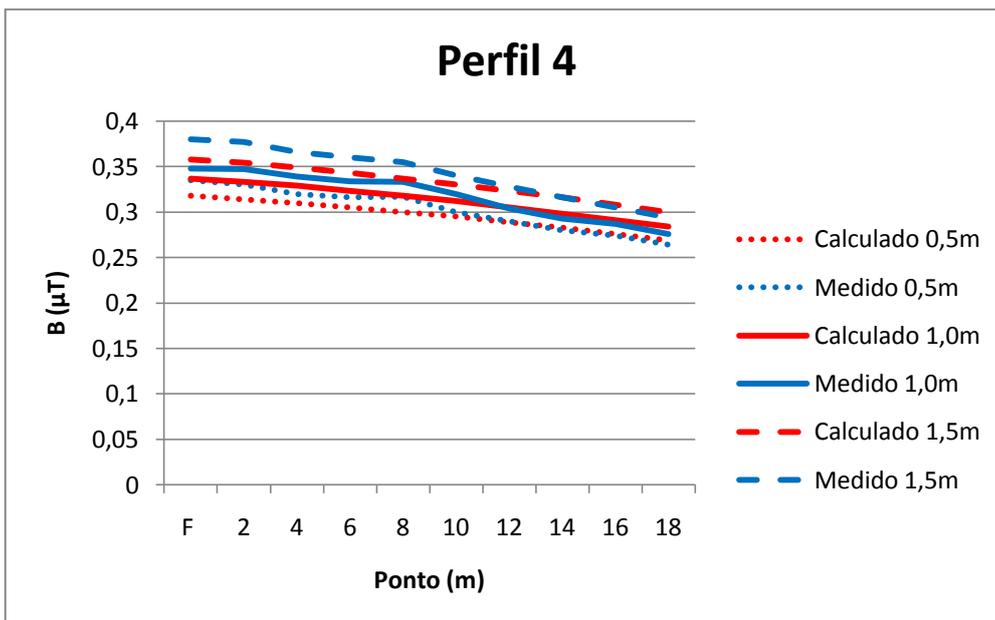


Figura 7.11 – Campo magnético ao longo do perfil 4 do vão 28/29, valores medidos e simulados

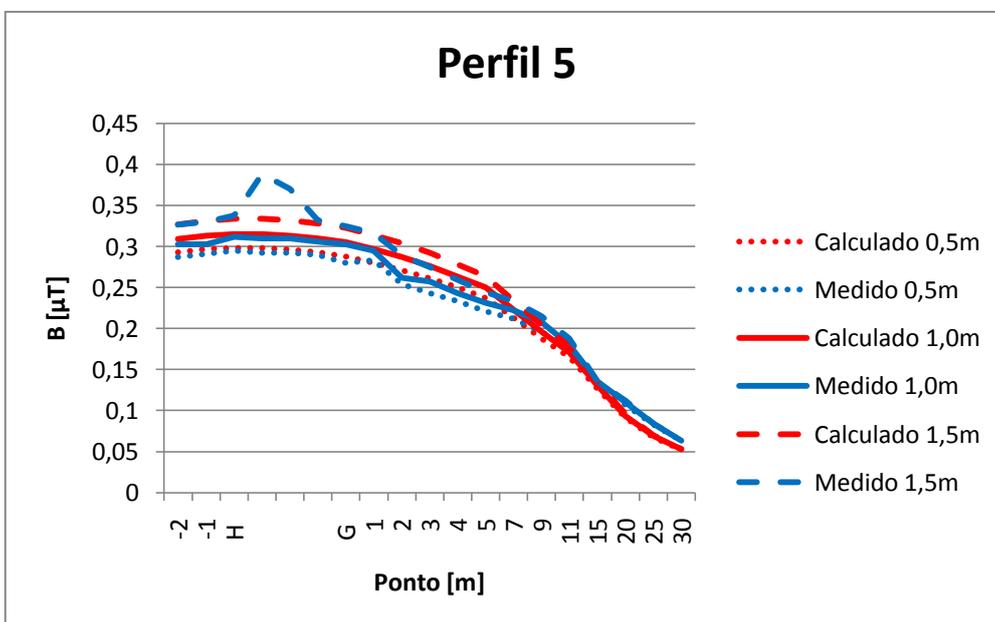


Figura 7.12 – Campo magnético ao longo do perfil 5 do vão 28/29, valores medidos e simulados

Na Tabela 7.5 estão listados os erros médios e máximos entre os valores medidos e os valores calculados para os 4 perfis de medida listados anteriormente. Os erros são calculados com os valores médios espaciais a 1.0m (média dos valores a 0.5m, 1.0m e 1.5m).

Tabela 7.5 – Erros entre os valores medidos e calculados para os perfis 1, 2, 4 e 5

Perfil	Erro Médio		Erro Máximo	
	[μ T]	[%]	[μ T]	[%]
1	0.002	1.1	0.006	2.9
2	0.007	4.7	0.013	16.0
4	0.010	2.9	0.017	5.0
5	0.009	5.5	0.019	17.9

Analisando todas as figuras, verifica-se não existir discrepâncias sistemáticas susceptíveis de invalidar a modelação.

Analisando a Tabela 7.5 verifica-se que para os perfis transversais 2 e 5 têm-se erros máximos relativos assinaláveis, contudo, dado os baixos erros médios relativos, os máximos são considerados pontuais e como tal pouco importantes. Para além disso os valores absolutos desses erros são também mínimos.

Assim sendo, considerando ainda a hipótese de existência de erros inerentes ao processo de medida, pode-se afirmar que este modelo de ambos os vãos representa de forma real a linha de 60kV simples L6112.

No seguimento ilustra-se as linhas de campo obtidas nas simulações a 1.0m de altura com o modelo final calibrado.

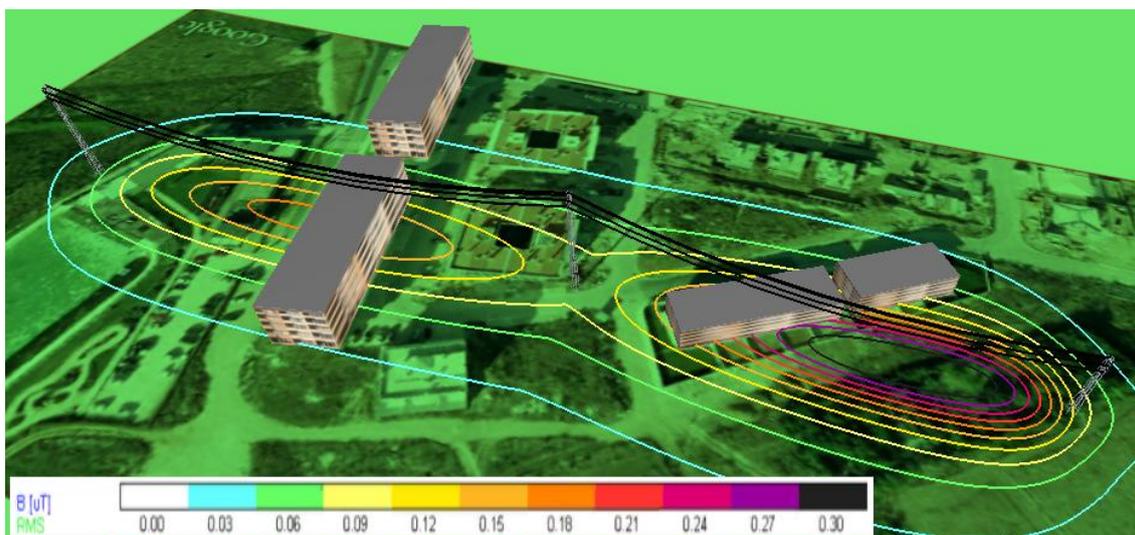


Figura 7.13 – Linhas de campo magnético a 1.0m, imagem 3D

7.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada

Para esta linha L6112 os locais próximos da linha de exposição prolongada são o prédio que se encontra sob o vão 27/28 e a moradia que se encontra sob o vão 28/29.



Figura 7.14 – Identificação dos novos perfis localizados nas moradias mais próximas

Na Figura 7.14 identificam-se os seis novos perfis criados, três no prédio do vão 27/28 e outros três nas moradias do vão 28/29. O prédio dos perfis 6, 7 e 8 foi modelado com uma altura de 14.0m (4 pisos) e as moradias dos perfis 9, 10 e 11 foram modeladas com uma altura de 7.0m (2 pisos).

Nesta fase as simulações foram realizadas ao nível de 3 pisos, às alturas de 0.5m, 1.0m, 1.5m, 3.5m, 4.0m, 4.5m, 9.5m, 10.0m, 10.5m e ainda nas faces da habitação. Indo de encontro ao que a norma CEI 62110 (2008) defende, fez-se uma média espacial em torno de 1.0m, 4.0m e 10.0m.

Tal como foi explicado no Capítulo 3, nesta fase as simulações são realizadas com o valor médio diário da corrente. Esse valor é de aproximadamente 90A e foi calculado a partir do diagrama de carga do dia das medidas que se encontra no Anexo F.

Assim, com a corrente eléctrica de 90A e mantendo todas as outras configurações do modelo calibrado obtêm-se para os perfis 6 do vão 27/28 e 11 do vão 28/29 os valores de campo magnético listados nas Tabelas Tabela 7.6 e Tabela 7.7.

Optou-se por apresentar estes perfis 6 e 11 por serem, em cada um dos vãos, os que apresentam valores mais elevados de campo magnético e desse modo representam a pior situação para os valores médios de carga.

Tabela 7.6 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 6 com a corrente média diária 90A

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	9,5 m	10,0 m	10,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 10,0 m
J	0,106	0,109	0,113	0,186	0,192	0,198	0,242	0,109	0,192
3	0,119	0,123	0,127	0,233	0,242	0,252	0,329	0,123	0,242
9	0,142	0,148	0,154	0,358	0,381	0,407	0,676	0,148	0,382
15	0,151	0,158	0,165	0,442	0,480	0,523	1,094	0,158	0,482
21	0,139	0,145	0,152	0,366	0,392	0,421	0,742	0,145	0,393
27	0,113	0,117	0,122	0,231	0,242	0,253	0,341	0,117	0,242
33	0,086	0,089	0,091	0,141	0,145	0,149	0,175	0,089	0,145
39	0,065	0,066	0,067	0,090	0,092	0,093	0,102	0,066	0,092
45	0,049	0,049	0,050	0,061	0,062	0,063	0,066	0,049	0,062
51	0,037	0,038	0,038	0,044	0,044	0,045	0,046	0,038	0,044

Tabela 7.7 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 11 com a corrente média diária 90A

Ponto [m]	B [μ T]								
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	3,5 m	4,0 m	4,5 m	face da hab.	Média a 1,0 m	Média a 4,0 m
M	0,126	0,131	0,136	0,161	0,168	0,176	0,223	0,131	0,168
3	0,138	0,144	0,151	0,181	0,190	0,199	0,259	0,144	0,190
6	0,151	0,158	0,166	0,202	0,213	0,224	0,300	0,158	0,213
9	0,165	0,173	0,181	0,224	0,236	0,251	0,344	0,173	0,237
12	0,177	0,186	0,196	0,245	0,260	0,276	0,389	0,186	0,260
15	0,188	0,198	0,209	0,264	0,281	0,299	0,429	0,198	0,281
18	0,197	0,208	0,220	0,278	0,297	0,317	0,458	0,208	0,297
21	0,204	0,215	0,227	0,288	0,307	0,328	0,473	0,215	0,308
24	0,206	0,217	0,229	0,289	0,308	0,328	0,467	0,217	0,308
27	0,205	0,216	0,227	0,284	0,301	0,320	0,445	0,216	0,302
30	0,200	0,210	0,221	0,273	0,288	0,305	0,412	0,210	0,289
33	0,193	0,202	0,211	0,257	0,270	0,284	0,371	0,202	0,270
36	0,183	0,191	0,199	0,238	0,249	0,261	0,329	0,191	0,249

Nas Figuras Figura 7.15 e Figura 7.16 está representado o campo magnético ao longo dos perfis 6 e 11 respectivamente.

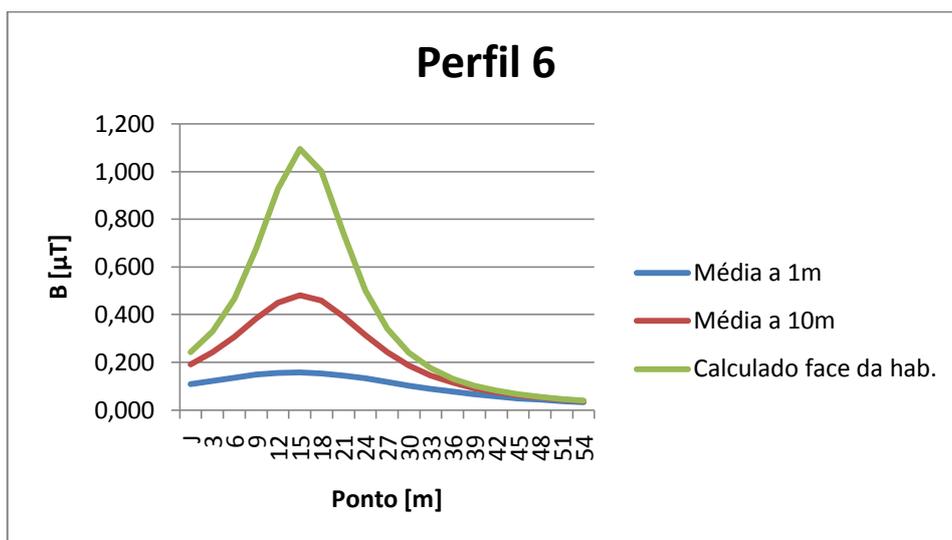


Figura 7.15 – Campo magnético ao longo do perfil 6 com a corrente média diária de 90A

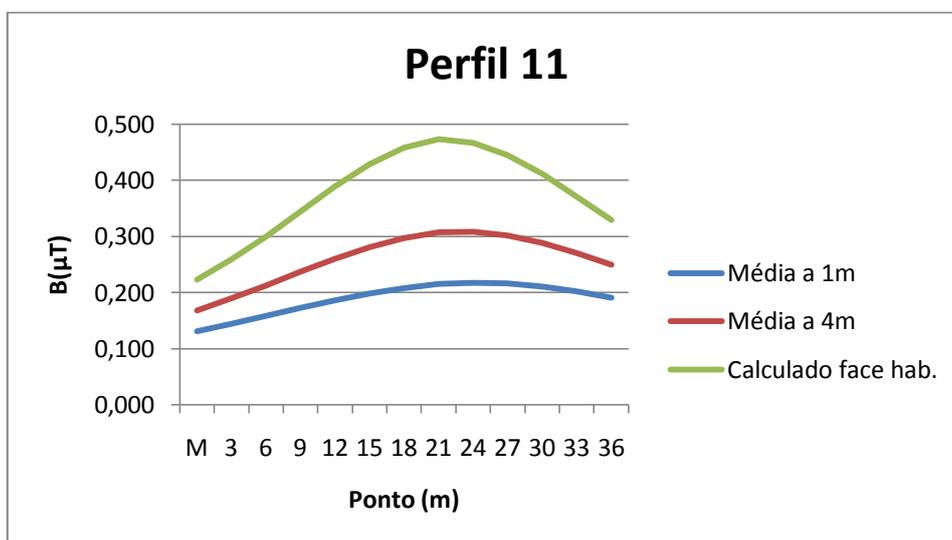


Figura 7.16 – Campo magnético ao longo do perfil 11 com a corrente média diária de 90A

Analisando os resultados verifica-se novamente que é à altura do topo da habitação e do piso mais elevado que se obtêm os valores de campo mais elevados. Para o vão 27/28 o valor máximo de campo obtido a 10m é de 0.482 μT para o ponto situado na projecção vertical do cabo de guarda da linha. Para o vão 28/29 o valor máximo de campo obtido a 4m é de 0.308 μT para dois pontos situados nas projecções verticais de 2 condutores da linha. A registar que em ambos os vãos se cumpre o limite de campo de 1 μT adoptados pela Suíça.

Nas Figuras que se seguem ilustram-se as linhas de campo magnético obtidas para estas simulações com a corrente média diária de 90A. Nessas imagens 3D representa-se os edifícios

só com as faces e com alguma transparência para se poder visualizar as linhas de campo no interior das mesmas.

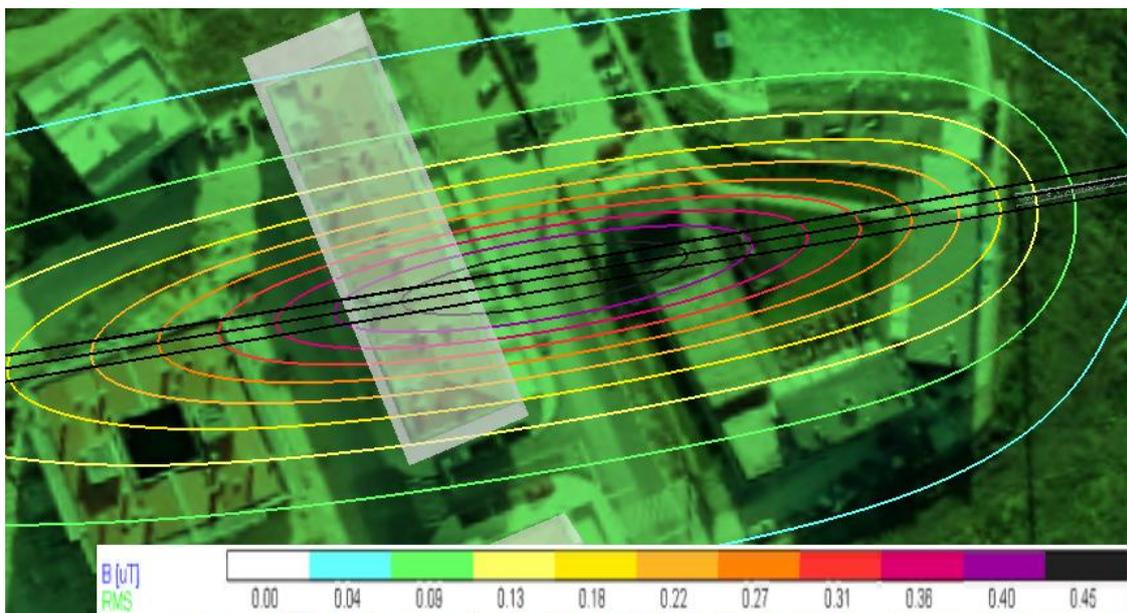


Figura 7.17 – Linhas de campo magnético a 10.0m sob vão 27/28 com corrente de 90A, imagem 3D

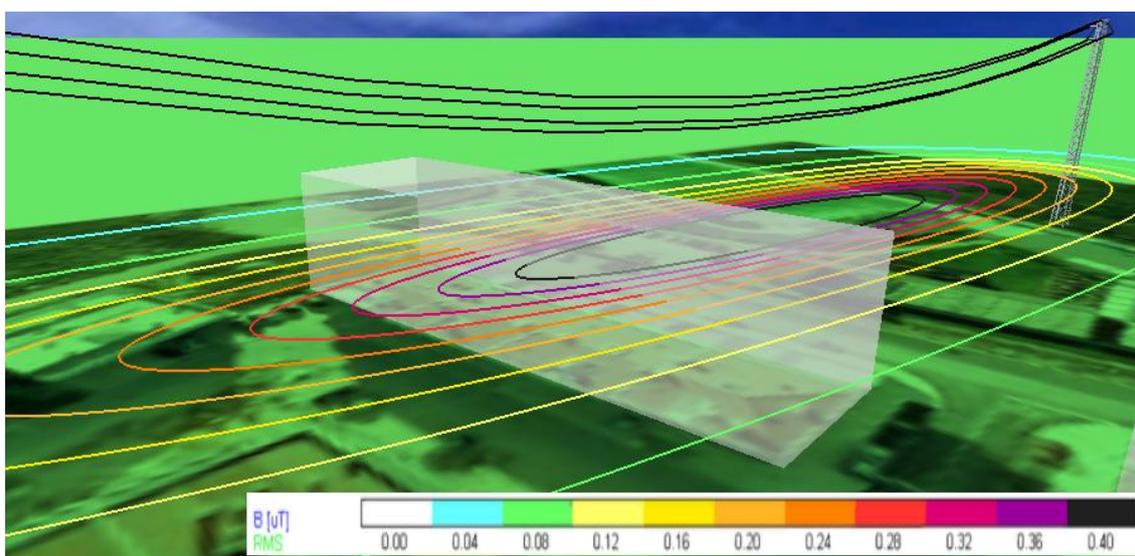


Figura 7.18 – Linhas de campo magnético a 10.0m sob vão 27/28 com corrente de 90A, imagem 3D

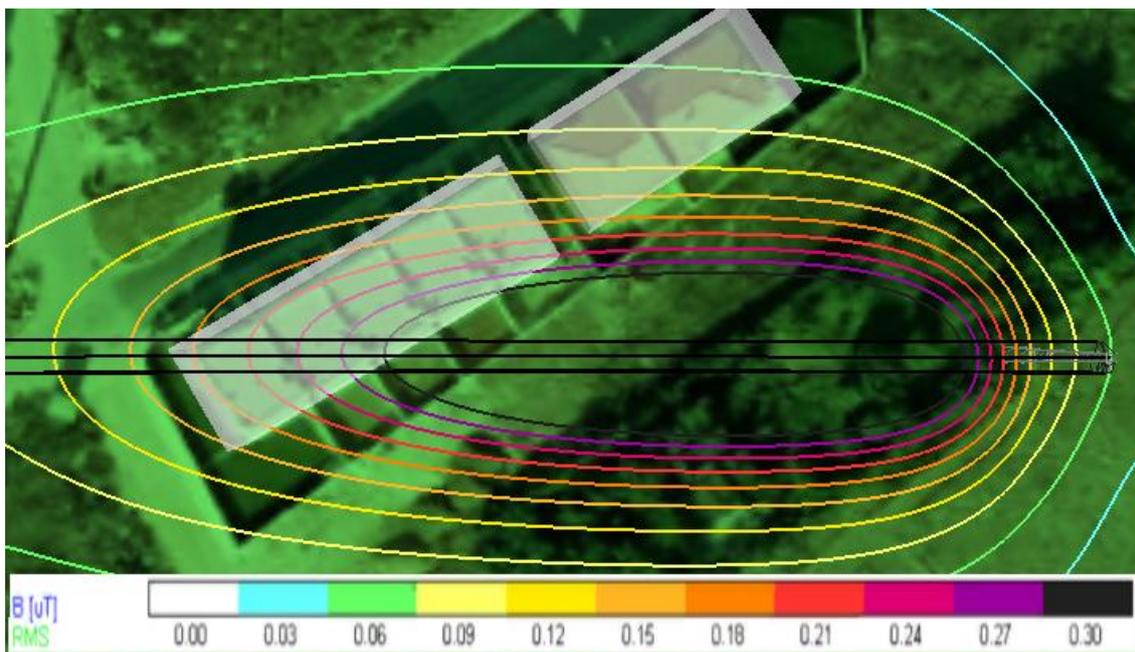


Figura 7.19 – Linhas de campo magnético a 4.0m sob vão 28/29 com corrente de 90A, imagem 3D

8 Linha de 60kV Dupla

Esta linha de 60kV dupla, formada pelas linhas L6124 e L6125, está situada numa zona de inserção urbana densa próxima de Linda-a-Velha. Utilizando as medidas realizadas (11), propôs-se modelar os dois vãos formados pelos apoios denominados por P50/52, P51/53 e P52/54. Como se verifica na Figura 8.1, na proximidade de ambos os vãos estão situados edifícios habitacionais. Estes edifícios (prédios) são os locais próximos de exposição prolongada para os quais é realizada a extrapolação dos campos magnéticos.

8.1 Modelação / Calibração

Utilizando imagens aéreas do local, retiradas de um website (12), os apoios são posicionados nos devidos locais. As distâncias entre os apoios P50/52, P51/53 e P52/54 são de aproximadamente 155m e 270m respectivamente.



Figura 8.1 – Posicionamento dos apoios da linha L6124/L6125

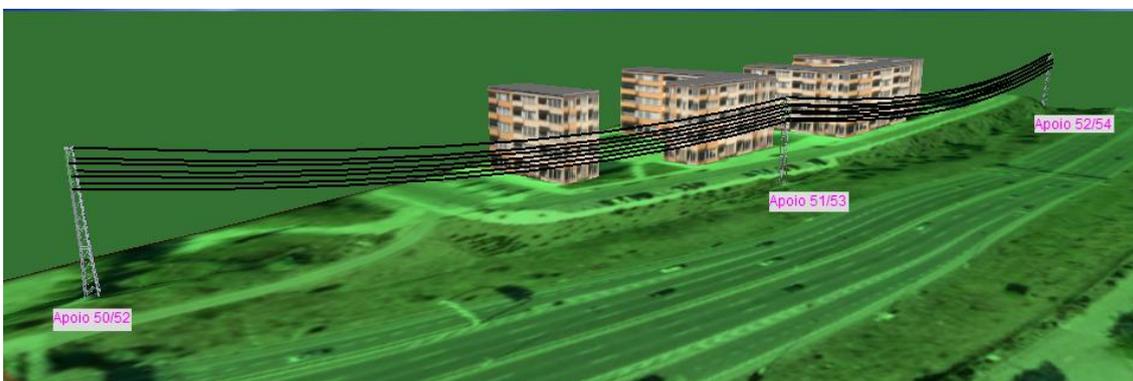


Figura 8.2 – Posicionamento dos apoios da linha L6124/L6125 em formato 3D



Figura 8.3 – Fotografias do vão P50/52 – P51/53 sob o qual foram realizadas as medidas



Figura 8.4 – Fotografias do vão P51/53 – P52/54 sob o qual foram realizadas as medidas

As configurações físicas que se definiram para os apoios foram as seguintes.

Apoio 50/52:

- Altura total – 26m
- Altura útil – 23.8m
- Configuração em esteira vertical dupla com um cabo de guarda, Figura 8.5
 - Travessas com um comprimento de 4m posicionadas a alturas de 21.3m, 19.3m e 17.3m
 - Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 23.8m de altura
 - Fases 1, 2 e 3 posicionadas por esta ordem desde a travessa mais alta até à mais baixa
- Base do apoio com um ângulo de 60° com eixo x devido ao posicionamento dos apoios adjacentes.

Apoio 51/53:

- Altura total – 26m

- Altura útil – 23.8m
- Configuração em esteira vertical dupla com um cabo de guarda, Figura 8.5
 - Travessas com um comprimento de 3m posicionadas a alturas de 21.3m, 19.3m e 17.3m
 - Cabo de guarda posicionado no topo do apoio a 23.8m de altura
 - Fases 1, 2 e 3 posicionadas por esta ordem desde a travessa mais alta até à mais baixa
- Base do apoio com um ângulo de 65° com eixo x devido ao posicionamento dos outros apoios.

Apoio 52/54:

- Altura total – 34m
- Altura útil – 31.4m
- Configuração em esteira vertical dupla com um cabo de guarda, Figura 8.5
 - Travessas com um comprimento de 3m posicionadas a alturas de 29.4m, 27.4m e 25.4m
 - Cabo guarda posicionado no topo do apoio a 31.4m
 - Fases 1, 2 e 3 posicionadas por esta ordem desde a travessa mais alta até à mais baixa
- Base do apoio com um ângulo de 70° com o eixo x devido ao posicionamento dos apoios adjacentes.

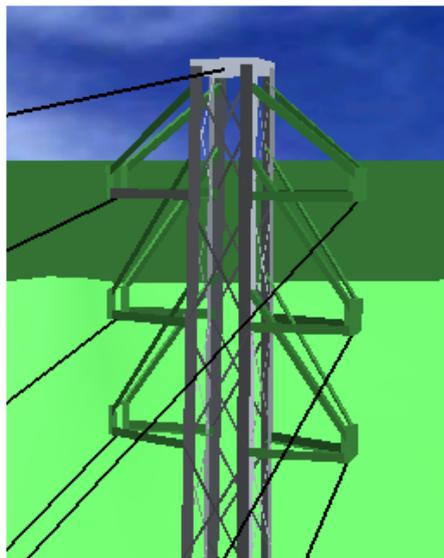


Figura 8.5 – Configuração em esteira vertical dupla com cabo de guarda

Chegou-se a estes valores através do cruzamento da informação cedida pela EDP com os valores tabelados no Anexo B retirados de (14).

Apesar de a altura total dos apoios ser diferente, o tipo de configuração é igual para todos os apoios. Desse modo só se ilustra uma única figura com essa configuração, Figura 8.5.

As medidas realizadas, e como tal, a calibração do modelo foram efectuadas segundo quatro perfis, dois sob o vão P50/52 – P51/53 e outros dois sob o vão P51/53 – P52/54. Nas Figuras Figura 8.6 e Figura 8.7 estão identificados os perfis de cada um dos vãos.



Figura 8.6 – Identificação dos perfis de medição do vão P50/52 – P51/53, relatório das medidas (11) à esquerda e software EFC-400 à direita

No vão P50/52 – P51/53, Figura 8.6, o perfil 1 é longitudinal à linha e contém o ponto A. O perfil 2 é transversal à linha e passa pelos pontos A, B e C. Os pontos B e C estão situados na projecção vertical dos condutores inferiores da linha nos pontos onde a altura desses condutores é menor. O ponto A e o perfil 1 estão afastados de cerca de 4m da projecção vertical da linha de modo a evitar obstáculos que impossibilitassem as medidas.



Figura 8.7 – Identificação dos perfis de medição do vão P51/53 – P52/54, relatório das medidas (11) à esquerda e software EFC-400 à direita

No vão P51/53 – P52/54, Figura 8.7, também se tem um perfil longitudinal à linha a uma distância da mesma de 4m, e um perfil transversal à linha que se inicia no ponto onde a altura do condutor inferior da linha é menor. O perfil longitudinal foi nomeado perfil 3 e contém o ponto D. O perfil transversal foi nomeado perfil 4 e inicia-se no ponto E. A forma de determinação destes perfis foi igual à realizada para o outro vão P50/52 – P51/53.

Quanto à catenária, para o vão P50/52 – P51/53 tem-se o condutor inferior a passar a uma altura de 15.6m no ponto B do perfil 2 que corresponde a uma altura de 15m no ponto médio entre apoios e uma flecha de aproximadamente 2.8m. Esta altura de 15.6m no ponto B do modelo final resulta numa diferença na ordem dos 15% em relação ao medido no local. Contudo essa diferença é atenuada com o perfil de solo modelado, especificado mais à frente. Todos os condutores têm catenárias semelhantes, no entanto, devido ao perfil de solo, optou-se por colocar os condutores da linha L6124 0.3m mais elevados que os da linha L6125.

Para o P51/53 – P52/54 tem-se o condutor inferior a passar a uma altura de 9.2m no ponto E que corresponde a uma altura de 9.5m no ponto médio entre apoios e uma flecha de 12.3m. Esta altura de 9.2m no ponto E do modelo final resulta numa diferença na ordem dos 1% em relação ao medido no local.

Nas Figuras Figura 8.8 e Figura 8.9 estão representadas as catenárias do condutor inferior para ambos os vãos. Realçar no entanto, que o software EFC-400 nestas imagens não considera a variação da altura do solo e desse modo as catenárias reais sofrem alterações.

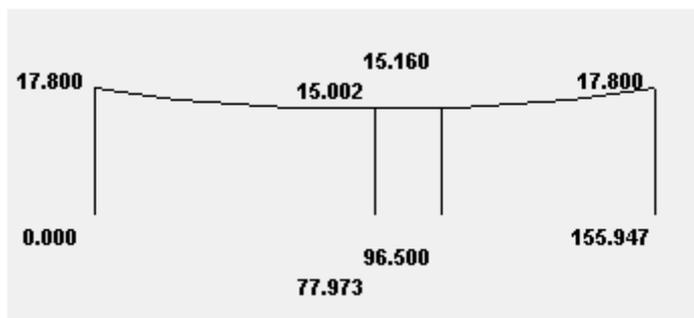


Figura 8.8 – Catenária do condutor inferior no vão P50/52 – P51/53, valores em metros [m]

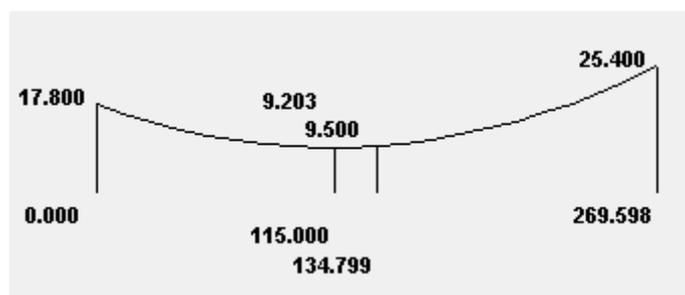


Figura 8.9 – Catenária do condutor inferior no vão P51/53 – P52/54, valores em metros [m]

Em relação ao terreno, a acentuada inclinação na zona do posicionamento dos postes mencionada no relatório das medidas (11) e visível nas Figuras Figura 8.3 e Figura 8.4, conduziu à criação de um perfil de solo que reflecta essa inclinação. O perfil de solo criado, já referido anteriormente, impõe uma inclinação próxima dos 15% na zona exterior do vão P50/52 – P51/53 e

próxima dos 50% na zona exterior do vão P51/53 – P52/54. De notar que para ambos os vãos, no passeio e resto da rua o solo já se mantém sempre ao mesmo nível.

Nas figuras Figura 8.10 e Figura 8.11 ilustra-se as inclinações impostas pelo perfil de solo modelado.



Figura 8.10 – Imagem 3D da zona exterior do vão P50/52 – P51/53 com a inclinação



Figura 8.11 – Imagem 3D da zona exterior do vão P51/53 – P52/54 com a inclinação

Quanto às configurações de sistema tem-se uma tensão de 60kV para ambas as linhas e conforme se esteja a simular o perfil 1, 2 ou 3 impôs-se, em ambas as linhas, uma corrente eléctrica de 390A, 420A ou 430A respectivamente. Para simulação do perfil 4 também se impõe

uma corrente eléctrica de 430A. Realiza-se esta diferenciação de valores de corrente eléctrica conforme o perfil simulado porque as medidas foram realizadas em horas e dias diferentes, ou seja, as medidas foram realizadas com cargas de funcionamento diferentes.

O diagrama de carga dos dias das medidas, tal como outro tipo de informações adicionais associadas a esta linha, pode ser consultado no Anexo G.

Assim, com todas estas configurações atrás especificadas obtêm-se, para os perfis 1 e 2 do vão P50/52 – P51/53 e 3 e 4 do vão P51/53 – P52/54, os valores de campo magnético listados nas Tabelas Tabela 8.1, Tabela 8.2, Tabela 8.3 e Tabela 8.4.

Em todas estas tabelas, os pontos estão assinalados pela distância em metros [m] ao ponto nomeado mais próximo. Por exemplo, na Tabela 8.4, os pontos estão assinalados pela sua distância em relação ao ponto E.

Tabela 8.1 – Campo magnético ao longo do perfil 1, com 390A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-30	2,271	2,370	2,478
-28	2,286	2,387	2,496
-26	2,300	2,401	2,511
-24	2,312	2,414	2,525
-22	2,321	2,425	2,537
-20	2,330	2,434	2,547
-18	2,337	2,441	2,555
-16	2,345	2,450	2,564
-14	2,350	2,455	2,570
-12	2,351	2,457	2,571
-10	2,353	2,458	2,573
-8	2,354	2,459	2,574
-6	2,353	2,458	2,573
-4	2,350	2,456	2,571
-2	2,344	2,449	2,564
A	2,338	2,443	2,557
2	2,331	2,435	2,548
4	2,324	2,427	2,540
6	2,314	2,417	2,528
8	2,303	2,405	2,516
10	2,290	2,391	2,500
12	2,276	2,375	2,484
14	2,261	2,359	2,466
16	2,244	2,342	2,447
18	2,229	2,325	2,429
20	2,210	2,305	2,408
22	2,191	2,284	2,385
24	2,172	2,264	2,363

26	2,152	2,242	2,340
28	2,131	2,219	2,316
30	2,107	2,194	2,288

Tabela 8.2 – Campo magnético ao longo do perfil 2, com 420A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-3	2,315	2,413	2,520
-2	2,411	2,516	2,632
-1	2,505	2,618	2,741
C	2,605	2,727	2,860
	2,673	2,800	2,940
	2,718	2,849	2,992
	2,719	2,849	2,993
B	2,700	2,829	2,970
1	2,680	2,807	2,946
2	2,658	2,783	2,920
3	2,612	2,733	2,865
4	2,547	2,662	2,787
5	2,462	2,570	2,687
7	2,302	2,397	2,499
9	2,067	2,144	2,226
11	1,760	1,818	1,878
15	1,245	1,276	1,308
20	0,822	0,837	0,852
25	0,563	0,571	0,579
30	0,402	0,407	0,411

Tabela 8.3 – Campo magnético ao longo do perfil 3, com 430A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-20	4,821	5,145	5,507
-15	4,932	5,268	5,643
-10	5,010	5,354	5,738
-5	5,072	5,422	5,813
D	5,129	5,485	5,883
5	5,168	5,527	5,929
10	5,210	5,574	5,981
15	5,209	5,572	5,978

Tabela 8.4 – Campo magnético ao longo do perfil 4, com 430A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
E	6,082	6,580	7,152
1	5,905	6,371	6,901
2	5,546	5,959	6,424

3	5,129	5,485	5,883
4	4,687	4,988	5,320
5	4,230	4,478	4,749
7	3,404	3,571	3,748
9	2,694	2,803	2,917
11	2,144	2,216	2,290
13	1,709	1,757	1,806

Nas Figuras Figura 8.12, Figura 8.13, Figura 8.14 e Figura 8.15 mostra-se a adequação dos valores obtidos por simulação face aos valores medidos, para todos os perfis. Os valores medidos podem ser consultados no Anexo G.

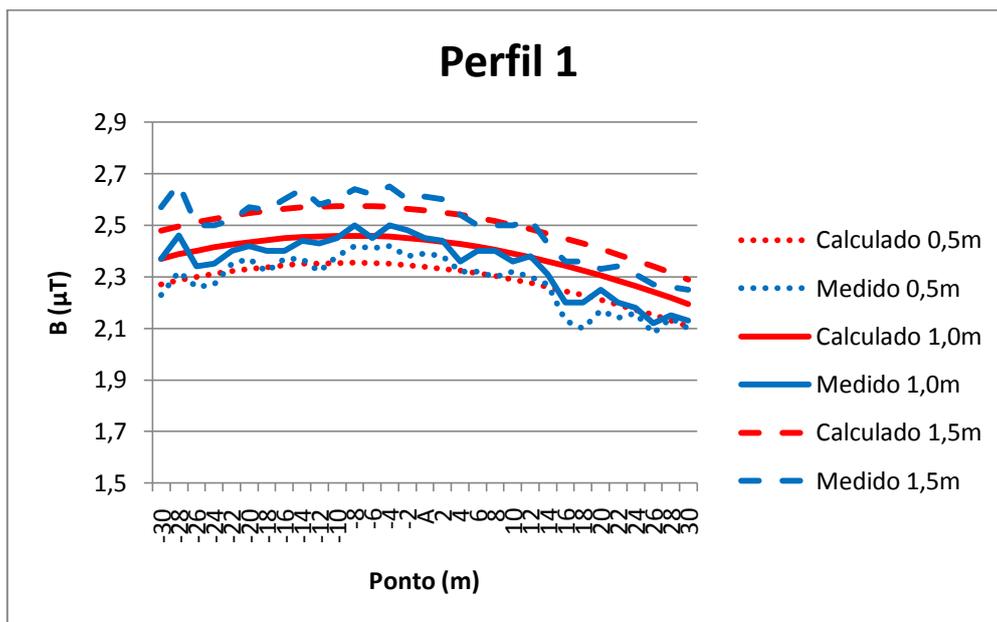


Figura 8.12 – Campo magnético ao longo do perfil 1 com 390A em ambas as linhas, valores medidos e simulados

Analisando a Figura 8.13, verifica-se que no perfil 2, a partir da distância de 15m do ponto B a discrepância entre os valores medidos e calculados tende a aumentar. A partir dessa distância o valor calculado continua a decair normalmente enquanto o valor medido tem uma diminuição substancial na relação de queda.

Para valores desta intensidade, esta situação nos valores medidos só é possível de acontecer se existir na proximidade uma outra fonte de campo magnético. Dada a localização desses pontos sobre o passeio, ver Figura 8.6, pensou-se então na possibilidade de cabos BT subterrâneos ou mesmo um PT no prédio mais próximo.

Informação obtida posteriormente, ver o Anexo G, confirma a existência de um cabo BT ao longo do passeio a aproximadamente 0.8m de profundidade com uma carga de 5A. Este cabo é então perfeitamente justificativo da diferença na ordem dos 0.3 μT registada.

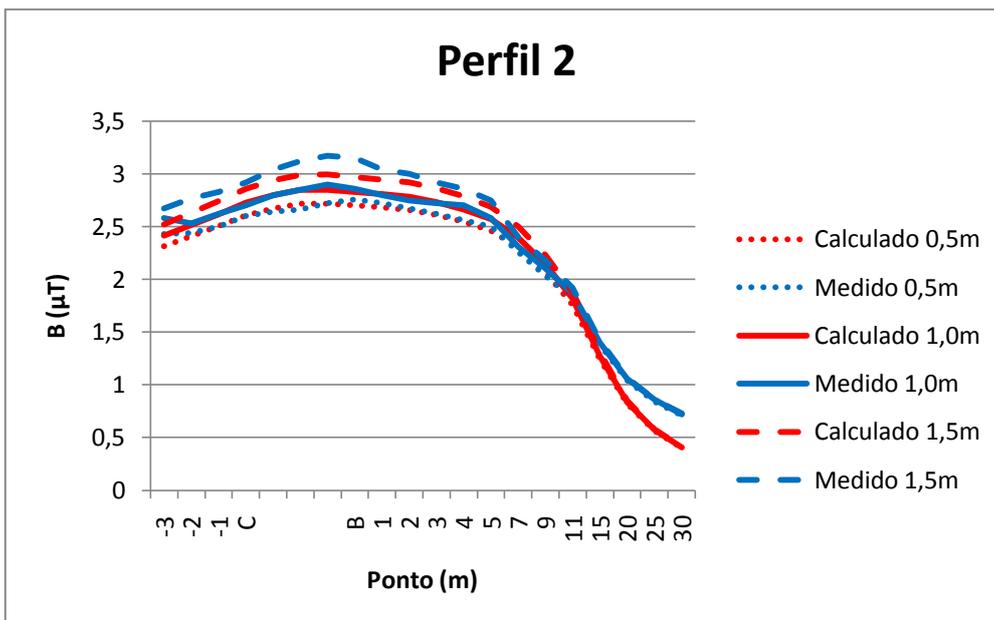


Figura 8.13 – Campo magnético ao longo do perfil 2 com 420A em ambas as linhas, valores medidos e simulados

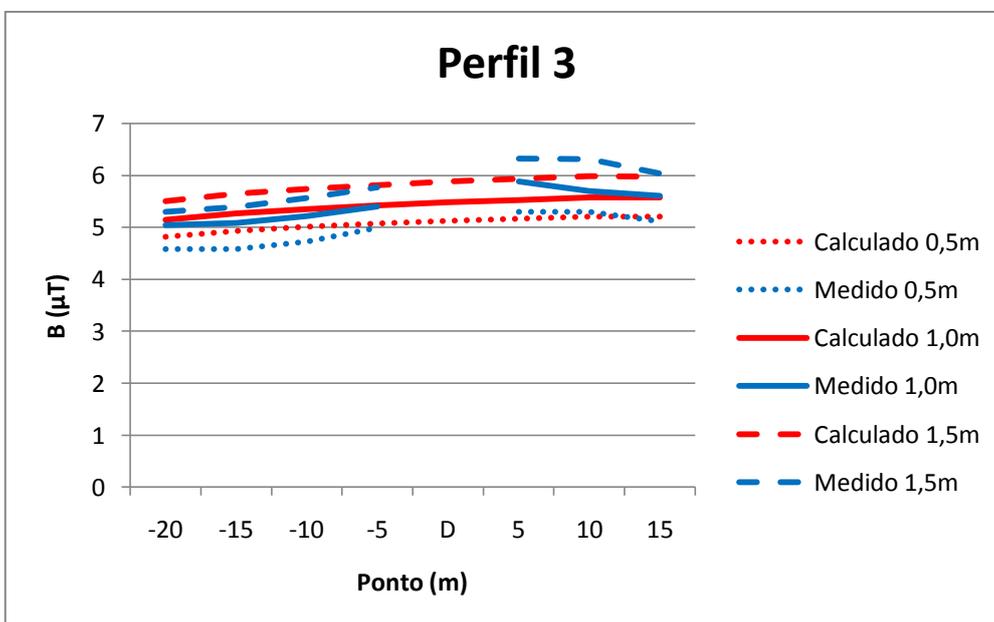


Figura 8.14 – Campo magnético ao longo do perfil 3 com 430A em ambas as linhas, valores medidos e simulados

Esta teoria de influência do cabo BT nos valores de campo magnético medidos sobre o passeio é então confirmada com a análise dos resultados para o perfil 4. Analisando a Figura 8.15 onde se ilustra os valores de campo magnético medidos e calculados segundo o perfil 4, também aqui se verifica que nos pontos mais afastados da linha, pontos sobre o passeio – ver Figura 8.7 – o campo magnético medido é substancialmente superior, segundo a mesma ordem de valores, ao campo magnético calculado.

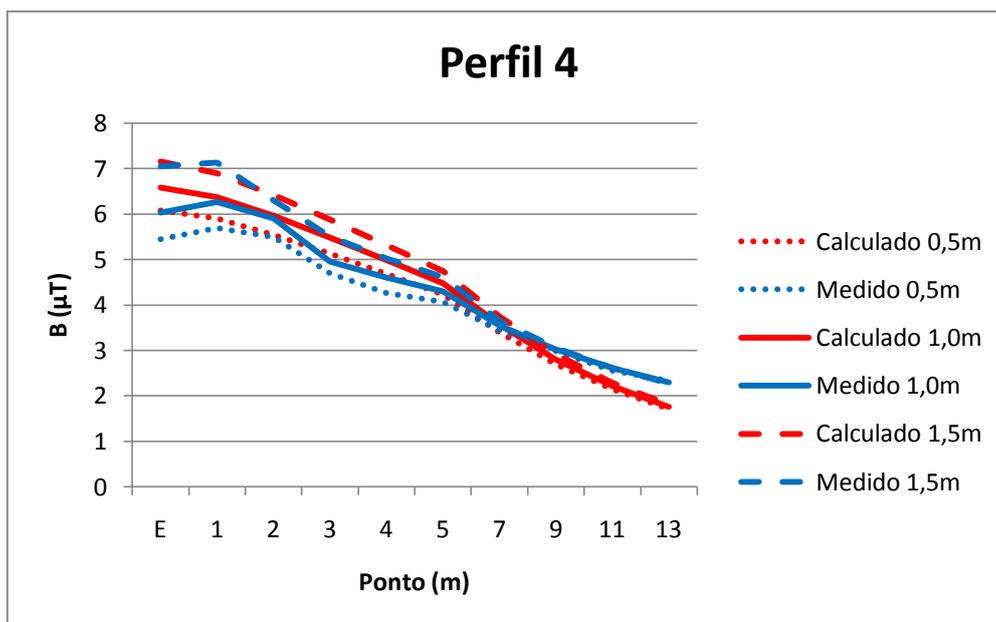


Figura 8.15 – Campo magnético ao longo do perfil 4 com 430A em ambas as linhas, valores medidos e simulados

Relativamente aos perfis longitudinais à linha, Figuras Figura 8.12 e Figura 8.14, nada há a assinalar, os valores calculados são bastante semelhantes aos medidos

Na Tabela 8.5 são então tabelados os erros médios e máximos entre os valores medidos e os valores calculados. Estes erros são calculados com os valores médios espaciais a 1.0m.

Tabela 8.5 – Erros entre os valores medidos e calculados para os vários perfis

Perfil	Erro Médio		Erro Máximo	
	[μ T]	[%]	[μ T]	[%]
1	0.038	1.7	0.114	5.1
2	0.086	6.8	0.313	43.5
3	0.167	3.1	0.292	5.3
4	0.268	7.5	0.543	23.6

Exceptuando os pontos que se encontram sob influência dos cabos BT os erros obtidos são bastante pequenos. Como tal considera-se que o modelo criado representa de forma real a linha de 60kV dupla L6124/L6125.

No seguimento ilustra-se as linhas de campo obtidas nas simulações a 1.0m de altura com o modelo que se descreveu.

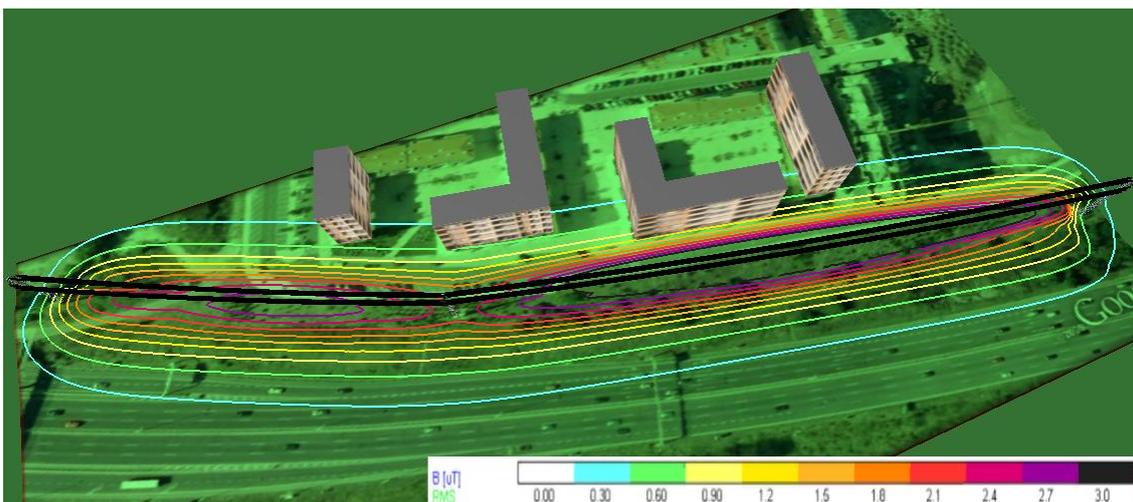


Figura 8.16 – Linhas de campo magnético a 1.0m com 430A em ambas as linhas, imagem 3D

8.2 Extrapolação para locais de exposição prolongada

Nesta linha dupla L6124/L6125 os locais próximos da linha de exposição prolongada são os edifícios (prédios) ao longo da linha do lado de L6125.

Na Figura 8.17, identificam-se os oito novos perfis criados no interior dos prédios escolhidos para se realizar a extrapolação.



Figura 8.17 – Identificação dos novos perfis localizados nos prédios mais próximos

Todos os prédios foram modelados como tendo sete pisos, ou seja, com uma altura de 24.5m.

Nesta fase as simulações foram realizadas ao nível de 3 desses sete pisos e nas faces da habitação. Os pisos seleccionados são os pisos 0, 2 e 6 e dessa forma as simulações foram

realizadas a alturas de 0.5m, 1.0m, 1.5m, 9.5m, 10.0m, 10.5m, 19.0m, 19.5m e 20.0m. Indo de encontro ao que a norma CEI 62110 (2008) defende, fez-se então uma média espacial em torno de 1.0m, 10.0m e 19.5m.

Nesta fase, as simulações foram realizadas com o valor médio diário da corrente. Esse valor é então, para os dias das medidas, de aproximadamente 390A e foi calculado a partir do diagrama de carga do dia das medidas que se encontra no Anexo G.

Tabela 8.6 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 9 com a corrente média diária, 390A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]			
	Média a 1.0m	Média a 10.0m	Média a 19.5m	Face da hab.
1	1,160	1,365	1,087	0,839
4	1,159	1,353	1,070	0,825
8	1,157	1,340	1,053	0,811
12	1,153	1,326	1,037	0,799
16	1,150	1,315	1,023	0,788
20	1,147	1,303	1,009	0,777
24	1,142	1,290	0,996	0,767
28	1,137	1,277	0,984	0,758
32	1,131	1,265	0,973	0,750
36	1,126	1,255	0,963	0,743
40	1,118	1,242	0,953	0,736
44	1,112	1,230	0,944	0,730
48	1,104	1,219	0,936	0,725
52	1,097	1,210	0,929	0,720
56	1,089	1,198	0,922	0,716

Tabela 8.7 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 10 com a corrente média diária, 390A em ambas as linhas

Ponto [m]	B [μ T]			
	Média a 1.0m	Média a 10.0m	Média a 19.5m	Face da hab.
1	1,160	1,365	1,087	0,839
4	0,877	0,959	0,792	0,646
8	0,683	0,715	0,605	0,511
12	0,546	0,555	0,478	0,415
16	0,448	0,447	0,390	0,345
20	0,375	0,369	0,326	0,293
24	0,319	0,311	0,277	0,252
28	0,275	0,267	0,240	0,220
32	0,241	0,233	0,211	0,195
36	0,213	0,205	0,187	0,174
40	0,190	0,183	0,168	0,157

Desta forma, impondo-se o valor de 390A no modelo criado obtêm-se para os perfis 9 e 10 os valores listados nas Tabelas Tabela 8.6 e Tabela 8.7 respectivamente.

Optou-se por apresentar estes perfis 9 e 10 por serem os que apresentam valores mais elevados de campo magnético e, desse modo, representam a pior situação para os valores médios de carga.

Nas Figuras Figura 8.18 e Figura 8.19 está representado o campo magnético ao longo dos perfis 9 e 10 respectivamente.

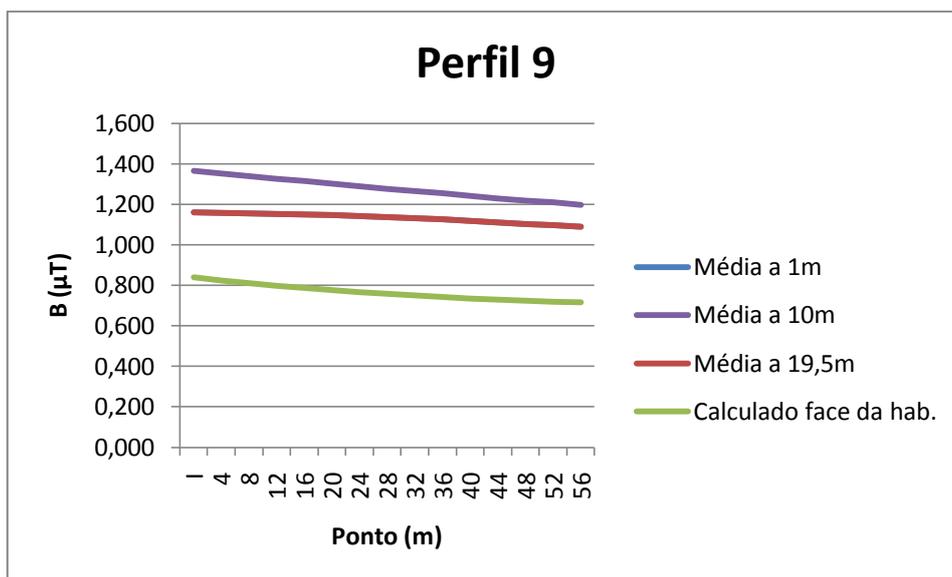


Figura 8.18 – Campo magnético ao longo do perfil 9 com a corrente média diária de 390A em ambas as linhas

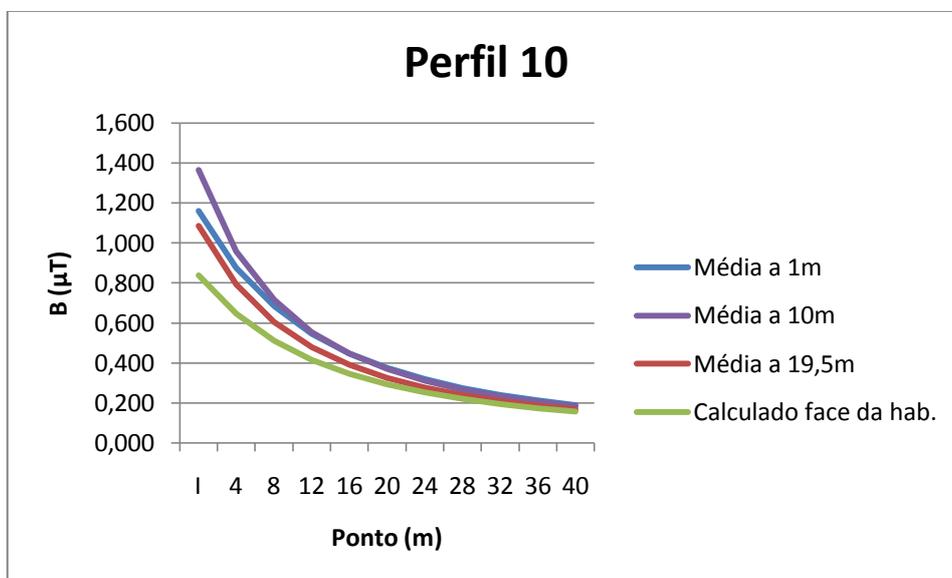


Figura 8.19 – Campo magnético ao longo do perfil 10 com a corrente média diária de 390A em ambas as linhas

Analisando os resultados verifica-se que os valores de campo mais elevados obtêm-se para a altura de 10m. Ao contrário das outras linhas, nesta o campo máximo não está localizado nos pisos mais elevados. Isto assim acontece porque, neste caso, o prédio é mais alto que linha. Desta forma, enquanto que para as outras linhas, os pisos superiores estavam mais próximos dos condutores, aqui, é neste piso à altura de 10m que se está mais próximo dos condutores.

Assim, para essa altura de 10m o valor máximo de campo obtido é de 1.365 μT no ponto I dos perfis 9 e 10. Desta forma, se Portugal vier a adoptar os limites mais restritivos que a Suíça adoptou, 1 μT , parte deste prédio não cumprirá os mesmos.

Nas figuras que se seguem ilustra-se as linhas de campo magnético obtidas para estas simulações a 10.0m com a corrente média diária de 390A em ambas as linhas. Nessas imagens 3D representa-se os edifícios só com as faces e com alguma transparência para se poder visualizar as linhas de campo no interior das mesmas.

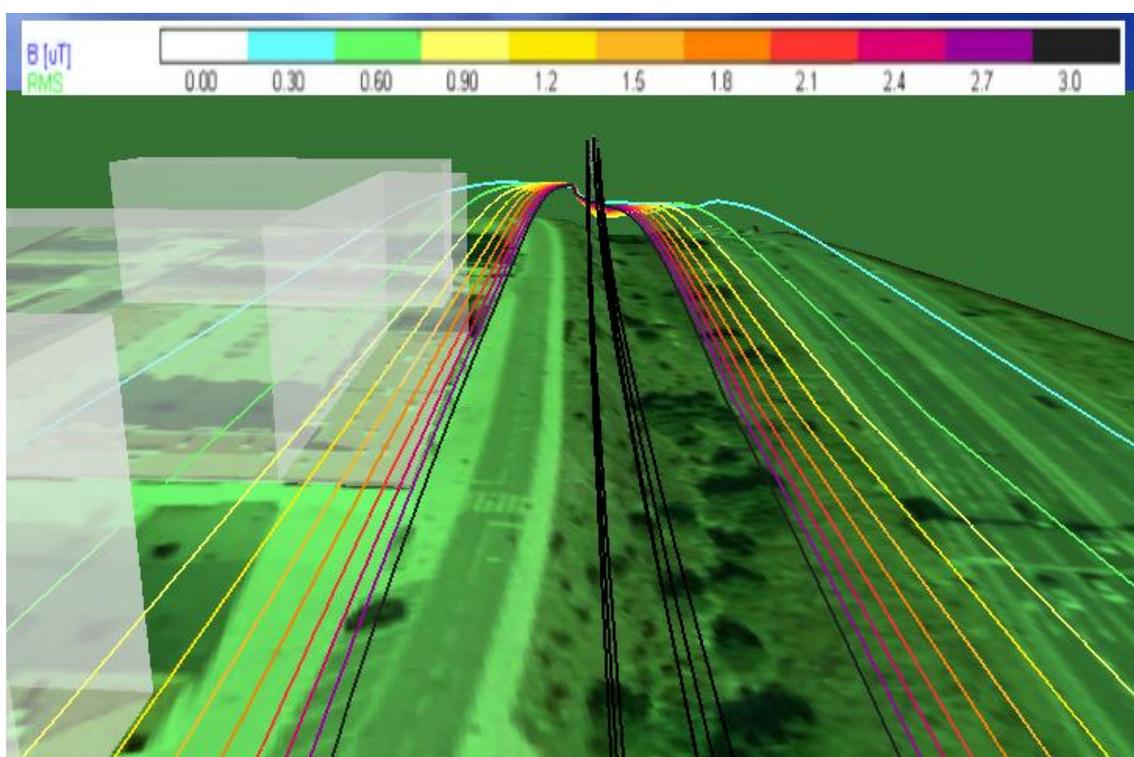


Figura 8.20 – Linhas de campo a 10.0m com corrente média diária de 390A em ambas as linhas, zoom no prédio mais próximo

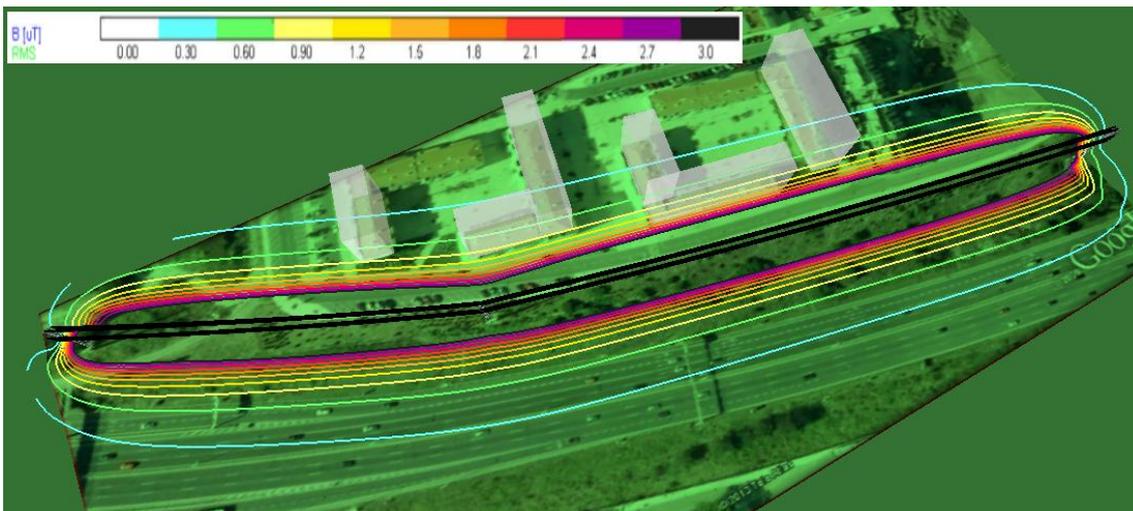


Figura 8.21 – Linhas de campo magnético a 10.0m com corrente média diária de 390A em ambas as linhas, imagem 3D

9 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O objectivo do presente trabalho traduziu-se na criação de modelos tridimensionais de algumas linhas aéreas de distribuição tipo e posterior extrapolação dos campos magnéticos gerados, por essas mesmas linhas, para zonas de exposição prolongada. O trabalho foi realizado no âmbito dos possíveis efeitos crónicos dos campos magnéticos, isto é, os efeitos da exposição prolongada aos campos, tão badalados ao longo das últimas décadas.

Neste estudo fez-se recurso a medidas de campo realizadas na proximidade das linhas reais, segundo algumas das mais recentes normas internacionais, as quais permitiram a validação dos modelos criados e assim a validação dos resultados obtidos. Fez-se também uso de um software especializado de cálculo de campos magnéticos, o EFC-400 da empresa Narda, certificado por algumas normas internacionais.

Para cada uma das linhas, o estudo foi dividido em dois processos diferentes. O processo de modelação / calibração e o processo de extrapolação. Ambos os processos foram realizados com o software de cálculo EFC-400.

No primeiro processo, processo de modelação / calibração, ajustaram-se os modelos das linhas aéreas fazendo uso das medidas de campo realizadas. Este processo foi realizado de forma iterativa, isto é, fez-se alterações, verificou-se se os valores se aproximavam ou se afastavam do medido e, nos casos em que se aproximavam, com que relações o fizeram. Repetiu-se este processo até não se conseguir melhorar mais a adequação entre os valores medidos e os valores calculados.

No segundo processo, processo de extrapolação, seleccionou-se os locais próximos de exposição prolongada expostos a campos mais elevados e, utilizando os modelos criados no processo anterior, calculou-se os campos magnéticos médios para esses locais seleccionados.

Para cada uma das linhas estudadas os resultados são:

- **Linha 10kV simples L1081** – Campo magnético máximo de $0.235\mu\text{T}$ obtido numa das moradias situada sob a linha, ao nível do seu piso mais elevado (7.5m), com uma corrente média diária de 60A;
- **Linha 30kV simples L107** – Campo magnético máximo de $0.533\mu\text{T}$ obtido numa das moradias mais próximas, ao nível do seu piso mais elevado (4.0m), com uma corrente média diária de 140A;

- **Linha 30kV dupla L3127/L3128** – Campo magnético máximo de $0.312\mu\text{T}$ obtido numa das moradias situada sob a linha, ao nível do seu piso mais elevado (4.0m), com uma corrente média diária de 45A em cada linha;
- **Linha 60kV simples L6112** – Campo magnético máximo de $0.482\mu\text{T}$ obtido num dos prédios situado sob a linha, ao nível do seu piso mais elevado (10.0m), com uma corrente média diária de 90A;
- **Linha 60kV dupla L6124/L6125** – Campo magnético máximo de $1.365\mu\text{T}$ obtido num dos prédios mais próximos da linha, ao nível do seu terceiro piso (10.0m, neste caso não é o mais elevado), com uma corrente média diária de 390A.

Com estes resultados verifica-se, que se Portugal vier a adoptar valores limites de campos magnéticos mais restritivos, como por exemplo o valor de referência adoptado pela Suíça, $1\mu\text{T}$, com as cargas médias diárias utilizadas, só no caso da linha de 60kV dupla, nos seus prédios mais próximos, esses limites seriam ultrapassados.

Os resultados permitem ainda verificar, tal como foi mencionado no capítulo 2.3, a dependência directa entre os campos magnéticos e a corrente e, quanto maior a proximidade à fonte maior são os campos magnéticos.

Em termos de trabalhos futuros propõe-se, utilizando o mesmo software de cálculo, EFC-400, e os modelos das linhas criados neste trabalho, uma posterior avaliação e análise das possíveis medidas de mitigação a realizar para os casos de campos magnéticos mais elevados.

Propõe-se ainda a realização deste mesmo tipo de trabalho mas agora para outro tipo de instalações, por exemplo cabos subterrâneos ou até mesmo postos de transformação que, por muitas vezes se encontram localizados nos próprios edifícios habitações, se acredita serem geradores de campos magnéticos mais elevados.

Finalmente, no âmbito da lei 30/2010 publicada em Diário da República, referida na Introdução, espera-se que este trabalho seja útil para a posterior localização de todos os locais cujos valores de campo magnético possam estar associados a possíveis efeitos crónicos relacionados com a exposição prolongada aos campos magnéticos.

Referências Bibliográficas

1. **Pinto de Sá, J. L. C.** *CEMEBF, Saúde Pública e Linhas de Alta Tensão*. 2008.
2. **World Health Organization.** *Extremely Low Frequency Fields, Environmental Health Criteria*. 2007.
3. *Cem nelle aree urbane, a Bologna uno studio per valutare i campi a basse frequenze.* **Violanti, Silvia**. 2003.
4. *Modellistica previsionale applicata allo studio dei campi magnetici in prossimità di cabine di trasformazione elettrica (mt/bt).* **Bruni, M., et al.**
5. *Campi magnetici a bassa frequenza dovuti ad elettrodotti AT: utilizzo di modelli previsionali negli interventi di risanamento. Esperienze nella Provincia di Bologna.* **Alberti, L. e Busetto, M.**
6. **Brandão Faria, J. A.** *Electromagnetic Foundations of Electrical Engineering*. s.l. : John Wiley and Sons, Ltd, 2008.
7. **LABELEC e EDP.** *Medidas de campos eléctrico e magnético, Linha aérea simples 10kV, L1081 Fanhões, Vão 13-14*. 2009.
8. —. *Medição de campos eléctrico e magnético, Linha aérea simples 30kV, L107 Alhandra - Vila Franca de Xira, Apoio 16*. 2009.
9. —. *Medição de campos eléctrico e magnético, Linha aérea dupla 30kV, L3127/L3128 Alhandra, Vão 11-12*. 2009.
10. —. *Medição de campos eléctrico e magnético, Linha aérea simples 60kV, L6112 Trajouce - Figueirinha, Apoio 28*. 2009.
11. —. *Medição de campos eléctrico e magnético, Linha aérea dupla 60kV, L6124/L6125 Trajouce - Zambujal, Apoios 51/52/53*. 2009.
12. **Google.** *Google Maps*. [Online] <http://maps.google.com/>.
13. **SAPO.** *SAPO Mapas*. [Online] <http://mapas.sapo.pt/>.
14. **Silva, Bruno Filipe Gomes.** *Relatório de estágio curricular, Projecto de Linhas aéreas e subterrâneas de MT e BT*. FEUP. 2007.
15. **EN 50413.** *Basic Standard on Measurement and Calculation procedures for Human Exposure to Electric, Magnetic and Electro-Magnetic Fields (0-300 MHz)*. 2008.

16. **IEC 61786.** *Measurement of Low-Frequency Magnetic and Electric Fields with Regard to Exposure of Human Beings - Special Requirements for Instruments and Guidance for Measurements.* 1998.
17. **IEC 62110.** *Measurement Procedures for Electric and Magnetic Fields levels generated by AC Power Systems with Regard to HUMAN Exposure for overhead and underground lines.* 2008, in development.
18. **CCIGRÉ WG C4-203.** *Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electrical and Magnetic Fields near Overhead Power Lines.* 2009, in development.
19. **NARDA Safety Test Solutions.** *EFC-400 - Magnetic and Electric Field Calculation User's Manual.* 2009.
20. **Casaca, Jorge Filipe Guerreiro.** *Cálculo do campo electromagnético originado por linhas aéreas de transmissão.* 2007.
21. *Wikipédia, the Free Encyclopedia.* [Online] <http://en.wikipedia.org/>.
22. **Sequeira, Nuno João Falcão.** *Projecto de Linha Aérea de Alta Tensão conforme a norma EN50341-1.* 2009.

Anexo A Menus de configuração do EFC-400

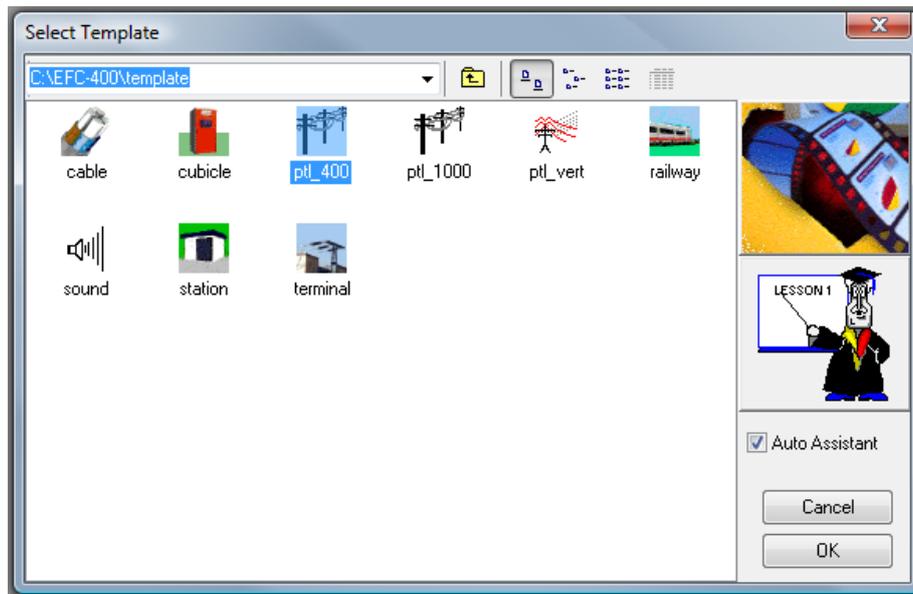


Figura A.1 – Menu de selecção do *template*, nas linhas aéreas modeladas neste trabalho o usou-se o *ptl_400*

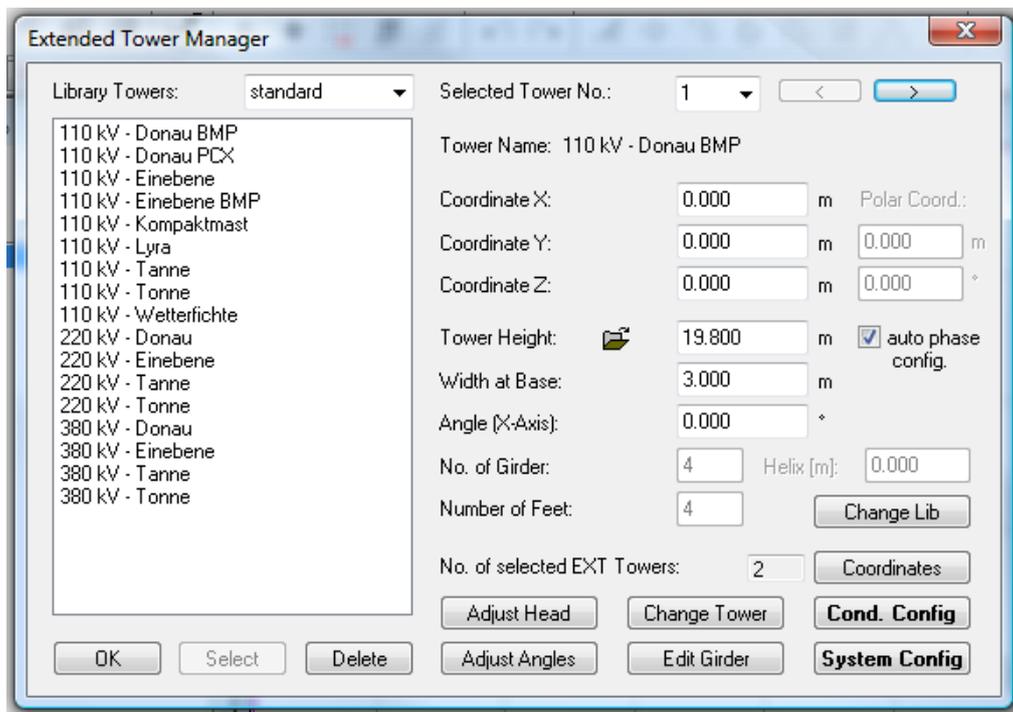


Figura A.2 – Menu de selecção de apoios e configuração dos mesmos quanto à sua altura e posicionamento

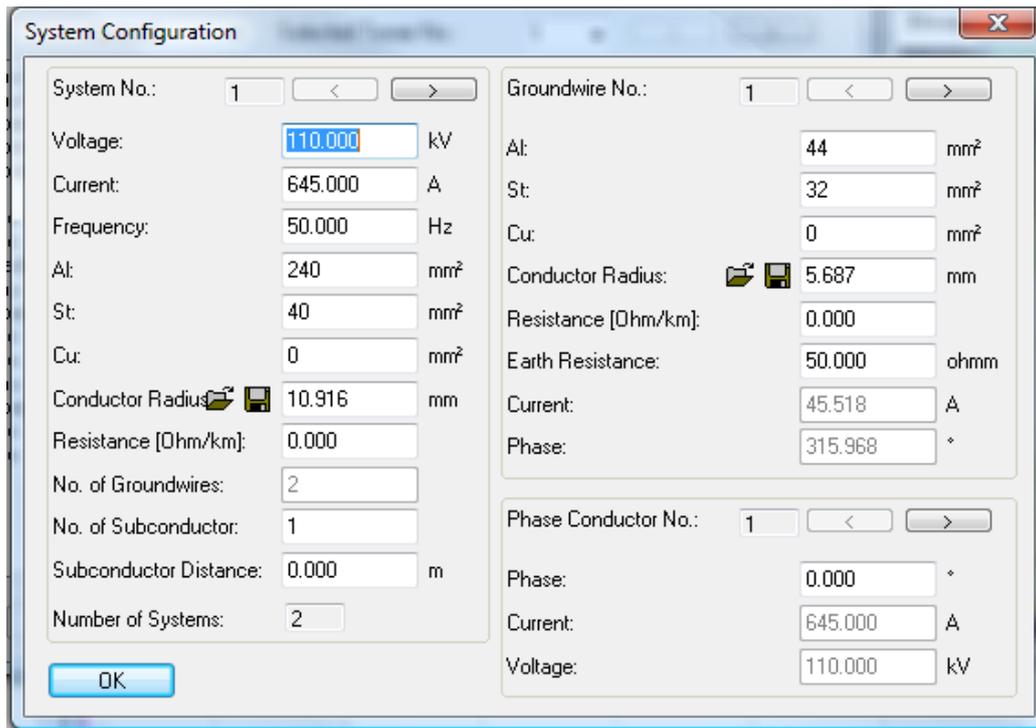


Figura A.3 – Menu de configuração do sistema, definição da tensão, corrente e material dos condutores



Figura A.4 – Menu de configuração das travessas, definição do número, do comprimento e posicionamento das mesmas, ou seja, definição da configuração da linha (esteira, trevo, etc)

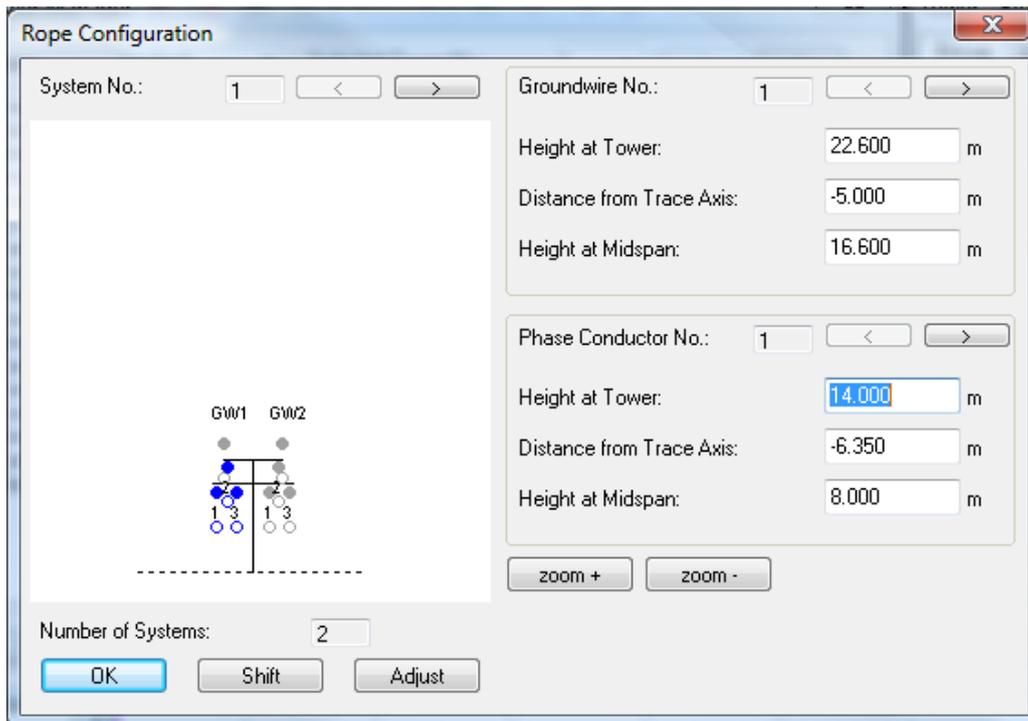


Figura A.5 – Menu de configuração do posicionamento dos condutores onde também se pode definir a catenária de forma manual

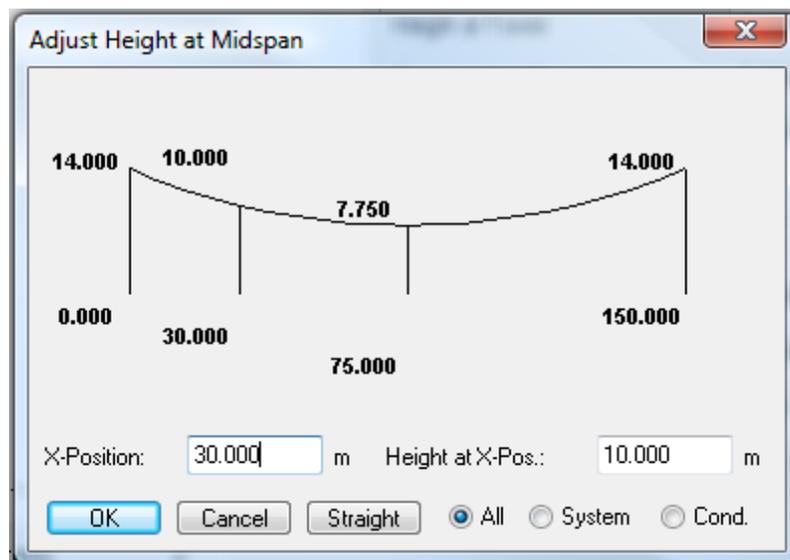


Figura A.6 – Menu de cálculo automático da catenária conforme se define a altura do condutor num determinado ponto entre os apoios

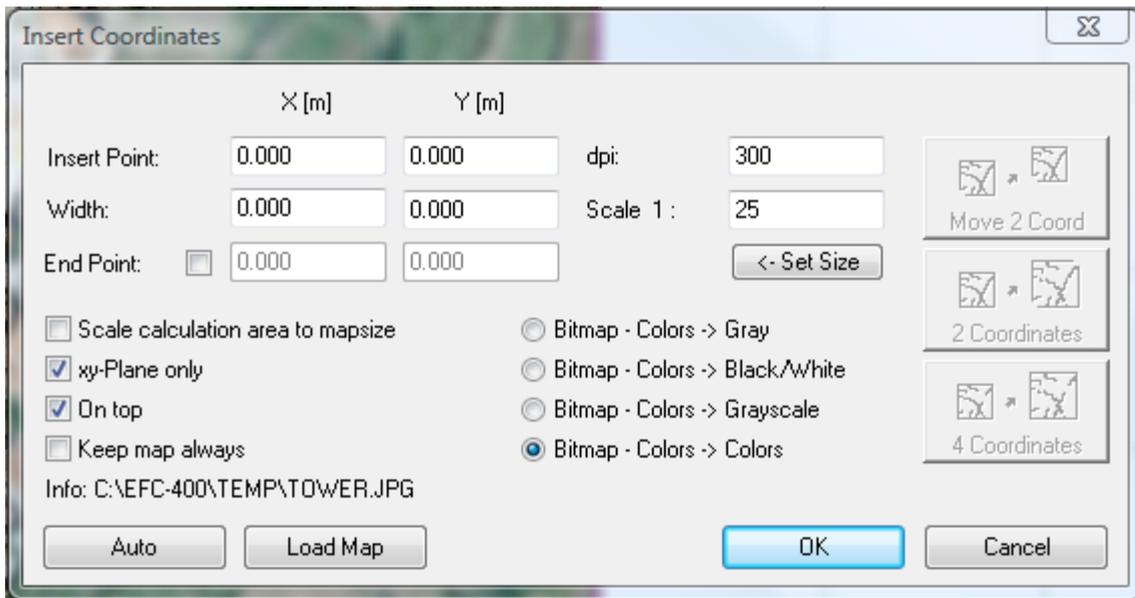


Figura A.7 – Menu de configuração da imagem de fundo, definição da escala, da posição e da gama de cores da imagem seleccionada

Anexo B Informação sobre os apoios

Tabela B.1 – Detalhes das travessas (14)

Tipo	Comprimento (m)	Comprimento / 2 (m)	Distâncias (m)	
			Ao topo	Topo - Lateral
Postes Metálicos				
P	1,75	0,88	1,30	1,57
N	2,20	1,10	1,60	1,94
M	2,70	1,35	1,90	2,33
G	3,20	1,60	2,20	2,72
G1	3,70	1,85	2,50	3,11
G2	4,20	2,10	2,80	3,50
G3	4,70	2,35	3,10	3,89
G4	5,20	2,60	3,40	4,28
EI	2,20	1,10	1,23	1,65
EII	2,20	1,10	1,23	1,65
EII29	2,20	1,10	1,23	1,65
RI	2,20	1,10	1,20 / 2,00	1,63 / 2,28
RII	2,20	1,10	1,20 / 2,00	1,63 / 2,28
Postes de Betão				
HRFSC	Esteira Horizontal			
80 / 100 / 120	1,77	0,89	1,18	-
HPT4	1,77	0,89	0,30	-
TAN	Triângulo de Base Horizontal			
60 / 120	1,77	0,89	1,25	1,53
GAN	Galhardete			
60 / 120	1,77	0,89	2,00	0,50 (*)
	Esteira Vertical			
VAN	-	-	0,88	0,12 (*)
VRF / VFL	-	-	1,00	0,25 (*)

Tabela B.2 – Alturas apoios de betão (14)

Postes de Betão	
Altura Total	Altura Útil
12,00	10,20
14,00	12,20
16,00	14,00
18,00	16,00
20,00	18,00
22,00	19,80
24,00	21,80

Tabela B.3 – Altura apoios metálicos (14)

Postes Metálicos	
Altura Total	Altura Útil
13,70	11,70
15,40	13,40
17,40	15,40
19,40	17,40
21,00	19,00
23,00	20,75
25,00	22,75
26,60 a	24,10
26,60 b	24,35
28,60	26,10
30,60	28,10
32,10	29,60
34,10	31,60

Anexo C Informações adicionais da linha 10kV simples



Figura C.1 – Diagrama de carga da linha L1081 dos dias das medidas, valores em amperes [A]

Tabela C.1 – Campo magnético medido no perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
A	0,083	0,088	0,095
2	0,090	0,092	0,096
4	0,091	0,095	0,100
6	0,092	0,097	0,103
8	0,092	0,097	0,105
10	0,096	0,105	0,110
12	0,096	0,102	0,108
14	0,100	0,103	0,105

Tabela C.2 – Campo magnético medido no perfil 2

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-5	0,092	0,101	0,113
-4	0,095	0,100	0,113
-3	0,101	0,106	0,117
-2	0,107	0,111	0,121
-1	0,105	0,113	0,126
C	0,104	0,112	0,126
	0,107	0,115	0,120
B	0,107	0,114	0,119
1	0,105	0,113	0,118

2	0,099	0,108	0,115
3	0,099	0,104	0,108
4	0,098	0,102	0,106
5	0,104	0,104	0,107
7	0,100	0,103	0,107
9	0,091	0,099	0,106
11	0,083	0,087	0,093
13	0,077	0,081	0,085

Anexo D Informações adicionais da linha 30kV simples



Figura D.1 – Diagrama de carga da linha L107 do dia das medidas, valores em amperes [A]

Tabela D.1 – Campo magnético medido no perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
A	0,34	0,37	0,39
B	0,34	0,36	0,39
C	0,34	0,35	0,38

Tabela D.2 – Campo magnético medido no perfil 2

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-19	0,11	0,11	0,11
-17	0,16	0,17	0,17
-15	0,23	0,24	0,26
-13	0,25	0,27	0,29
-11	0,29	0,30	0,31
-9	0,30	0,33	0,35
-7	0,31	0,33	0,36
-6	0,32	0,34	0,37
-5	0,34	0,35	0,38
-4	0,33	0,35	0,38
-3	0,34	0,36	0,39

-2	0,35	0,36	0,40
-1	0,34	0,36	0,40
D	0,34	0,35	0,39
1	0,34	0,36	0,39
2	0,34	0,36	0,39
3	0,34	0,35	0,38
4	0,34	0,36	0,39
5	0,34	0,35	0,38
7	0,32	0,33	0,36
9	0,29	0,30	0,32
11	0,26	0,28	0,30
16	0,19	0,20	0,21
21	0,14	0,15	0,15
26	0,10	0,10	0,11
31	0,08	0,09	0,09

Anexo E Informações adicionais da linha 30kV dupla



Figura E.1 – Diagrama de carga da linha L3127 e L3128 nos dias das medidas, valores em amperes [A]

Tabela E.1 – Altura dos condutores medidas

Ponto	Altura do Condutor Inferior [m]
A	14,23
B	14,28
C	15,13
D	15,19

Tabela E.2 – Campo magnético medido no perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-35	0,02	0,02	0,02
-30	0,02	0,02	0,03
-25	0,03	0,03	0,03
-20	0,04	0,04	0,04
-15	0,05	0,05	0,05
-13	0,05	0,05	0,05
-11	0,06	0,06	0,06
-9	0,06	0,07	0,07
-7	0,07	0,07	0,08
-5	0,08	0,08	0,09
-4	0,09	0,09	0,10
-3	0,09	0,09	0,10
-2	0,09	0,10	0,10
-1	0,09	0,09	0,11
A	0,10	0,11	0,12

	0,10	0,11	0,12
	0,11	0,11	0,12
	0,10	0,12	0,13
B	0,11	0,12	0,13
1	0,11	0,12	0,13
2	0,12	0,13	0,15
3	0,11	0,12	0,14
4	0,11	0,11	0,13
6	0,11	0,12	0,14
8	0,11	0,11	0,12
10	0,10	0,11	0,12
12	0,09	0,10	0,10
14	0,08	0,09	0,09
16	0,07	0,08	0,08
21	0,05	0,06	0,06
26	0,05	0,05	0,05
31	0,04	0,04	0,04
36	0,03	0,03	0,03
41	0,04	0,05	0,05

Anexo F Informações adicionais da linha 60kV simples



Figura F.1 – Diagrama de carga da linha L6112 dos dias das medidas, valores em amperes [A]

Tabela F.1 – Altura dos condutores medidas

Ponto	Altura do Condutor Inferior [m]
A	22,40
B	22,31
D	23,59
E	23,52

Tabela F.2 – Campo magnético medido no perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
C	0,189	0,190	0,202
2	0,183	0,190	0,203
4	0,180	0,187	0,201
6	0,175	0,187	0,202
8	0,185	0,186	0,199
10	0,180	0,187	0,198
12	0,176	0,190	0,204
14	0,183	0,194	0,205

Tabela F.3 – Campo magnético medido no perfil 2

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-5	0,165	0,165	0,173
-4	0,169	0,174	0,182
-3	0,176	0,180	0,185
-2	0,176	0,182	0,194
-1	0,180	0,183	0,192
A	0,177	0,183	0,194
	0,179	0,184	0,194
	0,180	0,186	0,195
	0,177	0,185	0,195
D	0,170	0,180	0,190
1	0,170	0,180	0,190
2	0,170	0,180	0,190
3	0,170	0,175	0,185
4	0,168	0,170	0,177
5	0,164	0,167	0,176
7	0,158	0,164	0,171
9	0,152	0,154	0,158
11	0,142	0,148	0,155
15	0,122	0,123	0,130
20	0,103	0,106	0,111
25	0,087	0,088	0,088
30	0,068	0,070	0,074

Tabela F.4 – Campo magnético medido no perfil 3

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-5	0,175	0,183	0,188
-4	0,183	0,182	0,192
-3	0,184	0,191	0,196
-2	0,186	0,187	0,196
-1	0,185	0,192	0,200
B	0,185	0,195	0,200
	0,185	0,191	0,198
	0,187	0,195	0,202
	0,177	0,190	0,197
E	0,180	0,186	0,195
1	0,181	0,188	0,194
2	0,183	0,186	0,195
3	0,177	0,184	0,191
4	0,172	0,180	0,187
5	0,170	0,176	0,178
7	0,168	0,173	0,185
9	0,163	0,168	0,173

11	0,156	0,158	0,165
15	0,116	0,120	0,128
20	0,103	0,106	0,110
25	0,085	0,089	0,089
30	0,071	0,073	0,074

Tabela F.5 – Campo magnético medido no perfil 4

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
F	0,335	0,348	0,380
2	0,330	0,347	0,377
4	0,320	0,339	0,366
6	0,316	0,334	0,360
8	0,317	0,333	0,355
10	0,300	0,320	0,340
12	0,290	0,304	0,328
14	0,280	0,293	0,316
16	0,274	0,287	0,305
18	0,264	0,276	0,294

Tabela F.6 – Campo magnético medido no perfil 5

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-2	0,287	0,303	0,327
-1	0,291	0,303	0,330
H	0,295	0,312	0,338
	0,292	0,310	0,388
	0,292	0,310	0,370
	0,290	0,306	0,332
G	0,280	0,303	0,325
1	0,283	0,295	0,316
2	0,254	0,262	0,289
3	0,243	0,257	0,275
4	0,233	0,243	0,259
5	0,221	0,231	0,244
7	0,212	0,222	0,233
9	0,196	0,208	0,215
11	0,174	0,180	0,188
15	0,131	0,135	0,135
20	0,107	0,110	0,112
25	0,083	0,084	0,084
30	0,063	0,063	0,063

Tabela F.7 – Campo magnético simulado ao longo do perfil 3 com corrente de calibração, vão 27/28

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-5	0,156	0,163	0,169
-4	0,162	0,169	0,176
-3	0,167	0,174	0,182
-2	0,172	0,179	0,187
-1	0,176	0,183	0,191
B	0,179	0,187	0,195
	0,181	0,189	0,197
	0,183	0,190	0,198
	0,183	0,191	0,199
E	0,184	0,191	0,199
1	0,183	0,191	0,199
2	0,182	0,189	0,197
3	0,180	0,187	0,194
4	0,177	0,184	0,191
5	0,174	0,180	0,187
7	0,165	0,171	0,177
9	0,155	0,159	0,165
11	0,143	0,148	0,152
15	0,121	0,123	0,126
20	0,095	0,097	0,099
25	0,074	0,075	0,077
30	0,058	0,059	0,060

Anexo G Informações adicionais da linha 60kV dupla



Figura G.1 – Diagrama de carga da linha L6124 e L6125 do dia das medidas, valores em amperes [A]

Tabela G.1 – Campo magnético medido no perfil 1

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-30	2,23	2,37	2,57
-28	2,32	2,46	2,66
-26	2,26	2,34	2,50
-24	2,27	2,35	2,50
-22	2,35	2,40	2,52
-20	2,37	2,42	2,57
-18	2,32	2,40	2,56
-16	2,37	2,40	2,60
-14	2,37	2,44	2,64
-12	2,32	2,43	2,58
-10	2,38	2,45	2,60
-8	2,42	2,50	2,64
-6	2,41	2,45	2,62
-4	2,42	2,50	2,65
-2	2,38	2,48	2,60
A	2,39	2,45	2,61
2	2,38	2,44	2,60
4	2,32	2,36	2,54
6	2,32	2,40	2,50
8	2,30	2,40	2,50
10	2,32	2,36	2,50
12	2,30	2,38	2,52
14	2,27	2,31	2,43
16	2,13	2,20	2,36

18	2,10	2,20	2,36
20	2,17	2,25	2,33
22	2,14	2,20	2,34
24	2,16	2,18	2,31
26	2,08	2,12	2,27
28	2,14	2,15	2,26
30	2,10	2,13	2,25

Tabela G.2 – Campo magnético medido no perfil 2

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-3	2,43	2,58	2,67
-2	2,44	2,53	2,77
-1	2,50	2,62	2,83
C	2,60	2,70	2,92
	2,64	2,80	3,04
	2,66	2,85	3,12
	2,72	2,90	3,17
B	2,76	2,86	3,15
1	2,72	2,80	3,04
2	2,67	2,75	3,00
3	2,62	2,72	2,92
4	2,56	2,70	2,86
5	2,50	2,58	2,75
7	2,26	2,31	2,40
9	2,03	2,10	2,18
11	1,83	1,87	1,92
15	1,38	1,40	1,42
20	1,04	1,06	1,07
25	0,84	0,86	0,86
30	0,71	0,72	0,73

Tabela G.3 – Campo magnético medido no perfil 3

Ponto [m]	B [μ T]		
	0,5 m	1,0 m	1,5 m
-20	4,58	5,04	5,30
-15	4,58	5,08	5,39
-10	4,72	5,22	5,56
-5	4,99	5,40	5,77
D			
5	5,30	5,88	6,32
10	5,30	5,70	6,31
15	5,11	5,61	6,04

