



distribuição

GUIA DE MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CAMPO MAGNÉTICO A 50 HZ EM INSTALAÇÕES DA EDP

Prof. Dr. Eng.º José Luís Pinto de Sá
Novembro de 2011



RESUMO

Esta publicação apresenta os resultados mais relevantes da investigação de medidas de mitigação para as condições de exposição humana continuada aos campos electromagnéticos emitidos por equipamentos de Distribuição de Energia da EDP-Distribuição, resultados obtidos ao longo da Medida 22 do Plano de Promoção de Desempenho Ambiental realizada de 2009 a 2011 e concebido e dirigido pelo autor.

Numa 1ª parte são introduzidas as questões que conduziram a que os campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência como os emitidos pelos equipamentos da EDP se tivessem tornado merecedores de atenção e estudo, terminando-se pela apresentação das normas e práticas mais recentes que vieram definir os limites de exposição aceites para os referidos campos electromagnéticos. Os valores mínimos de campos eléctrico e magnético exteriores ao corpo humano para os quais há provas de algum efeito fisiológico (reversível e não nocivo) são respectivamente de 25 kV/m e 500 μ T, mas alguns estudos epidemiológicos internacionais criaram a suspeita de que valores muito inferiores de campo magnético poderão estar associados a um pequeno incremento de uma doença rara, a leucemia infantil linfoblástica aguda, e isso tem suscitado recomendações de medidas de precaução, ainda que só justificadas se forem simples, de fácil execução e baixo custo, não comprometendo os benefícios sociais, económicos e para a medicina resultantes do uso da electricidade.

Na 2ª parte são apresentados os resultados dos estudos de medidas de mitigação realizados, e que cobriram as linhas aéreas simples e duplas de 60 kV, assim como cabos subterrâneos de 60 kV inseridos em arruamentos urbanos e Postos de Transformação MT/BT montados no interior de edifícios. Outras instalações foram estudadas, como as linhas aéreas e os cabos subterrâneos de tensão inferior a 60kV, PT exteriores, caixas de cabos BT e Subestações AT/MT, mas todas elas apresentam emissões indiscerníveis do ruído ambiente e não merecem, por isso, qualquer estudo de medidas mitigadoras. Mesmo para as instalações destacadas, se se tomarem por referência os limites mais restritivos actualmente adoptados pelos mais exigentes países da União Europeia, não são em geral necessárias medidas de mitigação, em particular não o são nas linhas aéreas e nos cabos de 60kV.

Porém, e com o objectivo de permitir uma eventual futura avaliação técnico-econó-

mica informada, o estudo tomou por referência limites ainda mais exigentes que os praticados por qualquer país da União Europeia, o que conduziu ao estudo de medidas de mitigação de baixo custo que são detalhadas.

A metodologia usada foi a de primeiro caracterizar as instalações com medições, depois modelá-las com *software* adequado e calibrar os modelos com os resultados das medições e, finalmente, extrapolar os valores de campo para edifícios próximos, simulando alterações nas instalações que realizem as medidas de mitigação consideradas.

ÍNDICE

RESUMO	1
PARTE I: CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS NA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉCTRICA E SAÚDE PÚBLICA: O QUE A CIÊNCIA SABE E O QUE OS NORMATIVOS IMPÕEM	7
1. INTRODUÇÃO	8
2. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO EXISTENTE SOBRE O EFEITO DA EXPOSIÇÃO AOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE EXTREMAMENTE BAIXA FREQUÊNCIA (CEMEBF)	9
2.1. OS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS NATURAIS E O CORPO HUMANO.	9
2.2. CEMEBF ARTIFICIAIS COM INFLUÊNCIA COMPROVADA SOBRE O CORPO HUMANO: EFEITOS AGUDOS.....	10
3. AS IMPOSIÇÕES DAS INSTITUIÇÕES RESPONSÁVEIS PELA SAÚDE PÚBLICA QUANTO À EXPOSIÇÃO AOS CEMEBF	12
3.1. A POSIÇÃO DA ICNIRP DE 1998: DEFINIÇÃO DE LIMITES BÁSICOS E DE VALORES DE REFERÊNCIA	12
3.2. A RECOMENDAÇÃO EUROPEIA 519/EC DE 1999 E A DIRECTIVA 2004/40/EC	13
3.3. A PORTARIA PORTUGUESA 1421 DE 2004.....	13
3.4. LIMITAÇÕES PRÁTICAS DECORRENTES DA PORTARIA 1421 DE 2004.....	14
4. EFEITOS CRÓNICOS DA EXPOSIÇÃO AOS CEMEBF: A ORIGEM DAS SUSPEITAS	15
4.1. INTRODUÇÃO.....	15
4.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS SOBRE OS EFEITOS CRÓNICOS DOS CEMEBF DE MUITO BAIXA INTENSIDADE, NOMEADAMENTE CANCRO17	
4.3. ESTUDOS EPIDEMIOLÓGICOS SOBRE OS EFEITOS CRÓNICOS DA EXPOSIÇÃO AOS CEMEBF.....	19
4.3.1. PATOLOGIAS DIVERSAS	19
4.3.2. LEUCEMIA INFANTIL: ESTUDOS INTERNACIONAIS	20
4.3.3. AS ANÁLISES DE CONJUNTO QUE FUNDAMENTARAM A DECISÃO DA IARC EM 2002.....	24
4.4. DISCUSSÃO CIENTÍFICA DOS RESULTADOS EPIDEMIOLÓGICOS RELATIVOS À LEUCEMIA INFANTIL LINFOBLÁSTICA AGUDA.	27
4.4.1. OS CRITÉRIOS DE BRADFORD HILL DE 1965	27
4.4.2. ALGUNS FACTOS SOBRE A LEUCEMIA INFANTIL.....	28

4.4.3. EXTRAPOLAÇÃO PARA PORTUGAL DO NÚMERO DE PATOLOGIAS ASSOCIÁVEIS AOS CEMEBF, SE SE CONFIRMASSEM AS SUSPEITAS EPIDEMIOLÓGICAS	32
5. A POSIÇÃO DA OMS SOBRE OS EFEITOS CRÓNICOS DOS CEMEBF: ATITUDE PRECAUCIONAL E APELO A MAIS INVESTIGAÇÃO	34
6. MEDIDAS ADOPTADAS EM DIVERSOS PAÍSES	37
6.1. <i>INTERNACIONALMENTE</i>	37
6.2. <i>PORTUGAL</i>	40
PARTE II: MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DA EXPOSIÇÃO AO CAMPO ELECTROMAGNÉTICO EMITIDO POR EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES DA EDP EM ZONAS DE OCUPAÇÃO HUMANA	41
1. METODOLOGIA NORMALIZADA DE PROJECCÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO VIRTUAIS	42
2 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EMITIDO POR LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO	46
2.1 <i>LINHAS AÉREAS SIMPLES</i>	46
2.1.1 MITIGAÇÃO POR MODIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DOS APOIOS DOS CONDUTORES.....	49
2.1.2 INFLUÊNCIA DO CABO DE GUARDA	54
2.1.3 MITIGAÇÃO POR AUMENTO DA ALTURA DOS APOIOS DE LINHA.....	55
2.1.4 MITIGAÇÃO POR AFASTAMENTO HORIZONTAL DOS APOIOS DE LINHA DAS ZONAS DE EXPOSIÇÃO CRÍTICA	56
2.1.5 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA LINHAS DE 60 KV SIMPLES SOBREPASSANDO EDIFÍCIOS.....	62
2.2 <i>LINHAS AÉREAS DUPLAS</i>	63
2.2.1 MITIGAÇÃO POR TROCA DE SEQUÊNCIA ENTRE FASES	67
2.2.2 COMPARAÇÃO DA LINHA DUPLA COM TROCA DE FASES E CORRENTES IGUAIS COM A SITUAÇÃO DE LINHA SIMPLES	69
2.2.3 MITIGAÇÃO POR ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CONDUTORES ..	71
2.2.4 MITIGAÇÃO POR CONJUGAÇÃO DA TROCA DE SEQUÊNCIA DE FASES COM APROXIMAÇÃO DOS CONDUTORES	73
2.2.5 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA LINHAS DUPLAS DE 60 KV LATERALMENTE PRÓXIMAS DE EDIFÍCIOS	74
3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EMITIDO POR CABOS SUBTERRÂNEOS DE ENERGIA DE ALTA TENSÃO	75
3.1 <i>CARACTERIZAÇÃO DE UM CABO À POTÊNCIA MÉDIA DE 55MVA</i>	79
3.2 <i>ESTUDOS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO A CURTA</i>	

	<i>DISTÂNCIA DE EDIFÍCIOS HABITADOS</i>	81
3.2.1	AUMENTO DA PROFUNDIDADE DE ENTERRAMENTO	82
3.2.2	BLINDAGEM POR COLOCAÇÃO DE REDES METÁLICAS MALHADAS ..	84
A.	Uma só Rede Metálica.....	85
B.	Rede Metálica Convexa.....	87
C.	Duas Redes Metálicas	88
D.	Três Redes Metálicas.....	89
E.	Material das Grades.....	91
3.3	<i>RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA CABOS SUBTERRÂNEOS DE 60 KV LATERALMENTE PRÓXIMOS DE EDIFÍCIOS</i>	93
4.	MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EMITIDO POR POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO INTERIORES	94
4.1	<i>ESTUDO DE UM POSTO DE TRANSFORMAÇÃO INTERIOR</i>	94
4.1.1	MODIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO	96
4.1.2	SOLUÇÃO CONSTRUTIVA NO PT	100
4.1.3	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	101
4.2	<i>ESTUDO DE UM OUTRO TIPO DE POSTO DE TRANSFORMAÇÃO INTERIOR</i>	102
4.2.1	ALTERAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO.....	106
4.2.2	MODIFICAÇÃO DO PERCURSO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO	110
4.2.3	AFASTAMENTO DO QGBT E TRANSFORMADOR DAS PAREDES QUE DELIMITAM O PT.....	113
4.2.4	CONFIGURAÇÃO BACK TO BACK	117
4.2.5	VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS INTERRUPTORES TETRAPOLARES	121
4.2.6	CONFIGURAÇÃO BACK TO BACK COM ELEMENTOS METÁLICOS	125
4.2.7	CONCLUSÕES PARCIAIS.....	129
4.3	<i>RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO INSTALADOS EM EDIFÍCIOS</i>	129
4.3.1	ALTERAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO.....	131
4.3.2	MODIFICAÇÃO DO PERCURSO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO	132
4.3.3	AFASTAMENTO DO QGBT E DO TRANSFORMADOR DAS PAREDES QUE DELIMITAM O PT	132
4.3.4	CONFIGURAÇÃO BACKTOBACK	133
4.3.5	REDUÇÃO DAS DIMENSÕES DOS INTERRUPTORES TETRAPOLARES	134
4.3.6	CONFIGURAÇÃO BACK TO BACK COM ELEMENTOS METÁLICOS	135

**PARTE I: Campos
Electromagnéticos na Distribuição de
Energia Eléctrica e Saúde Pública:
o que a ciência sabe e o que os
normativos impõem**

1. INTRODUÇÃO

Os campos eléctricos e magnéticos existem onde quer que a electricidade seja gerada, transmitida ou distribuída ou usada. Desde que o uso da electricidade se tornou uma parte integrante do nosso estilo de vida moderno, estes campos são omnipresentes no nosso ambiente.

Os valores médios do campo eléctrico nas habitações situam-se na escala de **algumas dezenas de V/m**. A exposição residencial aos campos magnéticos gerados pela energia eléctrica à frequência industrial não varia substancialmente através do mundo. A média do campo magnético em habitações varia de **0.03 a 0.07 μT** na Europa e de 0.06 a 0.11 μT nos EUA¹. Na vizinhança de certos electrodomésticos, porém, os campos magnéticos instantâneos podem atingir algumas **centenas de μT** . Perto das linhas de Muito Alta tensão, os campos magnéticos podem ir até 20 μT , e os eléctricos até vários kV/m.

Poucas crianças têm exposições, em média temporal, aos campos magnéticos residenciais a 50 Hz superando os níveis associados por algumas investigações a um aumento da incidência de leucemia infantil. Aproximadamente 1% a 4 % têm exposições médias acima de 0.3 μT e somente 1% a 2% têm exposições médias excedendo os 0.4 μT , na América do Norte. Na Europa, dado o menor uso de linhas aéreas e a maior tensão de uso residencial da energia eléctrica (230 V, contra 110 V nos EUA), têm-se apenas cerca de 2% e 0.5% da população com campos magnéticos superiores respectivamente a 0.2 e a 0.4 μT .

Os efeitos sobre a saúde humana destes campos electromagnéticos são um assunto amplamente investigado pela pesquisa médica desde há muitas décadas. Em Junho de 2007, a Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou uma detalhada monografia de 470 páginas² que apresenta os resultados estabelecidos por essa investigação até ao presente.

Os próximos capítulos desta parte I baseiam-se fundamentalmente nos resultados publicados nessa monografia e consubstanciam, portanto, o conhecimento científico de validade reconhecida pelas mais altas instâncias mundiais responsáveis pela saúde pública.

¹No seguimento, tomar-se-á como unidade do campo eléctrico Volts por metro (V/m), ou Quilovolts por metro (kV/m), e para campos magnéticos a sua intensidade será expressa em Tesla (T), em militesla (mT) ou ainda em microtesla (μT).

² Monografia nº 238 intitulada “*Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria*”.

2. O CONHECIMENTO CIENTÍFICO EXISTENTE SOBRE O EFEITO DA EXPOSIÇÃO AOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE EXTREMAMENTE BAIXA FREQUÊNCIA (CEMEBF)

2.1. OS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS NATURAIS E O CORPO HUMANO

Todos os seres vivos estão sujeitos ao **campo magnético natural** do planeta, cuja intensidade varia entre $30 \mu\text{T}$ (no equador) e $60 \mu\text{T}$ (nos pólos); na latitude média de Portugal, vale presentemente cerca de **$44 \mu\text{T}$** . Este campo, capaz de mover uma peça de ferro magnetizada (princípio de funcionamento das bússolas), é mais intenso do que a esmagadora maioria dos campos de origem artificial a que os seres humanos estão quotidianamente sujeitos, e evidentemente que a vida à face da Terra se desenvolveu adaptando-se a ele.

Por outro lado, o **campo eléctrico natural** acima da superfície da terra varia muito com o tempo e o local. Perto da superfície terrestre, com bom tempo, tem uma intensidade típica de aproximadamente **130 V/m** . Porém, na proximidade de trovoadas ocorrem variações de até **40 kV/m** , embora mesmo na ausência de descargas atmosféricas locais esse campo possam atingir **3 kV/m** .

Por outro lado, os campos electromagnéticos estão presentes na própria fisiologia natural do corpo humano.

Com efeito, todos os condutores eléctricos, incluindo o corpo humano, têm campos de ruído eléctrico devidos ao movimento aleatório das cargas eléctricas. Para uma célula longa (por exemplo, um nervo ou uma fibra muscular) com 1 mm de comprimento e um diâmetro de $25 \mu\text{m}$, a tensão associada ao ruído eléctrico é da ordem de **100 mV/m** . Com efeito, para campos variáveis com Extremamente Baixa Frequência (CEMEBF), o citoplasma das células comporta-se como um condutor quase perfeito e está todo ao mesmo potencial, sendo a sua fina mas isolante membrana exterior que suporta toda a tensão eléctrica.

Nos neurónios o papel dos neuro-transmissores reforça muito o carácter eléctrico dessas células. Estudos experimentais recentes mostram que para muitos neurónios o limiar de tensão estimulante é da ordem de **$10 \text{ a } 15 \text{ mV}$** acima da “tensão de re-

pouso”. Muitos cientistas consideram improvável que campos eléctricos muito inferiores a esses níveis de ruído possam afectar sistemas biológicos.

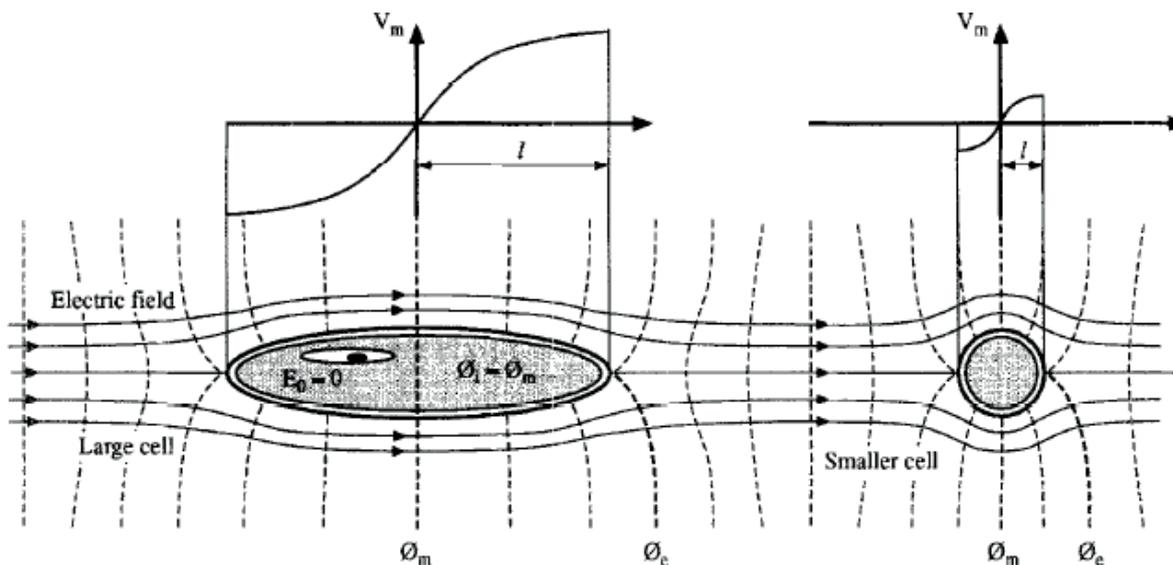


Figura 2.1: Campo eléctrico e linhas equipotenciais sobre células. Nas células longas (músculos estriados dos membros e respectivos nervos, espinal medula, etc), a tensão transmembranar pode ser muito elevada.

Por outro lado, os campos eléctricos externos suportados pelo corpo humano são atenuados por um factor de **dez mil a dez milhões de vezes** dentro do corpo, devido, em grande parte, ao papel da pele e ao facto de a própria presença do corpo modificar as linhas de campo. Por este motivo e para pequenas células, a criação de campos eléctricos com valores similares aos resultantes do próprio ruído interno, a nível celular, requerem enormes campos externos da ordem de **100 kV/m** (eléctricos) ou **10 mT** a 50 Hz (magnéticos)!

2.2. CEMEBF ARTIFICIAIS COM INFLUÊNCIA COMPROVADA SOBRE O CORPO HUMANO: EFEITOS AGUDOS

Têm sido realizados numerosos estudos laboratoriais com o objectivo de avaliar o efeito dos campos electromagnéticos sobre o corpo humano. Estes estudos têm sido praticados quer com voluntários, quer com animais (*in vivo*), quer ainda com preparações laboratoriais de tecidos celulares (*in vitro*).

Estes estudos mostram que a maioria das pessoas pode **percepcionar** campos eléctricos de 50Hz acima de **20 kV/m**, mas que só uma pequena minoria consegue para valores inferiores a **5 kV/m**.

Entretanto, nenhum efeito fisiológico ou psicológico adverso foi observado em estudos

de laboratório sobre pessoas expostas a campos magnéticos a 50 Hz no domínio de **2 a 5 mT**. Não se verificou nenhuma mudança na química do sangue, na contagem de glóbulos, no teor de gases dissolvidos, nos seus níveis de lactose, nos electrocardiogramas, electro-encefalogramas, na temperatura da pele ou nos níveis circulantes de hormonas. Estudos recentes em voluntários também não mostraram nenhum efeito da exposição aos campos magnéticos a 50 Hz no nível nocturno de melatonina (uma hormona cuja produção se considera ter uma relação com o cancro mamário) no sangue.

Por outro lado, em estudos de **funções visuais e mentais** em voluntários humanos, foram registadas alterações na latência de resposta em testes complexos de raciocínio, em voluntários sujeitos a correntes eléctricas a 50 Hz através de eléctrodos colocados na cabeça e nos ombros, para densidades de corrente que se estima valessem de **10 a 40 mA/m²**. Simultaneamente, muitos estudos relataram a experiênciapor voluntários de sensações visuais fracas de cintilação, conhecidas como fosfenos magnéticos, durante a exposição a Campos ElectroMagnéticos de Baixa Frequência superiores a de **3 a 5 mT**. Estes efeitos visuais podem também ser induzidos pela aplicação directa à cabeça de correntes eléctricas fracas. Calculou-se, por isso, que as densidades de corrente mínimas para a suscitação dos fosfenos sejam de cerca de **10 mA/m²** na retina, e isso apenas para uma frequência de 20 Hz, inferior à das redes eléctricas.

Acima deste valor mínimo de corrente de **10 mA/m²** na retina, foram registados efeitos nas **funções cognitivas do cérebro** e alterações do tecido celular. Quando a densidade de corrente induzida excede valores de **100 a várias centenas de mA/m²**, para frequências entre 10 Hz e 1 kHz, são excedidos os limiares de estimulação neuronal e neuro-muscular. Finalmente, para densidades de corrente extremamente elevadas, acima de **1 A/m²**, podem ocorrer efeitos severos e potencialmente mortais, tais como sístoles cardíacas extra, fibrilação ventricular, tetanização muscular e falha respiratória. A severidade e a probabilidade de irreversibilidade dos efeitos nos tecidos tornam-se maiores com a exposição crónica às densidades de corrente induzidas acima de **10 a 100 mA/m²**.

Por conseguinte, e é esta a posição da ICNIRP e da OMS, embora tais valores não tenham efeitos patológicos conhecidos, parece todavia prudente limitar a exposição humana a campos electromagnéticos que induzam densidades de corrente superiores a **10 mA/m² na cabeça, na garganta e no tronco**, para a gama de frequências de alguns Hz a 1 kHz³.

³ ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", 1998.

3. ASIMPOSIÇÕES DAS INSTITUIÇÕES RESPON-SÁVEIS PELA SAÚDE PÚBLICA QUANTO À EX-POSIÇÃO AOS CEMEBF

3.1. A POSIÇÃO DA ICNIRP DE 1998: DEFINIÇÃO DE LIMITES BÁSICOS E DE VALORES DE REFERÊNCIA

No capítulo anterior, para os campos electromagnéticos gerados à frequência industrial, vimos como a restrição básica derivada pela ICNIRP e pela OMS é a da limitação da densidade de corrente no corpo humano a **10 mA/m²**, valor mínimo para o qual foram identificados efeitos na fisiologia humana, particularmente no sistema nervoso, ainda que reversíveis não nocivos.

Este valor foi estabelecido como o máximo recomendável para os trabalhadores da indústria de electricidade (no cérebro e espinal medula e, portanto, ao nível da cabeça, pescoço e tronco). Porém, para o público em geral, que não é suposto ter qualquer instrução sobre os riscos associados à electricidade e que inclui um vasto leque de diferentes susceptibilidades fisiológicas, a ICNIRP considerou que o referido limite devia ser reforçado por um factor de segurança confortável, e por isso recomendou a limitação a apenas **2 mA/m²**, 1/5 do limite experimentalmente identificado como causando algum efeito fisiológico.

A definição destes **limites básicos** de densidade de corrente no corpo humano, entretanto, não é de fácil utilização prática no projecto ou análise de instalações eléctricas e outras situações de exposição humana aos CEMEBF. Por esse motivo, a ICNIRP decidiu usar modelos teóricos que permitissem relacionar aqueles **limites básicos** de densidade de corrente com os CEMEBF mensuráveis nos locais e instalações.

Apesar de existirem modelos computacionais complexos e sofisticados, a opção da ICNIRP foi a de, na incerteza do rigor existente em tais modelos, preferir considerações simplificadas e conservadoras.

Assim, e para o campo magnético B, a ICNIRP estabeleceu os valores de 100 µT e de 500 µT como os limites de campo magnético cuja não ultrapassagem garante que os limites básicos de 2 e de 10 mA/m², respectivamente para o público em geral e para os trabalhadores do sector eléctrico, não são excedidos. Estes valores de B são designados por **valores de referência**.

Para o campo eléctrico E , por outro lado, a ICNIRP admite que os modelos do campo devem ter em conta o facto de que a carga eléctrica superficial pode variar grandemente. O nível de 5 kV/m para a exposição do público em geral corresponde, nas piores circunstâncias, a uma densidade de corrente induzida de aproximadamente 2 mA/m^2 na garganta e no tronco, se o vector do campo E for paralelo à linha central do corpo. Por conseguinte, a densidade de corrente induzida por um campo de 5 kV/m concorda com as limitações básicas sob circunstâncias realistas de exposição nos piores casos, e é esse o valor de referência estabelecido para o campo eléctrico e para o público em geral. Para os trabalhadores da indústria eléctrica, aceita-se uma exposição ao dobro daquele valor, 10 kV/m .

A ICNIRP esclarece ainda que, obviamente, para efeitos de demonstração de conformidade com as limitações básicas, os níveis de referência para os campos eléctricos e magnéticos devem ser considerados separadamente.

3.2. A RECOMENDAÇÃO EUROPEIA 519/EC DE 1999 E A DIRECTIVA 2004/40/EC

A 30 de Julho de 1999, foi publicada a “Recomendação do Conselho (Europeu) de 12 de Julho de 1999, relativa à limitação da exposição da população aos campos electromagnéticos (0 Hz – 300 GHz)”, que recomendou a adopção pelos Estados membros de medidas que garantam a limitação dos campos electromagnéticos a que as populações são expostas. Os valores indicados são uma transcrição perfeita dos valores indicados pela ICNIRP no ano antecedente (1998) e cuja motivação foi esclarecida no subcapítulo anterior deste relatório.

3.3. A PORTARIA PORTUGUESA 1421 DE 2004

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

Os valores de limitação básica e de referência publicados são uma transcrição perfeita dos valores recomendados pelo Conselho Europeu e, por conseguinte, dos valores indicados pela ICNIRP em 1998 e cuja razão de ser foi explicada.

Em suma, e no que se refere á frequência industrial de 50 Hz utilizada na transmissão, distribuição e uso de energia eléctrica em Portugal:

1. O **limite básico** estabelecido, para a população em geral é o de a densidade de corrente no corpo humano não ultrapassar os **2 mA/m²**, 1/5 do valor mínimo para o qual há registo científico de efeitos fisiológicos, reversíveis e não nocivos.
2. A ICNIRP, e com ela a OMS, considera que o referido limite básico é garantido se não forem ultrapassados os seguintes **valores de referência** para os campos eléctrico e magnético, respectivamente, em qualquer ponto do corpo de pessoas a eles expostas:
 1. Para o campo eléctrico E: **5 kV/m**
 2. Para o campo magnético B: **100 µT**

3.4. LIMITAÇÕES PRÁTICAS DECORRENTES da PORTARIA 1421 DE 2004.

Os limites da ICNIRP relativos ao campo **magnético** têm pouco efeito prático sobre o uso da electricidade, dado que muito dificilmente são alcançados por quaisquer dispositivos emissores.

O impacto mais substancial no que respeita às linhas de energia, porém, é o do limite do **campo eléctrico**. Muitas linhas de transmissão em Muito Alta Tensão, acima de 220 kV, têm campos eléctricos nos corredores de passagem superiores aos valores de referência da ICNIRP. A ICNIRP não prevê qualquer excepção e, por isso, o cumprimento estrito dos seus limites requer que as companhias de electricidade ou reduzam os campos eléctricos, modificando as suas linhas da transmissão, ou tenham que impedir o acesso do público aos corredores de passagem.

Para os **campos magnéticos**, alguns dispositivos de segurança (como os detectores de metais) ou industriais poderão também exceder os limites da ICNIRP. Uma estreita proximidade a alguns quadros eléctricos ou transformadores pode também tornar-se problemática, face aos limites definidos pela ICNIRP, assim como as condições de trabalho na proximidade de aparelhos de ressonância nuclear magnética.

4. EFEITOS CRÓNICOS DA EXPOSIÇÃO AOS CEMEBF: A ORIGEM DAS SUSPEITAS

4.1. INTRODUÇÃO

Como vimos, a Ciência só detecta experimentalmente algum efeito fisiológico no sistema nervoso central do corpo humano para correntes eléctricas com densidades acima de 10 mA/m^2 , correntes essas que só podem ser induzidas por campos externos à frequência industrial de pelo menos $500 \mu\text{T}$ no caso dos magnéticos, e 25 kV/m no caso dos eléctricos. Tais valores de campo magnético são extraordinariamente difíceis de se observar na prática, e os de campo eléctrico só são possíveis na proximidade estreita de linhas aéreas de Muito Alta Tensão.

Porém, a possibilidade da exposição a CEMEBF de baixa intensidade, muito inferior àqueles valores, aumentar o risco de **cancro**, foi sujeita a profusa investigação epidemiológica e experimental nas décadas de 80 e 90, com os seus resultados extensamente revistos por grupos de peritos internacionais.

Esta possibilidade foi identificada primeiramente por Wertheimer & Leeper em 1979 e foi encontrada subsequentemente num certo número de estudos epidemiológicos especificamente para a **leucemia infantil** e os **campos magnéticos** das correntes eléctricas residenciais. Tal identificação suscitou, nas décadas posteriores de 80 e 90, intensa investigação experimental e epidemiológica, a qual conduziu em 2002 a *International Agency for Research on Cancer* (IARC, integrada na OMS) à classificação dos campos **magnéticos** da corrente eléctrica como "*possivelmente carcinogénicos para os seres humanos*". Esta avaliação pela IARC da possível carcinogenicidade dos CEMEBF tem merecido particular relevância nos critérios de saúde ambiental, com grande impacto alarmista sobre a opinião pública.

No entanto, considerando os baixos níveis de energia das interações moleculares, a OMS considera fisicamente muito implausível que campos de extremamente baixa frequência causem danos genéticos directos (isto é, danifiquem as moléculas de ADN de que os genes são feitos). Contudo, tem sido teorizado que os CEMEBF poderiam agravar danos genéticos causados por outras fontes (por exemplo radicais endógenos), ou que interferências epigenéticas (não-genotóxicas) na transdução de sinais poderiam reforçar a formação do cancro. De facto, uma vez que o potencial maligno tenha sido estabelecido num tumor primário, a progressão da doença pode ser influenciada por outros factores, como a vigilância imunitária e a dependência

hormonal. Tem sido colocada a hipótese, por isso, de os CEMEBF poderem interferir com estes factores que desempenham um papel no desenvolvimento dos estágios finais da formação de tumores, mas nada foi confirmado até agora.

De qualquer forma, as considerações da IARC em 2002, mantidas pela OMS em 2007 face aos resultados de investigações posteriores, como se referirá adiante, e que serviram de base à classificação do campo magnético como “possivelmente cancerígeno”, resumem-se no seguinte, citando a própria OMS:

- “*Existe uma evidência limitada (sublinhados da OMS) para a carcinogenicidade humana de campos **magnéticos** de frequência extremamente baixa (CMEBF), em relação com a **leucemia infantil**.*”
- “*Não existe evidência adequada para a carcinogenicidade humana de campos **magnéticos** de frequência extremamente baixa em relação a qualquer outra forma de cancro.*”
- “*Não existe evidência representativa para a carcinogenicidade humana de campos eléctricos e magnéticos estáticos ou a muito baixas frequências (até 3 kHz).*”
- “*Não existe evidência representativa em experiências com animais de carcinogenicidade de campos **magnéticos** a muito baixas frequências.*”
- “*Não existem dados disponíveis relevantes sobre experiências de carcinogenicidade com animais e campos **eléctricos** a muito baixas frequências.*”

Estas cinco conclusões conduzem ao seguinte sumário:

- Os campos **magnéticos** de extremamente baixas frequências são possivelmente carcinogénicos para os seres humanos (grupo 2B).
- Os campos **eléctricos** de extremamente baixas frequências não são classificáveis quanto à carcinogenicidade humana (grupo 3).

Note-se que, na semântica da IARC, a expressão “*evidência **limitada** de carcinogenicidade*” significa que foi observada uma **associação** positiva para a qual é considerada credível uma interpretação causal, mas que o acaso, o enviesamento ou a confusão nos estudos que estabeleceram essa associação não podem ser excluídos com um grau de confiança razoável.

A expressão “*inexistência de evidência representativa de carcinogenicidade*” indica que ou os estudos subjacentes são de insuficientes qualidade, consistência ou significado estatístico, ou que não existem quaisquer dados para permitirem uma conclusão.

Para uma melhor noção do significado da classificação da IARC, note-se que os

CMEBF emparelham em perigosidade atribuída com agentes como o café ou os vegetais de conserva e, na verdade, a classificação de “possibilidade” de carcinogenicidade significa apenas que não está provado que sejam inócuos.

É ainda de sublinhar, de novo, que a classificação da IARC para os CEMEBF, ratificada pela OMS, se aplica apenas à **leucemia infantil** e aos campos **magnéticos** e que, como veremos, até ao momento não se encontrou qualquer comprovação laboratorial disso, resultando tal associação apenas de estudos epidemiológicos de interpretação estatística polémica.

4.2. ESTUDOS EXPERIMENTAIS SOBRE OS EFEITOS CRÓNICOS DOS CEMEBF DE MUITO BAIXA INTENSIDADE, NOMEADAMENTE CANCRO

Dos numerosos mecanismos propostos para a interacção **directa** dos campos com o corpo humano, três surgem como operando potencialmente a níveis de campo interactivos: campos eléctricos induzidos em redes neuronais (que a experiência requer intensos, como vimos), radicais livres e magnetite. Porém, nenhum destes potenciais efeitos se verifica ocorrerem experimentalmente.

Outras interacções biofísicas directas dos campos, tais como a quebra de ligações químicas, forças sobre partículas carregadas e vários mecanismos de "ressonância" em estreitas larguras de banda, não são consideradas como podendo fornecer explicações plausíveis, para interacções, pelos níveis de campo encontrados nos ambientes públicos e ocupacionais.

No que diz respeito a **efeitos indirectos**, a carga eléctrica de superfície induzida por campos eléctricos pode ser percebida e pode resultar em micro-choques dolorosos ao se tocar num objecto condutor. Isto produz pequenos campos eléctricos, possivelmente acima dos níveis de ruído de fundo celular, na medula óssea. Porém, não há indícios de que isso apresente algum risco para a saúde.

Por outro lado, as linhas eléctricas de alta tensão produzem nuvens de iões electricamente carregadas como consequência do “efeito coroa”. Há sugestões de que essa ionização poderia aumentar o depósito de poluentes transportados por via aérea na pele e em vias respiratórias dentro do corpo, afectando possivelmente a saúde de forma adversa. No entanto, os cientistas da OMS consideram improvável que os iões do “efeito coroa” tenham mais do que um pequeno efeito, se tiverem, sobre os riscos de saúde a longo prazo, mesmo sobre os indivíduos mais expostos.

A OMS considera pois que nenhum dos três mecanismos directos considerados acima parece uma causa plausível de aumento de incidência de doenças, para os níveis de exposição geralmente encontrados por pessoas. De facto, só se tornam plausíveis para ordens de grandeza do valor dos campos 5 vezes mais elevadas, e os mecanismos indirectos não foram ainda suficientemente investigados. Esta ausência de identificação de um mecanismo plausível não exclui a possibilidade de efeitos adversos na saúde, mas cria a necessidade de evidências mais fortes provenientes da biologia e da epidemiologia.

Diversos estudos a longo prazo e em grande escala com roedores também não mostraram nenhum aumento consistente de qualquer tipo de cancro, inclusive tumores no sangue, mamários, do cérebro ou da pele.

Globalmente, portanto, e com base nas investigações usando modelos animais vivos, não há nenhuma evidência de que a simples exposição a CEMEBF cause tumores. Por outro lado, a evidência de que a exposição aos CEMEBF possa agravar o desenvolvimento de tumores em combinação com carcinógenos identificados (agravamento de tumores pré-existent) não é considerada adequada.

Finalmente, em geral os estudos dos efeitos da exposição de células *in vitro* a campos magnéticos de baixa frequência não mostram nenhuma indução de genotoxicidade para intensidades inferiores a **50 mT**. Há alguma evidência de que os campos magnéticos de baixa frequência poderão interagir com alguns agentes reconhecidamente prejudiciais para o ADN, mas não está demonstrada a sua irreversibilidade, nem há nenhuma evidência clara de activação dos genes associados ao controlo do ciclo de vida celular. Contudo, na opinião da OMS ainda têm de ser realizados estudos sistemáticos que analisem a resposta do genoma completo.

Muitos outros estudos celulares, por exemplo sobre proliferação celular, apoptose, sinalização por cálcio, comunicação intercelular, expressão proteica aos choques térmicos e transformações malignas, não produziram até **2007** senão resultados inconsistentes ou inconclusivos.

4.3. ESTUDOS EPIDEMIOLÓGICOS SOBRE OS EFEITOS CRÔNICOS DA EXPOSIÇÃO AOS CEMEBF

4.3.1. PATOLOGIAS DIVERSAS

Variadas patologias têm sido investigadas, combinando não só estudos epidemiológicos com investigações experimentais quer *in vitro*, quer *in vivo* com animais e pessoas, não se tendo concluído, até **Junho de 2011** e na opinião da própria OMS, que exista evidência adequada de correlação com CEMEBF, nomeadamente em:

- Neuro-comportamentos, como a depressão e o suicídio;
- Sistema neuro-endócrino, nomeadamente a produção de melatonina, que tem sido correlacionada com o cancro da mama;
- Patologias neuro-degenerativas, nomeadamente as doenças de Parkinson e Alzheimer, assim como a esclerose múltipla;
- Imunologia e hematologia;
- Reprodução e desenvolvimento.

Por outro lado, e relativamente quer às **doenças cardiovasculares**, quer ao **cancro da mama**, a acumulação recente de estudos permite à OMS afirmar (em 2007) a inexistência de qualquer correlação entre CEMEBF e essas patologias.

Tem sido relativamente ao **cancro**, porém, que têm sido colocadas as maiores suspeitas de correlação patológica entre os CEMEBF e a saúde pública, nomeadamente desde que a IARC classificou o campo magnético como “*possivelmente carcinogénico*”, em 2002.

Ora, como nota a própria OMS, a classificação da IARC foi pesadamente influenciada pelas associações observadas em estudos epidemiológicos no que respeita à **leucemia infantil**. Esta associação será, por isso, analisada com maior detalhe no seguimento. Entretanto e relativamente à **leucemia em adultos e ao cancro do cérebro**, únicas formas de cancro para os quais houve a extensão de suspeitas de correlação com os CEMEBF que justificassem investigações, os novos estudos publicados depois da monografia de 2002 da IARC não alteram a conclusão de que a evi-

dência total para uma associação entre os CEMEBF e o risco destas doenças permanece não representativa.

Vale a pena, portanto e para terminar, considerar com algum detalhe os estudos epidemiológicos relativos à **leucemia infantil** e que conduziram a IARC à classificação do campo magnético como “possivelmente carcinogénico”. No que se segue, a avaliação apresentada dos referidos estudos baseia-se essencialmente na avaliação da própria OMS.

4.3.2. LEUCEMIA INFANTIL: ESTUDOS INTERNACIONAIS

Tal como já foi mencionado em 4.1, tudo começou com o estudo publicado em **1979**, por Nancy Wertheimer e Ed Leeper, no Colorado, EUA. Nancy, uma epidemiologista que acabava de regressar ao serviço após uma interrupção de 6 anos, recebeu como sugestão a procura de factores ambientais correlacionáveis com leucemia infantil. Nancy obteve a lista de todas as crianças falecidas com essa doença no Colorado entre 1950 e 1969 (nessa época ainda não se tinham desenvolvido os tratamentos modernos da doença que permitem reduzir a sua taxa de mortalidade para os actuais 15 a 30%), e fez um levantamento sistemático **visual** da localização das suas habitações, viajando no seu próprio automóvel e trabalhando a expensas próprias. A dada altura Nancy notou que na proximidade das casas (tipicamente vivendas, no Colorado) havia em regra linhas eléctricas e pequenos transformadores, como é usual nos EUA, e ocorreu-lhe que pudesse haver uma relação. Nancy Wertheimer avaliou os 155 casos de leucemia infantil registados, dos quais 92 associados a configurações de circuitos de baixa intensidade de corrente eléctrica e 63 a circuitos de alta intensidade, e concluiu que havia uma relação de causa e efeito.

Note-se que a classificação dos condutores eléctricos não se baseou na medida dos campos por eles gerados nos locais onde viviam as crianças na altura em que adoeceram, mas apenas no seu tipo, nomeadamente nível de tensão, espessura e proximidade das residências. Na verdade, no Colorado é usual montar-se um pequeno transformador sobre um poste nos cantos dos quarteirões para cada duas casas (vivendas) e é também comum a distribuição em linha aérea pelas ruas das povoações, e o que Nancy terá verificado é que parecia haver um maior número de casos da doença, cuja epidemiologia investigava, nas casas mais próximas desses postes.

Nancy Wertheimer inventou então um sistema de classificação da “proximidade magnética” das casas relativamente às linhas, que seria mais tarde aperfeiçoado por outros investigadores e se tornaria o método de referência utilizado nos estudos

subsequentes realizados nos EUA, a denominada classificação por “*wire codes*”.

O estudo não forneceu nenhuma estimativa de risco relativo; por outro lado, e pelo próprio método utilizado (*wire codes*), também não estabeleceu uma relação quantificada entre a incidência da doença e uma avaliação da exposição aos CEMEBF. Na década subsequente Wertheimer promoveria diversos estudos similares que pretendiam associar os campos magnéticos das linhas de energia a diversas patologias, incluindo o aborto espontâneo, tornando-se uma notória militante anti-“radiações electromagnéticas”. Por estas razões, embora pioneiro, o estudo foi considerado como meramente gerador de hipóteses e merecendo pouco crédito científico, pelo que o assunto não viria a ser retomado senão 9 anos depois.

Em 1988 Savitz et al, do Departamento de Epidemiologia da Universidade da Carolina do Norte nos EUA, realizaram um novo estudo, envolvendo 356 casos de leucemia e linfoma, na mesma região do Colorado onde Nancy trabalhara, usando telefonemas aleatórios como forma de pesquisa. A sua investigação encontrou um aumento da taxa de incidência de leucemia e também de outras formas de cancro para cerca do dobro na proximidade das linhas AT, mas não sabemos quantos casos ao certo foram contabilizados. No entanto, os próprios autores reconheceram que a percentagem de colaborações com os inquéritos fora pequena e que isso poderá ter enviesado gravemente os resultados, visto tenderem a responder mais as pessoas que achavam terem razões de queixa. Este estudo mereceu uma maior credibilidade à comunidade científica, despoletando um grande número de estudos epidemiológicos de extensão e qualidade crescentes.

Em 1991, London & al, todos académicos do Departamento de Medicina preventiva da Escola de Medicina da Universidade da Califórnia do Sul, realizaram um novo estudo, no Condado de Los Angeles, EUA, sobre 164 casos de leucemia em menores de 10 anos, na verdade 70% dos registados no Condado entre 1980 e 1987.

Os casos investigados corresponderam àqueles cujas famílias aceitaram responder telefonicamente e recorreram a medidas dos campos em alguns dos casos, aqueles onde foi obtida permissão para o efeito; nos casos restantes os investigadores recorreram ao método dos “*wire codes*” para estimar a intensidade dos campos. As conclusões expressas pelos autores foram a impossibilidade de estabelecer uma relação entre **o valor dos campos** medidos e a incidência da doença, mas que haveria uma relação entre esta e a **proximidade** de condutores, usando a mesma classificação de Nancy (*wire codes*), assim como, segundo os próprios autores, com o uso de electrodomésticos de potência elevada. Os autores procuraram proceder a uma avaliação estatística dos intervalos de incerteza. Segundo a apreciação da OMS, esta foi uma

análise bem adaptada, mas carecendo de ajustes extra e para a qual a baixa taxa de respostas, assim como o desconhecimento da exposição dos sujeitos que recusaram responder, coloca sérias dúvidas quanto ao valor estatístico dos resultados. Acresce a esta apreciação o facto de os resultados obtidos por medida directa dos campos e por proximidade aos condutores serem diferentes.

Em 1997, Martha Linet, do Instituto Nacional do Cancro dos EUA, alargou os estudos realizados no Colorado em 1979 e no condado de Los Angeles em 1991 a nove estados do Nordeste dos EUA, obtendo assim uma amostra populacional muito maior do que nas anteriores investigações nos EUA. O estudo, que criticava aos anteriormente realizados no país os longos lapsos de tempo registados entre a vivência na proximidade das linhas e o diagnóstico da doença, foi no entanto realizado por inquérito telefónico, envolvendo 408 casos de leucemia. Porém, conforme a apreciação da OMS, a análise não terá sido ajustada para possíveis factores de confusão e teve uma relativamente baixa taxa de respostas. Os resultados alcançados contrariam os dos estudos anteriores, afirmando os seus autores **a ausência de correlação observada entre campos magnéticos e leucemia infantil**, visto o número de casos registados ser, até, ligeiramente inferior ao expectável na ausência de campos magnéticos.

Em 1999, McBride et al, funcionários de organismos estatais para a pesquisa sobre o cancro e de várias Universidades do Canadá, realizaram dois estudos sobre os casos de leucemia infantil ocorridos em 5 províncias, próximas de cidades, de 1990 a 1994 (até 1995 no Quebec e na Colúmbia Britânica). Os estudos basearam-se também no inquérito pessoal, por carta e/ou telefone, o que lhe faz merecer a apreciação pela OMS de que terá sido uma análise bem ajustada para todos os factores de confusão mas com uma baixa taxa de respostas para o estudo baseado na medida directa dos CEMEBF e, portanto, susceptível de enviesamento. Tal como a investigação de Martha Linet, também aqui os resultados apontaram para **a falta de correlação entre campos magnéticos e leucemia infantil**.

Como conclusão verifica-se que os estudos norte-americanos de maior envergadura foram negativos no estabelecimento de uma associação entre a leucemia infantil (e outras formas de cancro) e os CEMEBF.

Entretanto, na Europa do Norte viriam também a realizar-se diversas investigações epidemiológicas ao longo dos anos 90 e posteriormente, mas todos usando métodos mais precisos de quantificação da exposição aos CEMEBF que os “*wire codes*”. Porém, e devido às diferentes práticas de construção das redes de energia europeias relativamente às norte-americanas, as populações relativas expostas a CEMEBF na

Europa são significativamente inferiores às americanas o que, combinado com populações também mais reduzidas, viria a caracterizar os estudos europeus pelos baixos números de doentes identificados.

Assim, em **1993**, Maria Feychting e Anders **Ahlbom**, investigadores epidemiologistas do Instituto Karolinska de Saúde Ambiental da Suécia, estudaram pela primeira vez a incidência relativa da leucemia infantil nos corredores de linhas áreas de alta tensão. A base do estudo consistiu em **todas** as crianças menores de 16 anos que tivessem vivido em propriedades situadas a menos de 300 metros de qualquer das linhas aéreas de 220 e 400 kV da Suécia, durante o quarto de século decorrido de 1960 a 1985. Os sujeitos foram seguidos desde a sua entrada na base de dados do estudo até 1985.

Foi identificado um total de 142 casos de cancro nestas condições, através de uma ligação ao registo sueco de cancros; destes, **39** casos eram de leucemia e 33 de tumores do sistema nervoso central. A exposição foi avaliada por medidas de campo pontuais e por cálculos dos campos magnéticos gerados pelas linhas de energia, examinando as distâncias, as configurações das linhas e os consumos. As conclusões foram que, embora não se identificasse qualquer correlação entre incidência de tumores cerebrais e outras formas de cancro e os CEMEBF, essa correlação se verificava para a **leucemia**. Concretamente, porém, os resultados apontam para uma **duplicação** da incidência da patologia para campos magnéticos superiores a **0,1 μ T**, mas os próprios autores reconhecem que a amostra em causa é pequeníssima: um total de 11 casos, apenas, e que, segundo os valores esperados, deveria ser de apenas 5, mas que se situam em intervalos de incerteza onde também cabe o valor de 1.0, ou seja, o de não haver aumento de incidência!...

É de notar que a Suécia é um país com uma população de 9 milhões de habitantes, um número próximo do de Portugal. Ora, em termos absolutos o que esta investigação afirma é que em todo o país, ao longo de 25 anos, podem ter ocorrido 6 casos adicionais de leucemia infantil devido às linhas de Muito Alta Tensão, em média um caso em cada quatro anos...! Mas mesmo este pequeno número é estatisticamente muito incerto, devido à pequenez da amostra, e com 95% de confiança o que se pode afirmar, apenas e de facto, é que os 11 casos registados tanto podem ter sido 3 a menos do que o expectável sem as linhas, como 9 casos a mais...

Muitos outros estudos em pequenos países europeus foram realizados, todos com números pequeníssimos e com duvidoso valor estatístico, sendo de notar no entanto o realizado em 1999, pelo “Estudo para o Cancro Infantil no Reino Unido”, ou UKCCS. Este realizou uma investigação em larga escala sobre os cancros infantis em

todo o Reino Unido (um país com população muito maior que os anteriores europeus), debruçando-se sobre um total de 1073 casos de leucemia infantil, de entre um total de 3838 casos de cancro infantil registados no país, e que foram investigados quanto à sua proximidade relativamente a linhas de energia. Os resultados deste estudo apontam para uma **correlação negativa** para campos magnéticos inferiores a $0,4 \mu\text{T}$ (entre $0,1\mu\text{T}$ e $0,4 \mu\text{T}$ seriam de esperar, na ausência de linhas, 117 casos, e com estas só se observaram 94), e positiva em cerca de 70% para campos acima de $0,4 \mu\text{T}$: seriam de esperar 3 casos e observaram-se 5... mas, na verdade, os 5 casos observados tanto poderão ter sido 4 a mais como 7 a menos do que o normal, segundo o próprio intervalo de confiança estimado.

Como estes resultados são contraditórios entre si, e de qualquer modo muito incertos devido à pequenez das amostras, a UKCSS concluiu simplesmente pela ausência de relação entre campos magnéticos e leucemia infantil.

4.3.3. AS ANÁLISES DE CONJUNTO QUE FUNDAMENTARAM A DECISÃO DA IARC EM 2002

Os estudos apresentados no sub-capítulo anterior são aqueles que, dos cerca de **quinze** realizados até 2001 (houve-os também na Finlândia e Nova Zelândia, além de mais alguns nos EUA), maior consideração mereceram à IARC para a sua decisão de considerar os campos magnéticos de extremamente baixa frequência como **possivelmente** cancerígenos. Como é patente, os seus resultados são em geral contraditórios e, sobretudo, com uma incerteza probabilística extremamente elevada, a qual resulta da pequena dimensão das amostras populacionais de leucemia infantil.

Na verdade, o grande obstáculo aos estudos epidemiológicos nesta doença é que a leucemia infantil é uma doença rara. É de notar que a maioria dos estudos realizados envolveram populações muito consideráveis de diferentes países e longos períodos de tempo, e mesmo assim as suas conclusões quase nunca permitem garantir com razoável confiança estatística (95% de confiança) que a incidência relativa da doença na presença de campos magnéticos não seja a unidade, isto é, a mesma que se verifica na ausência desses campos!

Conscientes deste problema, alguns dos autores citados resolveram colaborar na realização de análises conjuntas (*pooled analysis*), isto é, de trabalhos estatísticos que juntassem os resultados e as populações do maior número possível de investigações realizadas, de forma a somar populações de tal grandeza que permitissem produzir conclusões com menor incerteza estatística. Uma das análises conjuntas foi publi-

cada em 2000 e reuniu os resultados de 9 trabalhos.

Este resultado⁴ apresenta, como se pretendia, um intervalo de incerteza muito mais estreito. O universo abrangido contemplou 3247 casos de leucemia e mais de 10 mil de controlo, e 5 dos 9 estudos originais eram europeus e usaram, por isso, valores bem quantificados de exposição aos CEMEBF.

O intervalo de incerteza já se situa todo, neste estudo de conjunto, acima do valor de 1.0 e, de facto, os resultados que os autores estabelecem para a incidência relativa da leucemia infantil, como função da intensidade do campo magnético, são que a incidência relativa da leucemia infantil pouco aumentaria com a intensidade do campo magnético até **0,4 μ T**, mas para valores acima deste limiar praticamente duplicaria. Note-se, no entanto, que apesar da imensa população e dos muitos anos de observação abrangidos por este estudo conjunto, só foi possível identificar 44 casos de leucemia infantil em crianças expostas a tais campos e que, na ausência desses campos seriam de esperar, de qualquer forma, de 14 a 35 casos...

Os próprios autores deste estudo sublinham expressamente, nas suas conclusões, que não conhecem explicação para os resultados obtidos e que estes podem ter sofrido de algum enviesamento no tratamento das amostras populacionais, recusando assim uma relação causal entre os campos magnéticos e a leucemia infantil. De facto, dos cerca de 44 casos de leucemia associados a campos superiores a 0.4 μ T por este estudo de conjunto, 30 provieram dos estudos de Linet nos EUA e McBride no Canadá, onde a percentagem de população exposta a campos magnéticos elevados é muito superior à europeia, apesar de Linet reconhecer que tendo os seus inquéritos sido realizados por telefone, aceitaram participar neles 78% das famílias das crianças leucémicas, mas apenas 63% das que o não eram ("controlos")⁵, o que aliás suscitou da própria OMS algumas críticas...

Entretanto, é de notar que enquanto nos relatórios de Linet e de McBride se concluía pela ausência de associação entre os CEMEBF e a leucemia, usando como medida da exposição os "*wire codes*" e também medidas directas no estudo de McBride, quando esses resultados foram reprocessados para serem adaptados à métrica comum europeia, visando a integração no estudo de conjunto, passaram a já dar uma associa-

⁴ "A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia", 2000, British Journal of Cancer, tem como co-autores, entre outros, os primeiros autores de 6 dos 9 trabalhos realizados até à altura e considerados relevantes pela IARC, e aqui já referidos.

⁵ Marta S. Linet et al, "Residential Exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children", The New England Journal of Medicine, vol. 337, nº 1, July 1997.

ção positiva que se tornou, de resto, determinante nos resultados obtidos, dado o grande peso relativo dos trabalhos americanos! Visto que o reprocessamento dos dados originais de Linet e McBride envolveu alterações de critério quanto à classificação ou não de certos casos e de certos controlos, tal mereceu de diversos investigadores manifestações de estranheza, que foram mais tarde respondidas circunstancialmente⁶. Ahlbom, o autor principal da análise de conjunto, mostraria mais tarde que se, por exemplo, os dados originais do estudo nos EUA forem excluídos, a incidência relativa da leucemia para campos superiores a 0.4 μT baixa de 2.0 para 1.7⁷. Este exercício tem particular interesse por coincidir com os resultados da outra análise de conjunto realizada pela mesma época (2000).

Com efeito, foi realizado outro trabalho⁸, nesse ano, envolvendo 16 estudos de base, mas merecendo da OMS menor credibilidade que os desta na escolha dos estudos parcelares de suporte, talvez por o seu tratamento matemático ter sido aparentemente rebuscado e de difícil compreensão, ou talvez por o autor do outro estudo (Ahlbom) pontificar no grupo de trabalho da ICNIRP e da OMS. Na verdade, para se poder combinar diferentes estudos é necessária a definição de uma métrica comum, o que requer a colaboração dos vários autores de modo a que reformulem os seus dados; ora Sander Greenland, um conceituadíssimo professor de epidemiologia da Universidade da Califórnia em Los Angeles (UCLA) não conseguiu a colaboração, para o seu estudo de conjunto, de alguns dos autores dos trabalhos originais de maior relevância. No entanto, as suas conclusões são similares às da outra análise de conjunto: acima de 0,3 μT a incidência relativa de leucemia infantil seria de 1,65, resultado extrapolado do facto de se terem identificado 98 casos onde seriam de esperar entre 42 e 85...

Foram estas duas análises de conjunto que fundamentaram a decisão da classificação atribuída aos CEMEBF pela IARC em 2002 e, portanto, também pela OMS, de **possivelmente carcinogénicos**.

⁶ Elwood, "Childhood leukemia and magnetic residential fields: are pooled analysis more valid than the original studies?", *Biometrics* 27:112-118, 2006. Este autor estranha, fundamentando-se nos dados dos próprios relatórios, que apesar de 6 dos 9 estudos originais concluírem pela inexistência de associação entre leucemia e campos magnéticos, a análise de conjunto conclua pela sua existência, questionando os critérios de reprocessamento dos dados que uniformizaram a respectiva métrica e, em regra, aumentaram a incidência relativa da doença na presença dos CEMEBF.

⁷In apresentação de Ahlbom no *Workshop* sobre CEMEBF promovido pelo "projecto ELF" da OMS, Genebra, Suíça, Junho de 2007.

⁸ Greenland et al, "A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia", *Epidemiology*, 2000.

4.4. DISCUSSÃO CIENTÍFICA DOS RESULTADOS EPIDEMIOLÓGICOS RELATIVOS À LEUCEMIA INFANTIL LINFOBLÁSTICA AGUDA.

4.4.1. OS CRITÉRIOS DE BRADFORD HILL DE 1965

De acordo com os denominados “*critérios Bradford Hill de 1965*”, os quais são largamente aceites pela comunidade médica, um estudo epidemiológico só pode indicar uma **relação** e não, em geral, uma causalidade.

Ainda de acordo com os referidos critérios, para que um estudo epidemiológico possa ser aceite como indicando **causalidade**, é necessário que a relação observada verifique nove critérios, dos quais os cinco mais relevantes são:

- 1) **Consistência e não enviesamento dos resultados:** Confirmação da associação por investigadores diferentes, em populações diferentes, usando métodos diferentes.
- 2) **Força da associação**, que inclui dois aspectos: a frequência com que o factor é encontrado na doença, e com que ocorre na ausência da doença. Quanto maior o risco relativo, mais a hipótese é reforçada. A maioria dos epidemiologistas considera que só um factor de 3 ou mais⁹ tem significado estatístico na incidência relativa em estudos epidemiológicos, e alguns defendem que um limiar inferior a 2 é “lixo científico”¹⁰...
- 3) **Gradiente biológico (relação entre a dose e a resposta):** encontrando um relacionamento quantitativo entre o factor e a frequência da doença. A intensidade e a duração da exposição devem poder ser medidas.
- 4) **Especificidade:** se o factor determinante que está a ser estudado puder ser isolado de outros, e se se puder mostrar que produz mudanças na incidência da doença. Por exemplo, se se puder mostrar que o cancro da tiróide tem uma incidência mais elevada associada especificamente com o fluoreto, isto é convincente da evidência de uma causalidade.

⁹ No tabagismo activo, por exemplo, a incidência relativa é da ordem de 20 para o cancro pulmonar. Para os Abetos (amianto), a incidência relativa no cancro da pleura e peritoneu (mesotelioma) é da ordem de 10, embora este cancro seja ainda mais raro que a leucemia infantil (1/3 da incidência geral desta).

¹⁰Fact sheet nº 8 da Agência para a Segurança Nuclear e Protecção da Radiação, do Governo Australiano, “*The controversy over electromagnetic fields and possible adverse health effects*”, 2005.

- 5) **Coerência com a base biológica e o conhecimento precedente:** a evidência deve ajustar-se aos factos que se pensam estar relacionados. Por exemplo, o aumento de incidência de fluorose dental e o aumento de consumo de fluoreto são coerentes.
- 6) **Plausibilidade biológica:** a associação estatisticamente significativa ajusta-se bem ao conhecimento previamente existente.

Ora é bastante claro que, mesmo admitindo a existência de alguma relação estatística entre os campos electromagnéticos das linhas de Muito Alta Tensão e a leucemia infantil, não é possível no estado presente das investigações, como foi aqui apresentado, afirmar com clareza a **consistência** das observações por diferentes autores, nem aforça da relação entre os campos e a doença convincente, nem a **plausibilidade biológica** dos campos provocarem danos no ADN celular, nem a **coerência com o conhecimento pré-existente**, nem, sobretudo, a **especificidade** dos campos como factor da leucemia infantil¹¹. É por isso que a IARC e a OMS consideram possível a carcinogenicidade do campo magnético, mas não como estando estabelecida nem sequer sendo provável!

4.4.2. ALGUNS FACTOS SOBRE A LEUCEMIA INFANTIL

Valerá a pena, pelo exposto, juntar por isso a este relatório alguma informação sobre a etiologia da **leucemia infantil**.

A leucemia infantil é uma doença rara. Para crianças com menos de 15 anos de idade, o número estimado de novos casos mundiais de leucemia, no ano 2000, foi de aproximadamente 49 000, traduzindo uma taxa da incidência de aproximadamente 3 casos por cada 100 000 jovens (IARC, 2000).

Alguns autores notam que, mesmo admitindo que os CEMEBF fossem responsáveis por de 0,2% a 0,8% dos casos de leucemia infantil (conforme os diferentes estudos que o indiciam), isso corresponderia a um **total mundial** de 100 a 500 casos, o que é considerado pouco expressivo, tendo ainda em conta a incerteza de causalidade nesta relação.

Entretanto, na América do Norte a incidência da doença é 50% superior à registada na Ásia, por exemplo. De facto, há diferenças marcantes nas taxas de leucemia entre vários grupos regionais e étnicos. Nos EUA, as taxas mais elevadas observam-se

¹¹ A. Preece et al, do Centro Oncológico da Universidade de Bristol et al, "Power frequency electromagnetic fields and health. Where's the evidence?", Physics, Medicine and Biology journal, Abril de 2000.

entre hispânicos em Los Angeles e entre filipinos, chineses e japoneses na Califórnia e no Havai. As taxas **médias** mais elevadas ocorrem, porém, entre caucasianos; para afro-americanos, as taxas são significativamente inferiores. A relação entre brancos e negros nas taxas totais de incidência da leucemia é aproximadamente de **2**, para vários grupos de idade. Dentro dos EUA, por outro lado, há claras diferenças **regionais**, com as incidências a variarem entre **2.2 e 5.6** por 100 000 nos rapazes e entre **1.4 e 6.3** por 100 000 nas raparigas (em todas as regiões a leucemia infantil é 10 a 50% mais frequente nos rapazes).

As comparações internacionais das taxas totais de incidência da leucemia infantil mostram uma variabilidade de **4 a 6 vezes**. As mais elevadas, com 6 casos por 100 mil por ano, verificam-se na Costa-Rica e na população não-Maori da Nova Zelândia. Também se verificam taxas elevadas de incidência nos países escandinavos, na Austrália, em Hong-Kong e nas Filipinas. As taxas mais baixas ocorrem na Índia, no Kuwait e entre crianças negras em África. Embora as taxas absolutas variem, a relação da incidência entre sexos e diferentes idades é similar nos vários países, excepto que o máximo de incidência na distribuição por idades é aparentemente ausente nas crianças africanas.

Em Portugal, a mortalidade infantil anual por leucemia e linfomas tem sido em média de 19 óbitos em 1650 000 crianças (**1.15** por 100.000) mas, em Lisboa e Vale do Tejo, parece ser significativamente superior à do resto do país¹².

No conjunto, a leucemia infantil contabiliza cerca de 1/3 de todos os cancros infantis, e tem uma taxa de incidência típica de 1 caso, ao longo de toda a infância, por cada 1400 a 3000 crianças.

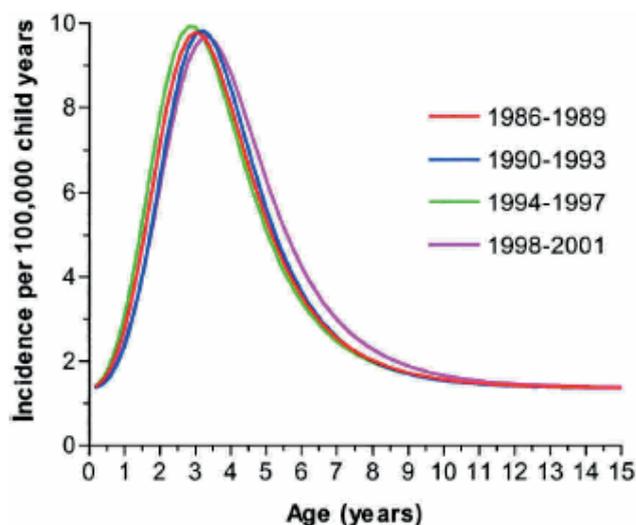
Entretanto, as taxas de incidência de leucemia infantil têm uma distribuição padrão característica, dependente da idade, e que é ilustrada na figura 4.4. Esta evolução típica tem levado à convicção com evidências crescentes de que o processo de iniciação da leucemia infantil começa, de facto, ainda *in utero*.

¹² Brochuras da Direcção-Geral de Saúde, “Risco de Morrer em Portugal” de 2003, 2004 e 2005.

Verifica-se, também, que a doença tem uma significativa variabilidade no tempo, quer ao longo da história do século XX, quer sazonalmente em cada ano, e alguns estudos epidemiológicos notaram uma correlação significativa entre o aumento de incidência da doença e a melhoria das condições de higiene das populações.

Figura 4.1: Variação com a idade do diagnóstico da leucemia infantil. A maioria dos casos é diagnosticada dos 2 aos 5 anos de idade.

Do conjunto de todos estes dados resultou nos últimos anos a convicção, dominante entre os investigadores epidemiológicos, da existência de uma elevada probabilidade de a causa mais frequente da leucemia infantil linfoblástica aguda ser um



agente infeccioso ainda desconhecido (provavelmente um vírus), reforçado por uma propensão genética, e para o qual a melhoria das condições de higiene tende a reduzir as defesas imunológicas das crianças, como sucede com outras patologias.

Recentemente¹³ a hipótese de uma mutação genética *in-utero* relativamente comum, atingindo cerca de 1% das crianças, precursora da promoção posterior e malignação a ocorrer nos 2 ou 3 primeiros anos de vida, foi confirmada e os respectivos genes identificados. Esta promoção da leucemia ocorre em cerca de 5% das crianças portadoras da mutação inicial e há fortes indícios de estar associada a uma resposta desadequada a agentes infecciosos comuns, porventura resultante de uma imaturidade do sistema imunológico, porquanto tende a ocorrer mais em crianças criadas em ambientes protegidos de contágios (frequência tardia de infantários) e assépticos (famílias mais abastadas).

Como é que o campo magnético poderá contribuir para reforçar a desadequação da resposta imunitária a um agente infeccioso inoculado nos primeiros meses de vida,

¹³ Dengli Hong et al, "Initiating and Cancer-Propagating Cells in TEL-AML1-Associated Childhood Leukemia", Science, Janeiro 2008.

promovendo o desenvolvimento das células malignas daí resultantes, é desconhecido!

É de notar, entretanto, que a leucemia infantil é hoje em dia uma doença tratável. A probabilidade total de sobrevivência ao fim de 5 anos tem melhorado com cada nova geração de tratamentos, embora persistam diferenças associadas à etnicidade (ou estatuto socioeconómico subjacente). Na década de 1990-1999, nos EUA, a sobrevivência ao fim de 5 anos era de 84% para as crianças brancas. Em Portugal, os dados mais recentes apontam para uma taxa de sobrevivência de apenas 70%, denotando um infeliz atraso do sistema nacional de saúde e que também ainda atinge a generalidade das outras formas de cancro. Aliás, a incidência de leucemia infantil é difícil de quantificar em Portugal devido à falta de estatísticas, mas pode admitir-se que seja similar à de Espanha, da ordem dos **3.4** casos por cada cem mil crianças¹⁴.

Vale a pena ainda esclarecer por que, como tem sido patente ao longo deste estudo, a preocupação dominante das investigações que têm procurado uma relação causal entre as linhas de Alta Tensão e a leucemia infantil se tem centrado no campo **magnético**, e não no eléctrico. A razão é que este último não consegue atravessar as paredes dos edifícios nem, facilmente, a própria pele humana, enquanto o campo magnético o consegue. Claro que esta diferença só tem importância se, como se tem pressuposto, se atribuir aos campos electromagnéticos um efeito **directo** sobre a incidência da doença, e não um efeito indirecto como o da ionização do ar pelo efeito-coroa...

Ora os campos magnéticos estão também presentes no ambiente doméstico, como fruto dos electrodomésticos e circuitos eléctricos de Baixa Tensão aí existentes, como já foi referido na introdução deste trabalho. Aceita-se, porém, que o efeito destes aparelhos é intermitente e que o valor médio doméstico é baixo, da ordem dos 0,03 a 0,07 μT na Europa, e 0,05 a 0,11 μT na América do Norte, sendo aceite que estes campos podem atingir, dentro da normalidade, até 0,2 μT .

Entretanto, existem outras fontes de campo magnético apreciável no ambiente usual. Por exemplo, em 1993 foram medidos campos de até **0,21 μT** a 50 cm dos monitores de computadores pessoais em 150 escritórios.

No **domínio dos transportes**, um campo magnético recentemente identificado é o produzido pelas cintas em aço de reforço dos pneus radiais dos **automóveis**, os quais tendem a magnetizar-se e que, ao rodarem, geram campos magnéticos com

¹⁴ On-line em “Automated Childhood Cancer Information System”.

frequências fundamentais de 20 Hz (às velocidades máximas legais) e com um alto conteúdo harmónico. Ao nível dos assentos o campo atinge de **2 a 5 μ T**, havendo estudos indicativos de que os valores máximos são alcançados ao nível dos pés dos passageiros da frente e das ancas dos passageiros dos bancos traseiros, especialmente em carros pequenos...¹⁵

Também nos **comboios** eléctricos, especialmente nos de alta velocidade, o campo magnético é muito intenso, atingindo vários μ T. Em algumas estações de comboios francesas chegaram a ser medidos campos de algumas **dezenas de μ T** nas plataformas de espera dos passageiros.

4.4.3. EXTRAPOLAÇÃO PARA PORTUGAL DO NÚMERO DE PATOLOGIAS ASSOCIÁVEIS AOS CEMEBF, SE SE CONFIRMASSEM AS SUSPEITAS EPIDEMIOLÓGICAS

Uma questão pertinente é a de quantos casos patológicos serão extrapoláveis para Portugal, caso porventura se confirmem as suspeitas epidemiológicas sobre a associação entre CEMEBF e leucemia infantil linfoblástica aguda. A essa questão tentaremos responder agora.

Em primeiro lugar temos de considerar o número de casos de leucemia infantil linfoblástica aguda observado em média em Portugal. Podemos usar dois processos: o primeiro é usar as estatísticas da Direcção-Geral de Saúde e do IPO, e o segundo é extrapolar dos números espanhóis (3.4 casos por cada 100 mil menores de 15 anos), e também se podem combinar os dois processos. Podem também usar-se os apuramentos realizados por organismos particulares, como a Fundação Rui Osário de Castro. O número a que se chega é de cerca de 50 por ano.

Como só 0,5% da população vive “magneticamente perto” das linhas de Alta e Muito Alta Tensão, isto conduz ao número de **uma leucemia infantil esperada, cada 4 anos**, “perto” dessas linhas e sem considerar qualquer efeito por estas. Admitindo que, como no estudo mais pessimista em que se baseou a IARC para a sua classificação dos campos magnéticos, estes **duplicam** a incidência da doença, então àquele caso normal teremos de adicionar outro, associado aos referidos campos.

Outra via para estimar o referido número é admitir que será semelhante ao calcu-

¹⁵ Milham, Hatfield & Tell, “Magnetic fields from steel-belted radial tires: Implications for epidemiologic studies”, Bioelectric Magnetism, Sep. 1999. Também Stankowski et al, “Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization”, Health Physics, Feb. 2006.

lado na Suécia pelo estudo epidemiológico ali realizado em 1993, considerando que esse país tem 9 milhões de habitantes, o que conduz ao mesmo número de **uma leucemia infantil cada 4 anos** associada às linhas de Alta Tensão.

Em segundo lugar temos de considerar a taxa de **mortalidade** da leucemia infantil, hoje em dia uma doença com uma elevada taxa de cura nos países mais desenvolvidos como a França ou os EUA. Nesses países, a taxa de cura (sobrevivência ao fim de 5 anos) é presentemente de 85%, mas alguns números apontam para que, em Portugal, ainda seja de só 60 a 70%.

Assim, se considerarmos o estado recente da medicina portuguesa, teríamos **uma morte esperável cada 12 anos**; mas se acreditarmos que ela vai melhorar no sentido da francesa teríamos **uma morte esperável cada 25 anos...!**

Para se ter uma ideia destes valores, vale a pena notar que o número anual de mortes de crianças (com menos de 15 anos), por **acidente**, em Portugal, é de cerca de **100**, dos quais 40 em acidentes de viação, e que o número de mortes por acidentes de trabalho com electricidade tem sido de **12**.

5. A POSIÇÃO DA OMS SOBRE OS EFEITOS CRÓNICOS DOS CEMEBF: ATITUDE PRECAUCIONAL E APELO A MAIS INVESTIGAÇÃO

A posição da OMS sobre os eventuais efeitos cancerígenos do campo magnético e, em geral, dos CEMEBF, é a seguinte (extraída da monografia publicada recentemente, em **Junho de 2007**):

*“Para além dos efeitos agudos estabelecidos, há incertezas sobre a existência de **efeitos crónicos** por parte dos Campos ElectroMagnéticos de Baixa Frequência (CEMEBF), devido às limitadas provas existentes sobre a relação entre a exposição aos campos magnéticos da corrente e a leucemia infantil. Por conseguinte, autoriza-se o uso de medidas precaucionais. 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.*

É razoável e autoriza-se que se realizem outros procedimentos precaucionais apropriados à redução da exposição. No entanto, a energia eléctrica comporta óbvios benefícios para a saúde, sociais e económicos, e as medidas precaucionais não os devem comprometer. Além disso, dada a fraqueza das provas de uma ligação entre a exposição aos campos magnéticos da corrente e a leucemia infantil, assim como o seu impacto limitado na saúde pública se houver essa ligação, os benefícios para a saúde da redução da exposição não são claros. Por conseguinte, os custos das medidas precaucionais devem ser muito baixos. Os custos da redução da exposição variarão de país para país, tornando muito difícil promover uma recomendação geral que equilibre os custos com o potencial risco dos CEMEBF.

Considerando o exposto, são feitas as seguintes recomendações:

- *Os políticos devem estabelecer **guias para a exposição aos campos electromagnéticos de baixa frequência** tanto para o público em geral, como para os trabalhadores. A melhor fonte de orientação, tanto para os níveis de exposição como para os princípios de avaliação científica, são os guias internacionais.*
- *Os políticos devem estabelecer um programa de protecção contra os CEMEBF que inclua **medições dos campos** de todas as suas fontes, de modo a garantir que os limites*

de exposição não sejam excedidos tanto para o público em geral, como para os trabalhadores.

- É razoável e autoriza-se a implementação de **procedimentos precaucionais de muito baixo custo para reduzir a exposição**, contando que os benefícios para a saúde, sociais e económicos da energia eléctrica não sejam postos em causa.
- Os políticos, os planificadores e os fabricantes devem implementar medidas de **muito baixo custo** ao construírem novas instalações e ao projectarem equipamento novo, inclusive electrodomésticos.
- Devem ser consideradas mudanças nas **práticas de engenharia** para reduzir a exposição aos CEMEBF gerados por equipamentos e dispositivos, desde que elas rendam benefícios adicionais, tais como uma maior segurança, ou um custo pequeno ou nulo.
- Quando se considerarem mudanças nas fontes existentes de CEMEBF, a redução dos CEMEBF deve ser considerada em simultâneo com os aspectos de segurança, fiabilidade e economia.
- As autoridades locais devem reforçar os regulamentos que tratem de cablagens, de forma a reduzir correntes à terra involuntárias na construção de novas instalações ou na recablagem de existentes, ao mesmo tempo que mantêm a segurança. Medidas pró-activas para identificar violações ou problemas em cablagens existentes seriam caras e provavelmente não justificadas¹⁶.
- As autoridades nacionais devem realizar uma estratégia eficaz e aberta de **comunicação** para permitir a tomada de decisões informadas por todas as partes interessadas; isto deve incluir informação sobre como podem os indivíduos reduzir a sua própria exposição.
- As autoridades locais devem **melhorar a planificação de instalações emissoras de CEMEBF**, incluindo uma melhor consulta entre a indústria, o governo local e os cidadãos, ao localizarem as fontes principais de emissão de CEMEBF.
- Os Governos e a indústria devem promover programas de investigação para reduzir a incerteza das provas científicas dos efeitos sobre a saúde da exposição aos CEMEBF.”

A OMS elenca também o conjunto de pesquisas científicas que considera prioritários como objecto dos programas de investigação recomendados, das quais se retiram as seguintes, a que é atribuída a importância primeira:

¹⁶ Esta recomendação aplica-se mais, sem dúvida, aos EUA, dada a natureza monofásica com regime de neutro distribuído que é ali usual nas redes de distribuição em Média Tensão.

- Estudos epidemiológicos:
 - Atualização das **análises estatísticas de conjunto** da incidência de leucemia infantil;
 - **Análises estatísticas de conjunto** sobre incidência de cancro infantil no cérebro;
- Outros estudos:
 - Desenvolvimento de modelos de ratos transgénicos para uso em estudos com Campos Magnéticos;
 - Avaliação de efeitos carcinogénicos com estudos *in vitro*;
 - Determinação de **limiares de resposta** dos campos eléctricos induzidos pelos CEMEBF **em sistemas multi-celulares**, usando estudos teóricos e *in vitro*.

Como se vê, a OMS não parece, presentemente, na disposição de rever a posição que a IARC tomou em 2002, ao apontar o campo magnético como um agente físico possível de eventuais aumentos de incidência da leucemia infantil.

Por outro lado, também a União Europeia possui organismos com posições definidas e revistas anualmente sobre esta questão. Assim, e por exemplo, o SCENIHR¹⁷ reafirmou em Março de 2007 no seu relatório “*Possible effects of EMF on Human Health*” a opinião de que se mantém a conclusão de que os CMEBF são possivelmente carcinogénicos, essencialmente no que respeita à leucemia infantil, mas que no entanto as investigações mais recentes permitem concluir pela improbabilidade da sua associação a doenças cardiovasculares e ao cancro mamário.

¹⁷ SCENIHR: *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks*. Pertence à Direcção-Geral de Protecção dos Consumidores e da Saúde da União Europeia. O presidente do SCENIHR é Ahlbom, que também dirige vários Grupos de Trabalho da OMS sobre os CMEBF.

6.MEDIDAS ADOPTADAS EM DIVERSOS PAÍSES

6.1. INTERNACIONALMENTE

Uma síntese recente¹⁸ aponta para a seguinte situação em diversos países, no que respeita à protecção contra os campos electromagnéticos por ordem crescente de exigência:

1. **Países sem política oficial definida:** Arménia, Uzbequistão, Cazaquistão, Mongólia, Bahrain, Índia, Malásia, Tailândia, EUA e Canadá;
2. **Países que estão a estudar a adopção das recomendações da ICNIRP:** em geral os da América Latina - Colômbia, Uruguai, Chile...
3. **Países que adoptaram de facto as recomendações da ICNIRP, mas que as não obrigam por lei:** Austrália, Nova Zelândia, Singapura, Coreia do Sul, Taiwan, Venezuela, Brasil, África do Sul, Lituânia, Bulgária, Dinamarca, Suécia, Luxemburgo, Malta, Bélgica, Irlanda, Holanda, Alemanha, França, Reino Unido e Espanha;
4. **Países que incorporaram as recomendações da ICNIRP na sua legislação nacional:** Áustria, Finlândia, Grécia e Portugal;
5. **Países que já tinham restrições mais severas que as recomendadas pela ICNIRP mas que se ajustaram a estas:** Estónia, Hungria, Noruega, Croácia e República Checa;
6. **Países com políticas mais exigentes que as recomendadas pela ICNIRP:** Rússia, Polónia, China, Japão e Argentina.

As listas anteriores referem-se ao posicionamento internacional no que diz respeito às recomendações quantitativas da ICNIRP de 1998 (portanto, contra os efeitos **agudos** dos campos electromagnéticos de baixa frequência), sendo de salientar que em alguns dos países referidos existem regiões com práticas diferenciadas, como é o caso dos EUA. É também notável o vanguardismo de Portugal na **formalização legislativa** das recomendações da ICNIRP, à frente da generalidade dos países euro-

¹⁸ S. Kandel, da Universidade de Jerusalém, "ELF Polices worldwide - Protection of General Public", Workshop da OMS em Genebra, Suíça, 20 e 21 de Junho de 2007.

peus, como a Espanha, França, Alemanha¹⁹, Reino Unido, Dinamarca, Suécia, Luxemburgo, Bélgica, Irlanda e Holanda...

Entretanto e indo mais longe, alguns países adoptaram também, ou estão em vias de adoptar, **políticas precaucionais** contra os eventuais efeitos **crónicos** dos campos electromagnéticos, ajustando-se à orientação da OMS exposta no capítulo anterior. Ou seja, políticas que visam acautelarem o alegado risco de **cancro** atribuído às linhas de Alta Tensão ou, pelo menos, corresponder aos medos públicos que lhe estão associados.

Um levantamento permite elencar os seguintes países e respectivas medidas, por ordem crescente de exigência técnica:

- **Rússia:** Tem como limite fixo para zonas de habitação, o valor de **50 μT** .
- **Eslovénia** (2006): Definiu como limite fixo para todas as **novas** instalações acima de 1 kV, o valor de **10 μT** .
- **Itália** (2003): embora adoptando os limites do ICNIRP (100 μT), definiu um “*objectivo de qualidade*” para **novas** instalações relativamente a habitações existentes, e para novas habitações próximas de linhas existentes, de **3 μT** .
Para instalações pré-existentes, adoptou um “*nível de atenção*” que verifique, para áreas sensíveis, se o campo magnético não ultrapassa, durante mais do que 4 horas/dia, o valor de **10 μT** .
- **Israel** (2001): Estabeleceu como recomendação, para **novas** instalações, que o campo magnético não ultrapassar em média diária, o valor de **1 μT** .
- **Suíça** (1999): Definiu um limite fixo para instalações em áreas sensíveis: **1 μT** . Adoptou limites precaucionais baseados no menor nível possível de exposição, tendo em conta considerações técnicas e económicas e isentando as novas instalações que tenham para isso razões técnicas ou económicas, e não é aplicável a instalações antigas que **optimizem a geometria dos condutores de fase**.

Note-se que qualquer destes países estabeleceu limites arbitrários para o campo magnético na vizinhança de locais públicos, o que a própria recomendação precaucional da OMS de Junho de 2007 considera não se justificar, face ao estado do conhe-

¹⁹ Na Alemanha existe uma ordem ministerial, a ordem BMT 306/97, que incorpora as recomendações da ICNIRP. A diferença entre tais recomendações estarem em normas técnicas ou em legislação governamental manifestar-se-á no potencial de litigação que poderão suscitar em tribunal.

cimento científico na matéria.

Um certo número de estados, entretanto, optou ou está em vias de optar por limitações nas **distâncias** de construção das instalações, nomeadamente:

- Na **Califórnia**, foram definidas distâncias mínimas para a construção de novas linhas na proximidade de escolas (e vice-versa), para tensões acima de 50 kV (por exemplo: de 50 a 133 kV, **33 m**; para 220-230 kV, **50 m**; para 500-550 kV, **120 metros**).
- Em **Israel**, não são concedidas licenças de construção para novas linhas a menos que estejam a pelo menos uma distância de: **35 m** para 400 kV; **20 m** para 161 kV; **3 m** para 110 kV e para de 11 a 36 kV; transformadores interiores: **3 m** de paredes partilhadas por quartos residenciais.
- Na **Irlanda**, a Companhia de Electricidade não constrói novas linhas de transmissão ou subestações a menos de 22 metros de edifícios pré-existentes nem permite a ninguém construir a menos dessa distância. Além disso, as autoridades locais não dão autorizações de construção para novas instalações de energia eléctrica na vizinhança de escolas ou de centros de saúde.
- No **Luxemburgo**, o Ministério dos Negócios internos recomenda que não se criem novas áreas residenciais na vizinhança das linhas aéreas de Alta Tensão (30 metros). Esta recomendação não restringe a construção em áreas residenciais já existentes.

Alguns estados têm adoptado soluções técnicas que passam por modificações na geometria das linhas e/ou pela elevação dos respectivos postes de sustentação, como o **Japão, a Califórnia e Israel**. Dois estados resolveram dedicar até **4%** do custo das instalações a medidas que reduzam a exposição pública aos CEMEBF: **Austrália e Califórnia**.

Um único país anunciou a adopção de uma política generalizada de passagem a cabo subterrâneo das linhas de Alta e Muito Alta Tensão, incluindo desde 2006 as de 400 kV: **a Turquia**.

Entretanto, em alguns países tem-se procurado desenvolver **análises de custo-benefício** que suportem uma escolha optimizada entre as opções existentes de medidas precaucionais, sendo de realçar os casos da **Holanda e do Reino Unido**. É à luz análises de custo-benefício que se apresentarão, na parte II, soluções técnicas para a redução da exposição pública aos CEMEBF no cumprimento das recomendações da OMS.

Entretanto e sumariando, pode constatar-se que as posições regulatórias mais exigentes em países da União Europeia são as italianas, que recomendam os limites de $3 \mu\text{T}$ (“*objectivo de qualidade*”) e de $10 \mu\text{T}$ (“*nível de atenção*”) para o campo magnético em, respectivamente, novas instalações e instalações antigas que sejam sensíveis do ponto de vista da exposição humana.

Fora da União Europeia são de registar os casos únicos da Suíça e de Israel (este de forma não taxativa) que definiram o limite de $1 \mu\text{T}$ para, respectivamente, instalações sensíveis e novas.

6.2. PORTUGAL.

Em Portugal a Assembleia da República promulgou, em 2 de Setembro de 2010, a lei nº 30/2010, com o título “*Protecção contra a exposição aos campos eléctricos e magnéticos derivados de linhas, de instalações e de equipamentos eléctricos*”.

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

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

Considerando que a regulamentação referida está por concretizar, mas sendo necessário, para que os trabalhos de investigação tenham um objectivo concreto e definido (e só por isso), estabelecer um valor que sirva de referencial técnico para os estudos de mitigação empreendidos, na parte II deste relatório, e entre várias opções, foi seleccionado o valor de $1 \mu\text{T}$ como referência.

**PARTE II: Medidas de mitigação da
exposição ao campo Electromagnético
emitido por equipamentos e
instalações da EDP em zonas de
ocupação humana**

1. METODOLOGIA NORMALIZADA DE PROJEÇÃO DAS MEDIDAS DE CAMPO VIRTUAIS

Como se viu na parte I, as medidas de mitigação que possam abranger os campos electromagnéticos de extremamente baixa frequência (CEMEBF) e, em particular, os campos magnéticos, dizem respeito a campos de baixa intensidade, muito inferiores aos limiares de **500 μ T** e **25 kV/m** associáveis à densidade de corrente de 10 mA/mm² para o qual foram registados efeitos fisiológicos agudos (reversíveis e não nocivos) no sistema nervoso.

Estes campos de muito baixa intensidade relativa são suspeitos, como vimos, de efeitos crónicos, continuados, eventualmente associáveis a um incremento de leucemia infantil linfoblástica aguda, uma doença rara de que haverá em Portugal uma incidência total de cerca de 50 novos casos por ano (e de que apenas cerca de 0,5% - um caso cada 4 anos - estará exposto a campos magnéticos acima da média residencial).

Dada a natureza crónica e continuada dos referidos efeitos, caso existam, as entidades normalizadoras internacionais definiram recentemente métodos de medida dos campos, em locais de eventual exposição pública, que têm em conta essa natureza.

Estes métodos estão essencialmente definidos na norma da Comissão Electrotécnica Internacional (CEI) e da CENELEC (tendo esta última capacidade vinculativa para Portugal), nº 62110, publicada a 1 de Dezembro de 2009. A norma **CEI/EN 62110: Measurement Procedures for Electric and Magnetic Field levels Generated by AC Power Systems with Regard to Human Exposure for overhead and underground lines**, resume o seu âmbito assim:

“This International Standard establishes measurement procedures for electric and magnetic field levels generated by AC power systems to evaluate the exposure levels of the human body to these fields. This standard is not applicable to DC power transmission systems.

This International Standard is applicable to public exposure in the domestic environment and in areas accessible to the public.

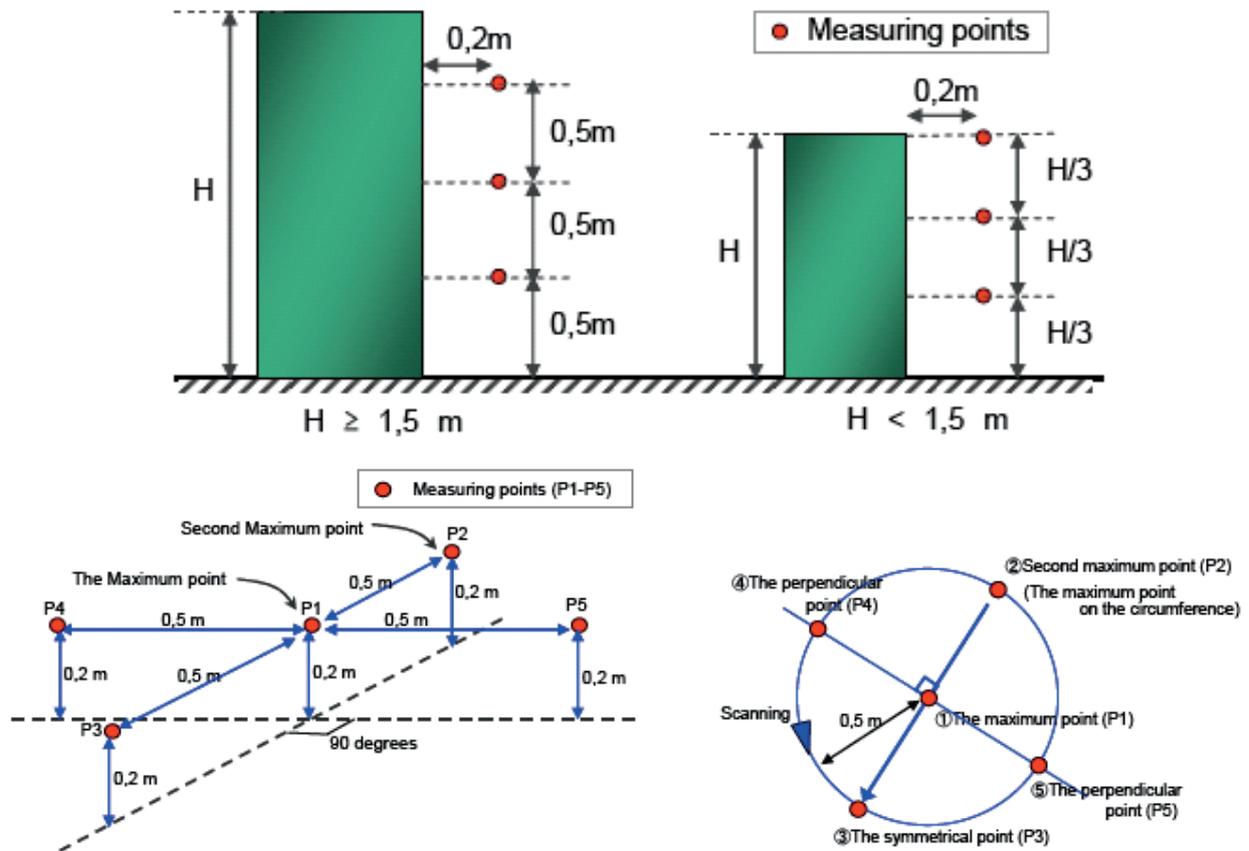
This standard specifies fundamental procedures for the measurement of fields, and, with regard to human exposure, for obtaining a field value that corresponds to a spatial average

over the entire human body."

As principais determinações da CEI/EN 62110 são:

- **Abrange os locais acessíveis ao público**, mas não os de acesso condicionado aos trabalhadores do sector (para estes existem outros projectos de normas);
- Visa a determinação de **médias espaciais** de campo no corpo humano, e não valores máximos pontuais, de acordo com o entendimento do **ICNIRP**;
- Define três regras de medida da média espacial de campo:
 - Baseada num **único ponto** de medida, se o campo for considerado uniforme, caso em que deverá ser situado à altura de **1,0 metro** relativamente ao solo ou soalho,
 - Baseada em **três pontos** de medida, se o campo for considerado não-uniforme, e 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.
 - Baseada em **cinco pontos** de medida, quando existam fontes de campo **sob** o solo ou soalho, e que deverão ser situados à altura de **0,2 metros** relativamente ao solo ou soalho. A determinação dos 5 pontos, que definirão um círculo, é feita como se ilustra na figura seguinte, a partir da busca do ponto de campo máximo que definirá o centro do círculo. O campo médio será a média aritmética dos três valores medidos em P1, P2 e P5 (na figura).
- Estabelece princípios para a determinação do ponto de **máximo campo eléctrico** à altura de **1,0 metro** do solo **sob linhas aéreas**, recordando que não há campo eléctrico mensurável nem na proximidade de cabos enterrados, nem de subestações; na proximidade de subestações, o campo sob as linhas aéreas deve ser medido segundo a regra dos três pontos.
- Estabelece princípios para a determinação do perfil de **máximo campo magnético** para vários tipos de equipamento:
 - Para **linhas aéreas**, remete para o documento da **CIGRÉ** adiante referido;
 - Para **cabos subterrâneos**, prescreve a medida a 1,0 metro acima do solo e a regra dos três pontos sobre o local de campo máximo;
 - Para **subestações e outras instalações**, prescreve a medida a 1,0 metro acima do solo e 0,2 metros das paredes e/ou superfícies do equipamento, com a

regra dos três pontos sobre o local de campo máximo. Se a instalação for interior e houver probabilidade de alguém viver por cima, aí aplicar-se-á a



regra dos cinco pontos.

Figura 1.1 – Ilustração gráfica das regras de medição da exposição a CEMEBF de acordo com a norma CEI/EN 62110

O guia da CIGRÉ: *Technical Guide for Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines* foi publicado em Abril de 2009 pelo grupo de trabalho WG C4-203, e define cuidadosamente as condições técnicas da efectivação das medidas na proximidade de linhas aéreas

De particular importância é o registo das correntes dos condutores para os quais é medido o respectivo campo magnético. No caso das linhas aéreas (e cabos subterrâneos), 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).

Foi com base nestes normativos que foram estudadas medidas de mitigação do campo magnético emitido por equipamentos da EDP, medidos virtualmente (isto é, simulados), em pontos de eventual exposição pública continuada próxima, ou seja, residências e locais de trabalho. De acordo com as recomendações da OMS de 2007, segundo as quais “*É razoável e autoriza-se a implementação de **procedimentos precaucionais de muito baixo custo para reduzir a exposição**, contando que os benefícios para a saúde, sociais e económicos da energia eléctrica não sejam postos em causa*”, no estudo dessas medidas de mitigação procurou-se sempre a optimização de custos e a praticabilidade das soluções.

No âmbito da Medida 3 do PPDA 2009-2011, aprovado pela ERSE, foram estudadas instalações representativas de todo o tipo de equipamentos da EDP Distribuição. Porém, alguns desses equipamentos ou instalações geram campos magnéticos de valor médio muito baixo (inferior a 1 μ T) em locais de eventual exposição pública continuada e, por isso, não serão referidos neste trabalho.

Estão nesta situação, **não tendo merecido o estudo de quaisquer medidas de mitigação** de campo magnético, as **linhas aéreas e os cabos subterrâneos de Média Tensão** (10, 15 e 30 kV), as **Subestações de Alta para Média Tensão** e os **Postos de Transformação exteriores**.

A metodologia de estudo aplicada caracterizou-se pelas seguintes etapas:

- a) Foram identificadas instalações-tipo caracterizáveis pela sua proximidade a edifícios de eventual exposição pública continuada. Para essas instalações, foram obtidas medidas de campo em perfis (conjuntos de pontos espaciais) junto das mesmas, tendo as medições sido realizadas pelo LABELEC, empresa do grupo EDP.
- b) Seguidamente foram desenvolvidos modelos computacionais das referidas instalações e equipamentos, para aplicação de um *software* de cálculo de campos electromagnéticos certificado pela CEI. Os modelos foram afinados por calibração com as medições realizadas pelo LABELEC.
- c) Foram depois definidos perfis virtuais de exposição, constituídos por conjuntos de pontos espaciais em acordo com as regras da norma CEI/EN 62110, perfis esses situados em edifícios de eventual exposição pública continuada (habitações e edifícios de trabalho) na proximidade das instalações.
- d) As medidas de mitigação estudadas foram simuladas sobre os equipamentos e instalações reais referidas e o seu efeito estudado sobre os perfis virtuais posicionados nos edifícios de eventual exposição pública mencionados.

2 MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EMITIDO POR LINHAS AÉREAS DE ALTA TENSÃO

2.1 LINHAS AÉREAS SIMPLES

Para base do estudo de medidas de mitigação relativas a linhas simples foi tomada como referência uma linha aérea real de 60kV da EDP que sobrepassa alguns prédios de habitação. Para esta linha, representativa de uma das situações mais críticas de exposição, verifica-se que o campo máximo médio em condições de carga elevada (40 MVA) apenas ultrapassa ligeiramente o valor de $1 \mu\text{T}$, sendo sempre inferior ao valor de $3 \mu\text{T}$ definido como “*objectivo de qualidade*” para novas instalações pelo país da União Europeia com as regulamentações mais exigentes na matéria, a Itália. Todavia, considerando a importância e representatividade das linhas de Alta Tensão, considerou-se a situação apresentada merecedora de estudo de medidas de mitigação.

Foram consideradas as seguintes medidas para mitigação do campo magnético na proximidade da linha:

- **Modificação da geometria dos condutores**
- **Aumento da altura dos apoios**
- **Afastamento dos apoios da zona habitacional**

De forma a comprovar, para cada uma destas medidas, qual a melhor solução a adoptar, estudaram-se várias modificações ao traçado original da linha.

O troço estudado é composto por 3 apoios, sendo a distância entre os mesmos de aproximadamente 158m e 120m.

Os perfis criados (representados na Figura 2.1.2) demonstram que, na face das habitações, o campo magnético toma valores mais elevados para a altura de 10.5m nos prédios correspondentes ao vão P27/P28 e para a altura de 4.5m nas habitações que correspondem ao vão P28/P29. Como se pretende reduzir o campo mais elevado a que as pessoas poderão estar expostas, consideraram-se essas alturas para esses perfis como as referências, e que correspondem na prática ao 3º andar dos prédios de 14m

e ao 1º andar dos de 7m (último piso de cada um dos edifícios).



Figura 2.1.2 - Posicionamento dos Apoios

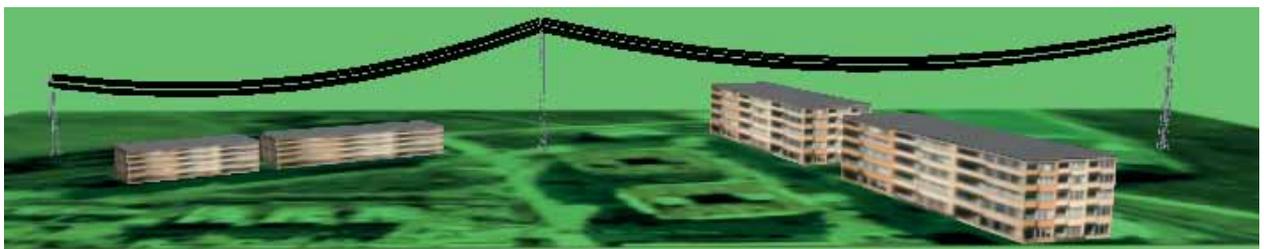


Figura 2.1.2 - Aspecto tridimensional do trecho considerado

Os perfis 6 a 9 são pontos nas faces dos prédios habitacionais. No entanto, como ninguém vive ou frequenta regularmente o topo dos edifícios ou as superfícies exteriores dos mesmos, estes perfis são considerados para o interior da habitação. Considera-se que a espessura das paredes tem aproximadamente 0.3m e o cálculo do campo é calculado a 0.5m destas. Deste modo todos os perfis foram deslocados de modo a ficarem a 0.8m no sentido interior dos pontos em que estavam.

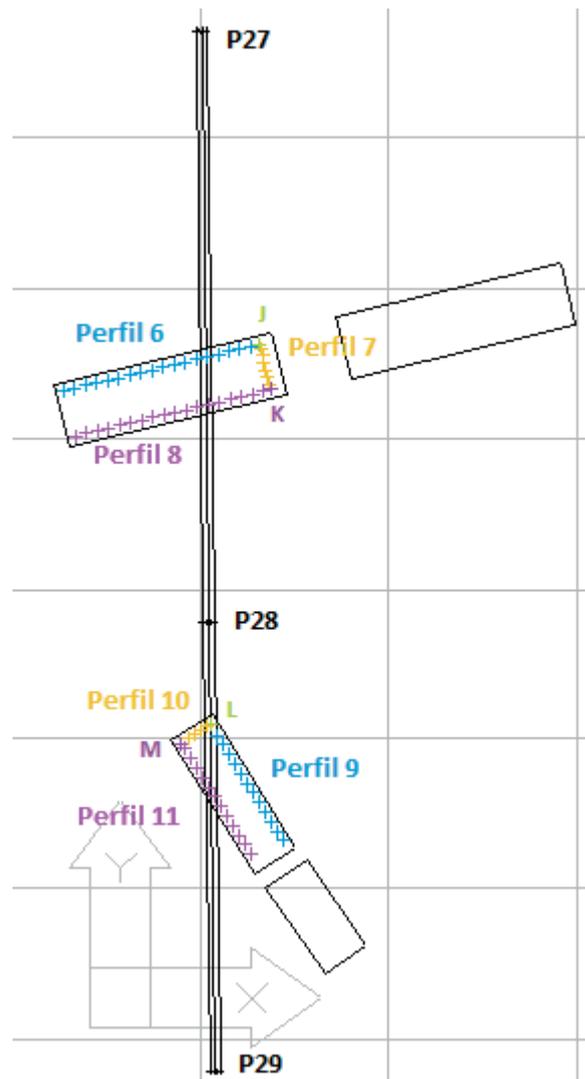


Figura 2.1.3 - Perfis considerados para obtenção do valor do campo magnético

Como geralmente nas linhas de 60kV a potência é frequentemente de 40MVA, as simulações consideram uma corrente de 385A.

Os valores do campo magnético inicial obtidos para os perfis considerados estão nas Fig. 2.1.4.

É fácil verificar que o campo magnético toma valores mais elevados nos perfis aproximadamente transversais à linha e mais próximos do ponto médio do vão (nos perfis 6 e 8).

Verifica-se que os valores do campo magnético para todos estes perfis do interior da habitação são mais baixos que os correspondentes ao topo dos edifícios.

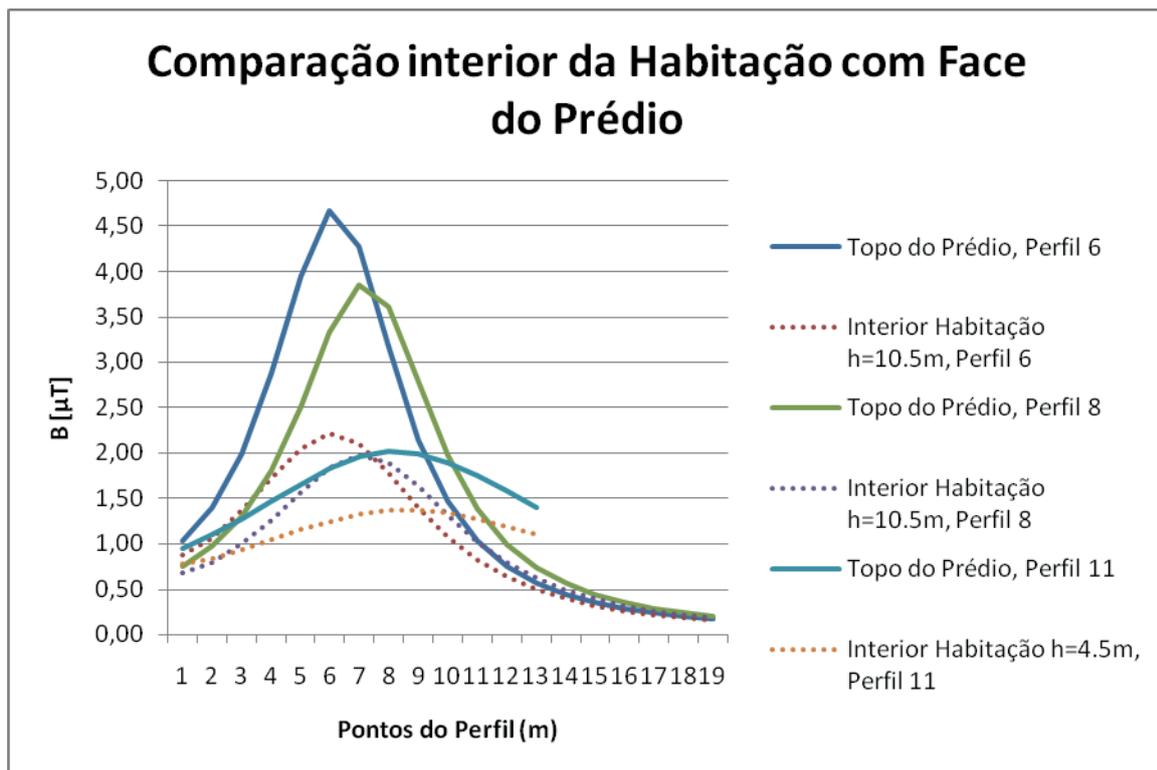


Figura 2.1.4 – Comparação entre os valores do campo magnético no interior da habitação e o topo dos prédios

2.1.1 MITIGAÇÃO POR MODIFICAÇÃO DA GEOMETRIA DOS APOIOS DOS CONDUTORES

É sobejamente sabido, a partir da literatura internacional, que a geometria para a qual se obtêm melhores resultados de emissão de campo magnético é a de trevo invertido, e a que apresenta piores resultados é a em esteira vertical.

O objectivo neste caso, porém, é encontrar uma boa solução para a linha considerada. Por isso, em vez de se testar as várias geometrias existentes, dado que os resultados já são conhecidos, começou por simular-se uma aproximação dos condutores de forma a verificar se a redução nos valores do campo é a que se pretende para que não seja necessário alterar toda a estrutura do apoio dos condutores.

Sabe-se que quanto mais equilátero for o trevo formado pelos condutores menor será o campo magnético emitido pelo conjunto. A configuração dos condutores da linha aqui estudada encontra-se representada na Figura 2.1.5.

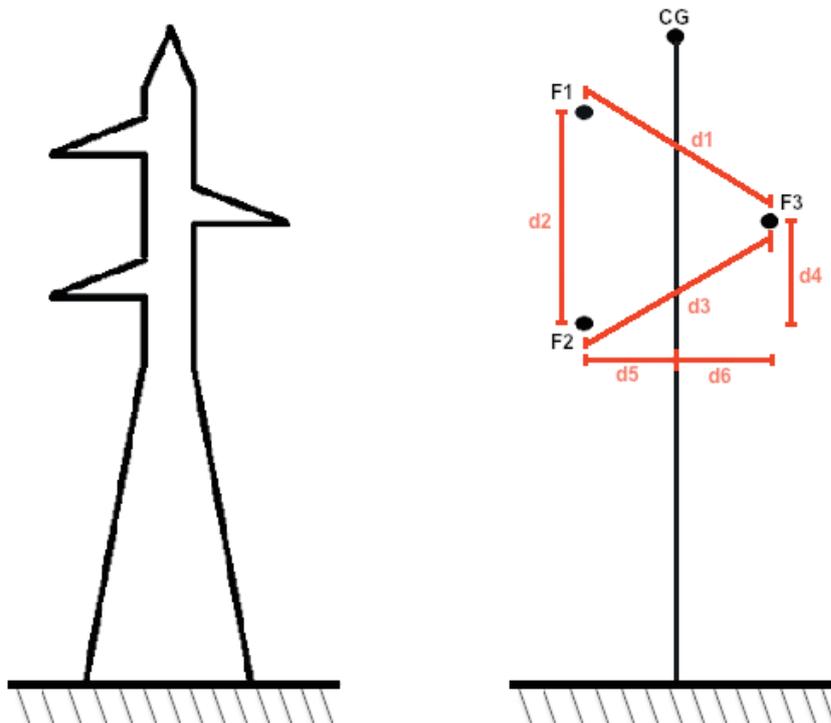


Figura 2.1.5 - Geometria da linha 60kV a estudar

O valor, em metros, para cada uma das distâncias representadas é dado pela Tabela 2.1.1.

d1	d2	d3	d4	d5	d6
3.16m	2m	3.16m	1m	1.5m	1.5m

Tabela 2.1.1 - Valores das distâncias entre condutores

Neste caso, uma vez que a distância mínima entre dois condutores aplicada no local é $d_2=2\text{m}$, considerou-se que este poderia ser tomado como o valor mínimo entre todos os condutores do sistema, de forma a tornar o trevo num triângulo equilátero.

Assim, passa a ter-se para as distâncias consideradas, através de simples manipulação geométrica:

d1	d2	d3	d4	d5	d6
2m	2m	2m	1m	.866m	.866m

Tabela 2.1.2 - Valores das distâncias entre condutores de forma a tornar o trevo equilátero

Existe um valor mínimo exigido pelo Regulamento para as Linhas de Alta Tensão para as distâncias entre condutores, de modo a que estes não se toquem perigosamente, e que depende da flecha mínima (f), natureza dos condutores (k), comprimentos das cadeias de isoladores (d) e tensão do sistema (U), valor esse dado, para linhas de 3ª classe (caso dos 60kV), por:

$$D = k\sqrt{f + d} + \frac{U}{150} . \quad (1)$$

Para este caso em particular e para o trecho 27/28 (onde se encontram os perfis com maior valor do campo magnético), obtêm-se os valores representados na Tabela 2.1.3.

Flecha máxima dos condutores	9.025m
Coefficiente da natureza dos condutores	0.6
Comprimento das cadeias de isoladores	0.73m

Tabela 2.1.3 - Valores para o cálculo da distância mínima

Considera-se neste estudo que a cadeia de isoladores é constituída por 5 elementos de cerâmica do tipo U70BL, numa montagem do tipo amarração com as características definidas na Tabela 2.1.4.

TIPO	U70BL
DIMENSÕES	
Diâmetro do espigão	16mm
Passo	146mm
Diâmetro	255mm
Comprimento da linha de fuga	300mm

Tabela 2.1.4 - Características das dimensões consideradas para a cadeia de isoladores

No entanto, as cadeias de isoladores a ser considerados são susceptíveis de oscilarem transversalmente à linha, o que não acontece com as cadeias do tipo amarração mas sim do tipo suspensão. Assim, neste caso considera-se que a equação (1) toma a forma

$$D = k\sqrt{f + d} + \frac{U}{150} = 0,6 \times \sqrt{9,025 + 0} + \frac{60}{150} = 2,2m. \quad (1.1)$$

Partindo do princípio que a linha se encontra numa zona considerada sem gelo, então pode ter-se

$$D_{min} = \frac{2}{3}D = 1,47m. \quad (2)$$

De acordo também com o Regulamento das Linhas de Alta Tensão, a distância mínima que pode ser aplicada entre condutores nus numa linha de 3ª classe é de 1cm/kV, o que neste caso corresponde a 0.6m. Dmin=1,47m respeita este valor.

Assim, e de forma a manter também uma margem de segurança, foi simulado o es-

quema da Figura considerando a geometria de trevo equilátero para uma distância entre condutores de 1.5m. Isto significa que a altura a que se encontram as travessas terá de ser alterada. Para considerar o melhor caso, e uma vez que será indiferente a forma como se alteram os condutores, apenas o que corresponde à maior altura em relação ao solo (neste caso a Fase 1) se irá manter à mesma altura, o que faz com que a altura média a que se encontra o conjunto formado pelos condutores ficará a um nível superior do solo em relação à situação inicial.

Para a mesma Figura , obtêm-se então as distâncias representadas na tabela seguinte.

d1	d2	d3	d4	d5	d6
1.5m	1.5m	1.5m	.75m	.6495m	.6495m

Tabela 2.1.5 - Valores das distâncias entre condutores para a distância mínima estipulada

Novamente se apresentam os resultados para os perfis mais problemáticos, perfis 6, 8 e 11, pois considera-se que a variação em termos de campo magnético é a mesma para todos os perfis quando a geometria dos condutores é alterada. Nos gráficos, independentemente da distância entre os condutores considerada, a altura a que os perfis são calculados é sempre a inicial (10.5m ou 4.5m, dependendo do perfil).

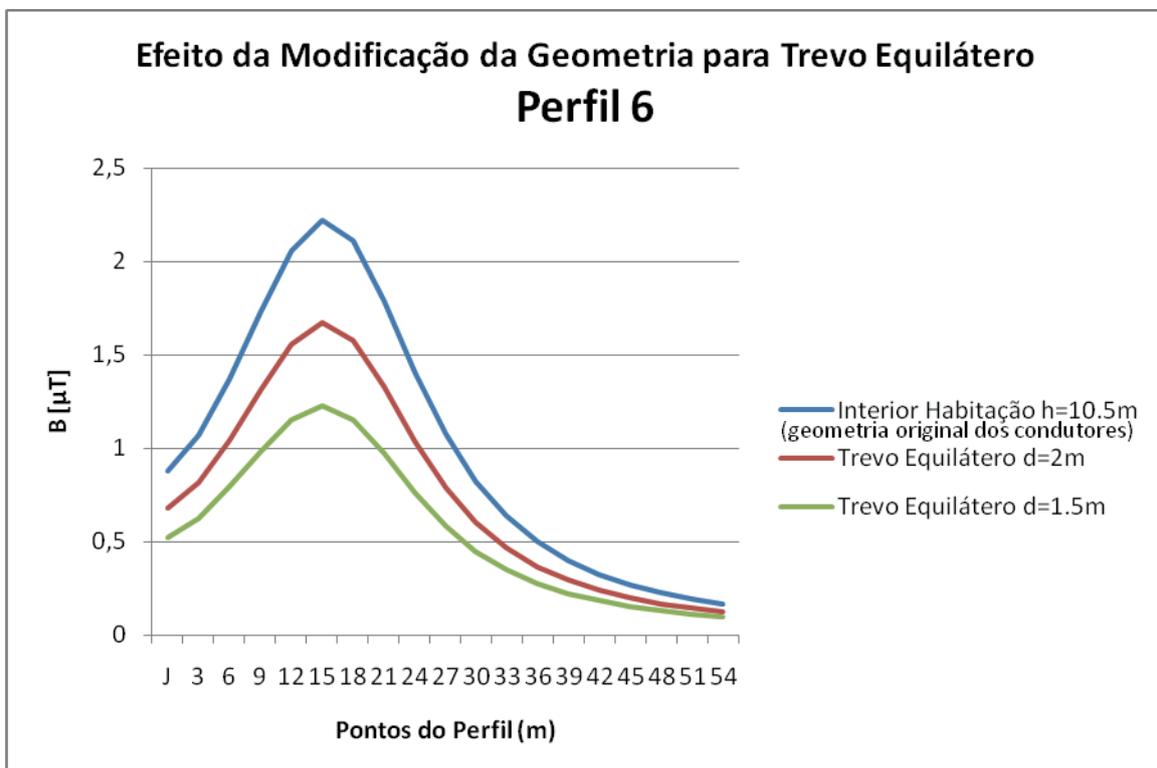


Figura 2.1.6 - Interior da habitação (10,5m): Efeito da modificação da geometria dos condutores para os pontos do perfil 6

Verifica-se que para os vários perfis há efectivamente uma redução nos valores do campo magnético emitido. No entanto, pretendendo-se uma redução superior,

eventualmente para valores inferiores a $1\mu\text{T}$, estas modificações não conseguem a mitigação desejada, como a Fig. 2.1.6 ilustra.

Considere-se então que os condutores são revestidos, caso em que não existirá uma limitação tão acentuada da distância entre condutores, pois estes estarão isolados uns dos outros.

Para verificação da variação do campo magnético com a redução da distância entre condutores foi tomado um passo de 25cm a partir da distância mínima que seria permitido existir. Assim, foram consideradas as distâncias, 1.25m, 1m, 0.75m, 0.5m e 0.25m entre os condutores. Os resultados estão demonstrados nas figuras seguintes.

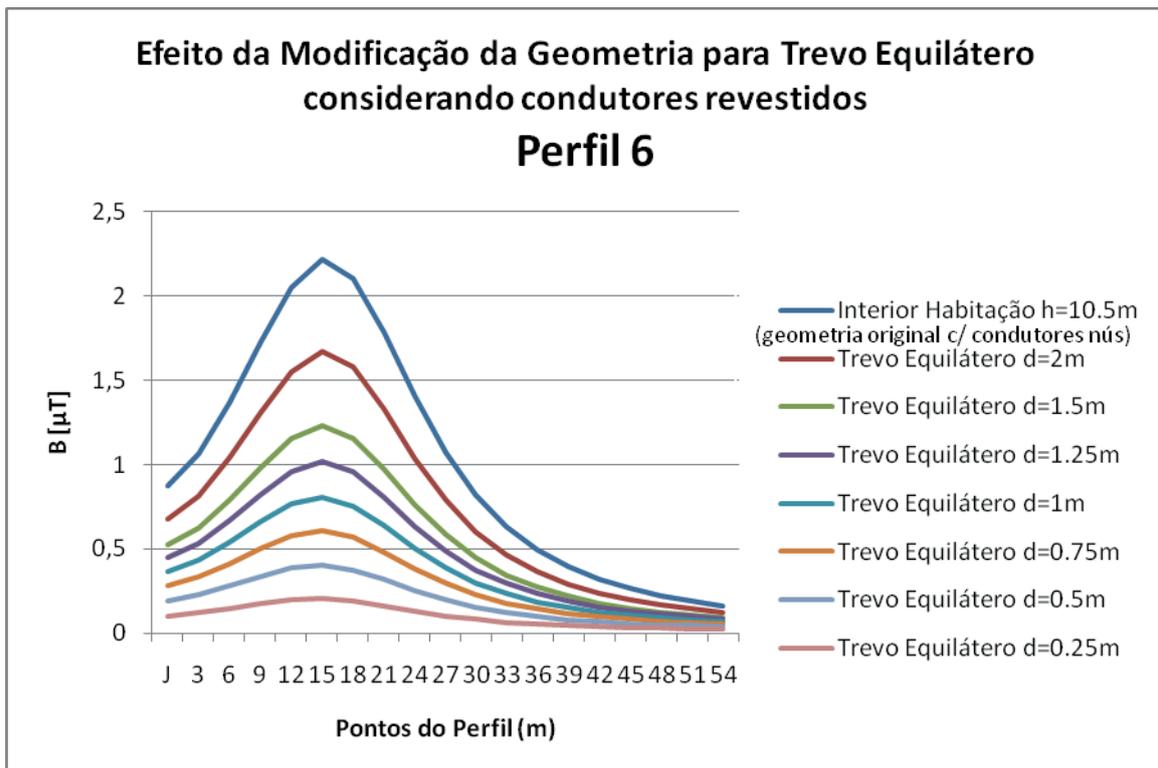


Figura 2.1.7 - Interior da habitação (10,5m): Efeito da modificação da geometria dos condutores revestidos de 0.25m em 0.25m para os pontos do perfil 6

Pode verificar-se que considerando que os condutores podem ser aproximados o máximo possível, basta uma distância de 1m entre condutores para que o campo magnético tenha para os perfis considerados valores inferiores a $1\mu\text{T}$. Claro que, nesse caso, como já foi referido, os condutores têm de ser revestidos para que possa ser ignorada a distância de segurança regulamentar, o que podendo ser uma solução geral para linhas sobrepassando edifícios, é de aplicação pontual (apenas nos trechos problemáticos) pouco prática.

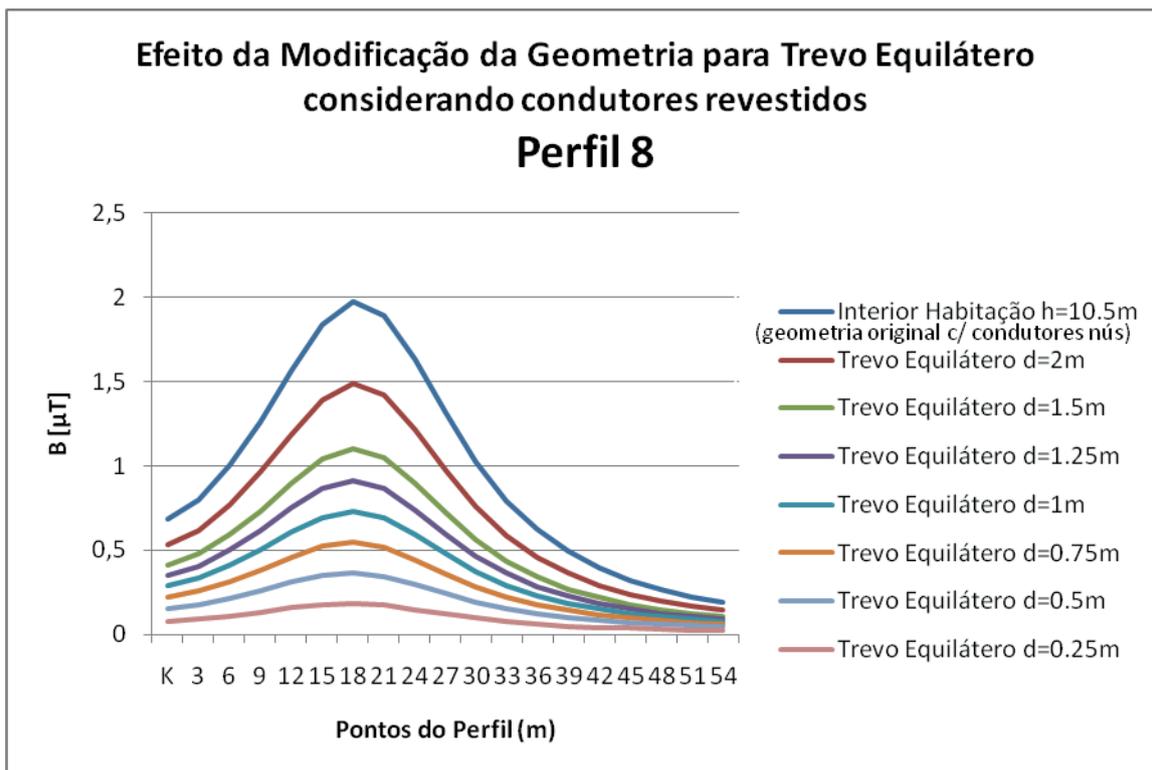


Figura 2.1.8 - Interior da habitação (10,5m): Efeito da modificação da geometria dos condutores revestidos de 0.25m em 0.25m para os pontos do perfil 8

2.1.2 INFLUÊNCIA DO CABO DE GUARDA

A linha particular em estudo não possui cabo de guarda, mas sabe-se que esse Cabo influencia o campo magnético emitido pela linha. Foram, por isso, efectuadas simulações considerando uma resistência de terra nos postes (apoios) similar à existente usualmente ($R_t=15\Omega$). O objectivo foi avaliar o papel da presença de Cabo de Guarda e o da Resistência de Terra do poste como factor de mitigação, dado que essa Resistência limita o valor da corrente induzida e, por conseguinte, o campo magnético adicional gerado pelo cabo de guarda.

Os resultados obtidos estão representados na figura 2.1.9.

Verifica-se, por estes resultados, que o campo praticamente não sofre variação, sendo a sua redução insignificante e não sendo uma solução viável como técnica de mitigação do campo magnético.

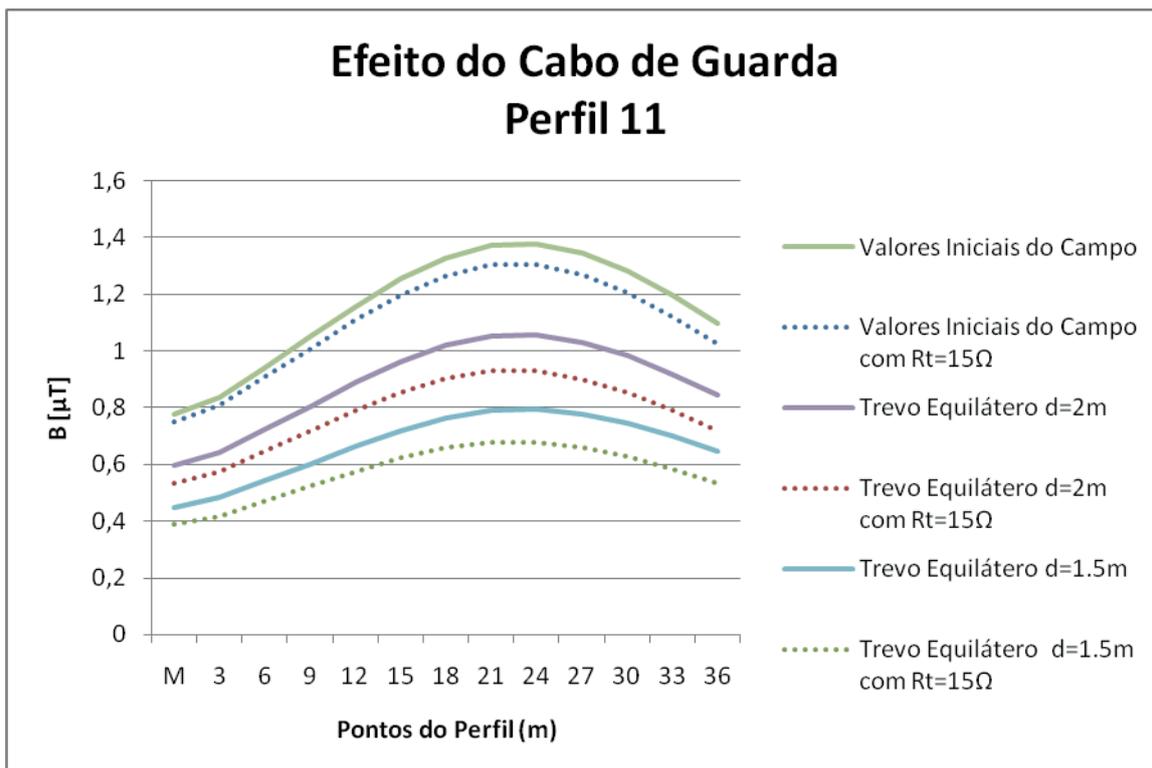


Figura 2.1.9 - Efeito do Cabo de Guarda nos valores do campo magnético provocado pela Resistência de Terra nos apoios para os pontos do Perfil 11

2.1.3 MITIGAÇÃO POR AUMENTO DA ALTURA DOS APOIOS DE LINHA

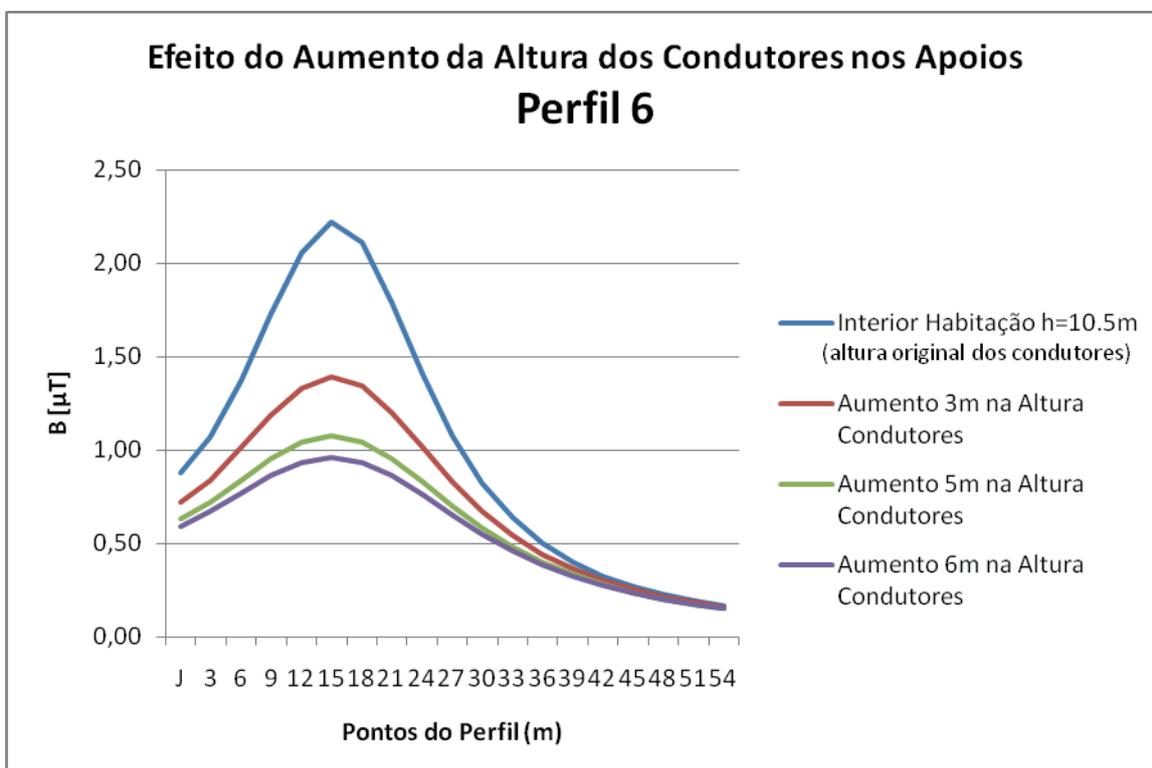


Figura 2.1.10 - Interior da habitação $h=10.5\text{m}$: Efeito do aumento da altura dos condutores no campo B para os pontos do perfil 6

Considerou-se, no estudo desta técnica de mitigação, que a altura do ponto médio de cada vão varia da mesma forma que o aumento dos apoios (mantendo-se sempre a mesma flecha). Apresentam-se de seguida gráficos referentes aos vários aumentos na altura considerados.

Verifica-se uma redução do campo emitido com o aumento da altura dos condutores. No entanto, caso eventualmente se pretendesse garantir que todos os perfis habitacionais teriam valores do campo magnético muito baixos (por exemplo inferiores a $1\mu\text{T}$), tal elevação requereria postes de altura desproporcionada, com mais 6 m de altura.

2.1.4 MITIGAÇÃO POR AFASTAMENTO HORIZONTAL DOS APOIOS DE LINHA DAS ZONAS DE EXPOSIÇÃO CRÍTICA

Como o objectivo desta medida é o afastamento da linha face às habitações, foi efectuado um deslocamento para a esquerda relativamente às coordenadas do apoio 28. A comparação entre a posição inicial e o deslocamento máximo efectuado encontra-se nas Figuras 2.1.11 e 2.1.12.

Caso se pretendesse reduzir o campo magnético a valores muito baixos (por exemplo inferiores a $1\mu\text{T}$) em todos os perfis, a solução seria efectuar um deslocamento de 90m para a esquerda do apoio 28 em relação à sua posição inicial.

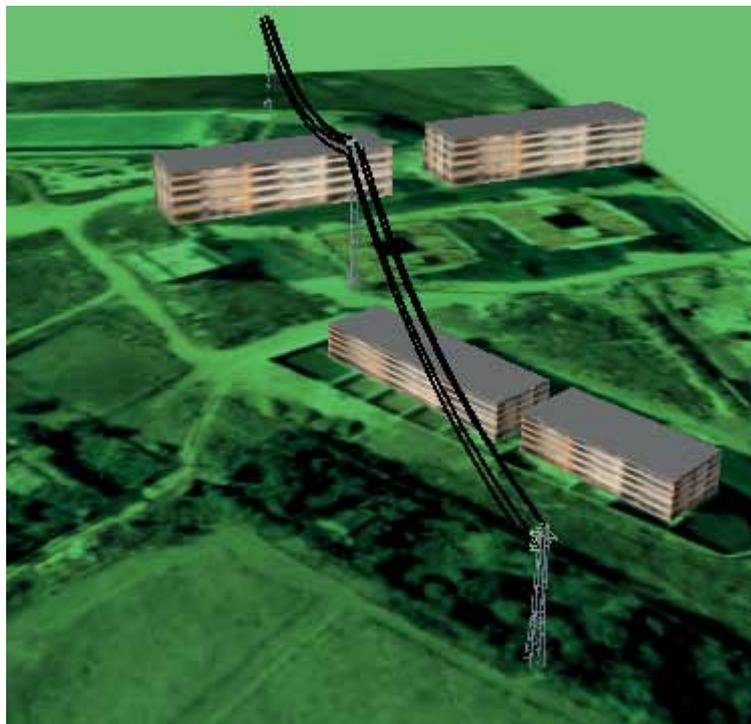


Figura 2.1.11 - Posição inicial dos apoios no troço considerado



Figura 2.1.12 - Deslocamento de 90m para a Esquerda do apoio 28

Os valores da redução do campo para cada deslocamento efectuado encontram-se nas figuras seguintes. De notar que nos gráficos, independentemente do deslocamento, a altura a que os perfis são calculados é sempre a inicial (10.5m ou 4.5m dependendo do perfil).

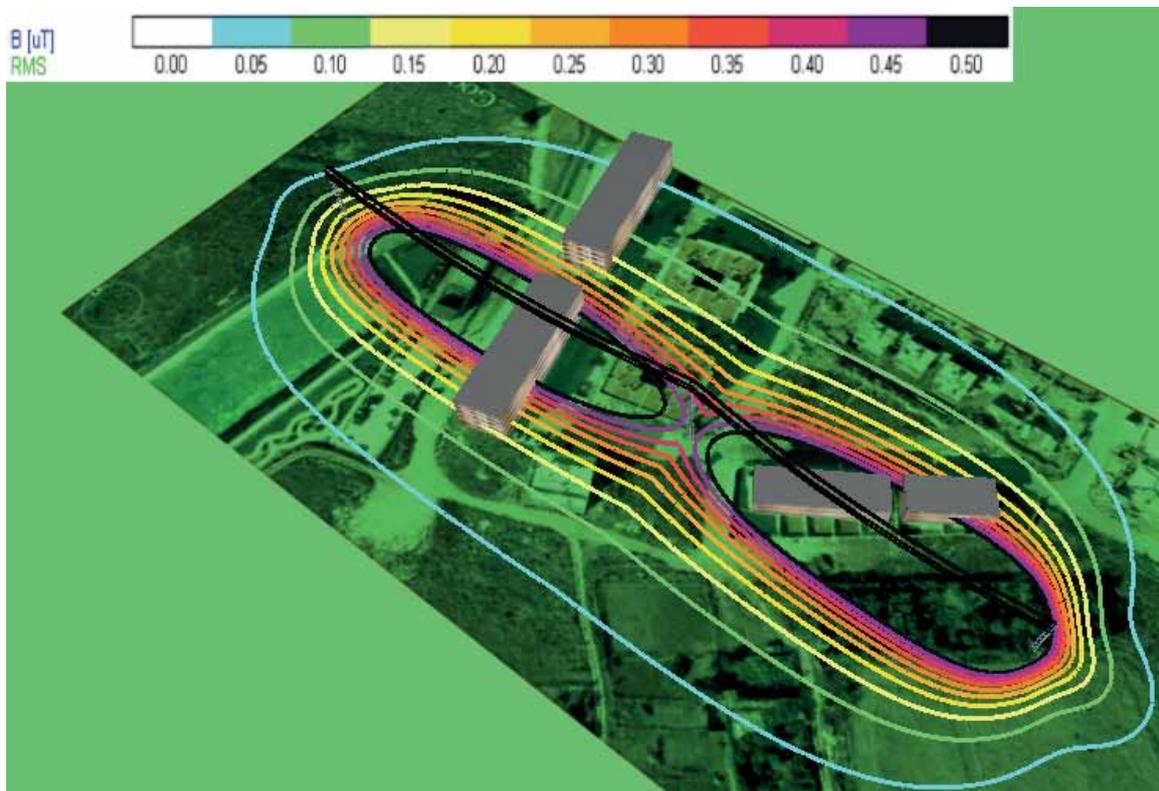


Figura 2.1.13 - Curvas de campo magnético - traçado original da linha

Na realidade aquilo que se obtém com o deslocamento do poste é um deslocamento do campo na mesma ordem de grandeza, efeito bem visível nos perfis com valores de campo mais elevados, como no perfil 6 (fig. 2.1.15).

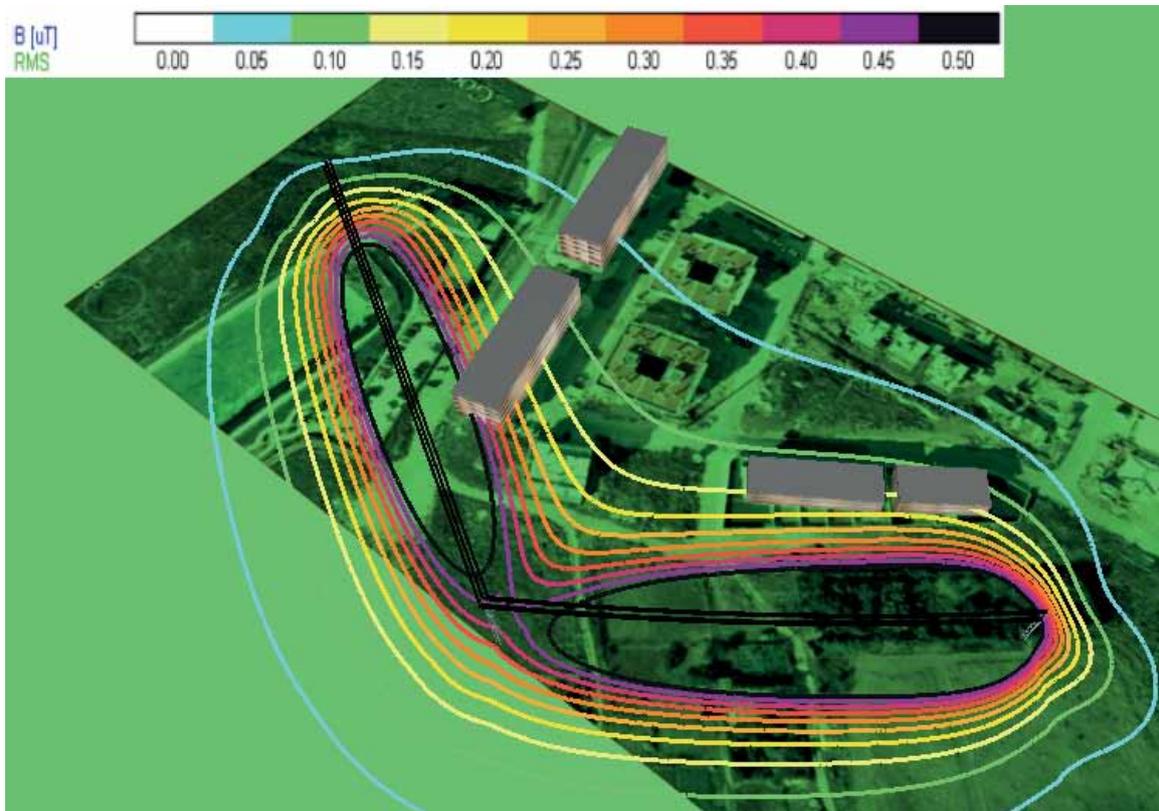


Figura 2.1.14 - Curvas de campo magnético - depois de um deslocamento de 90m

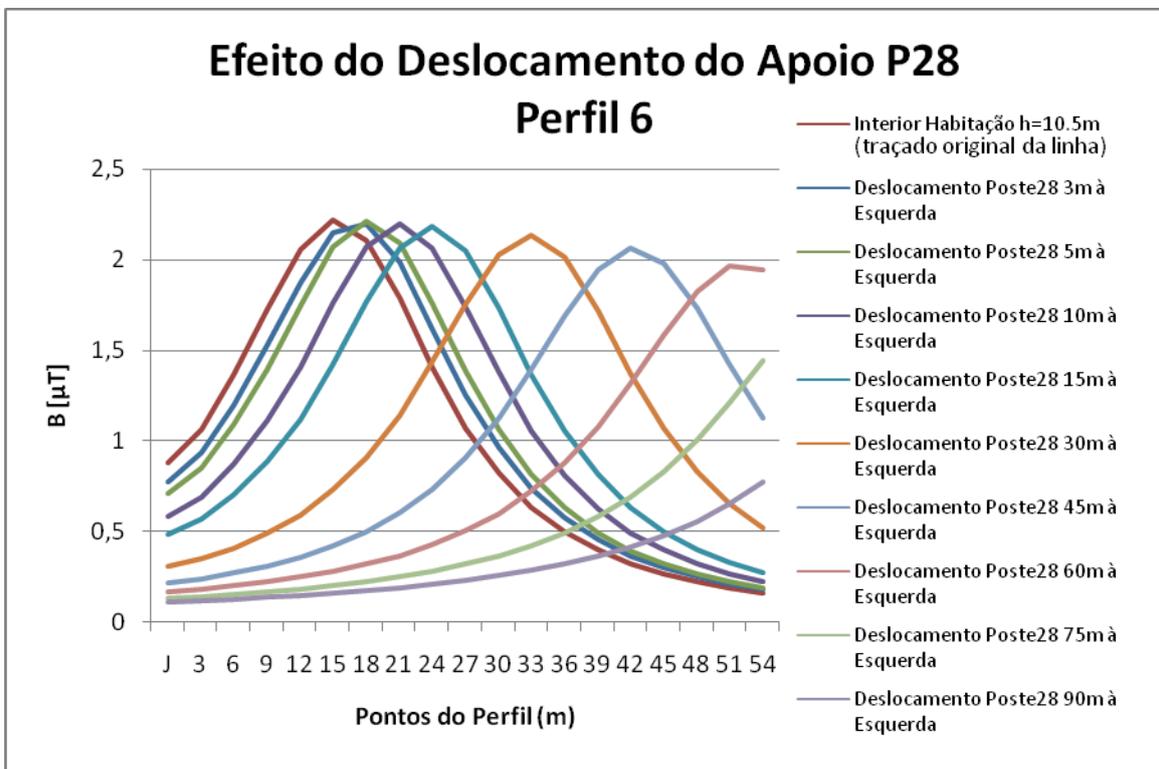


Figura 2.1.15 - Interior da habitação (h=10.5m): Efeito do afastamento do poste 28 nos pontos do perfil 6

É fácil verificar que, movendo o poste, os perfis com valores do campo magnético mais elevados deixam de ser os imediatamente abaixo a linha e passam a ser aqueles que estão na face mais próxima da linha deslocada. Assim, considera-se que faz mais sentido fazer um deslocamento do poste também numa outra direcção. Tomou-se como critério que a colocação do poste deveria ser num ponto que garantisse a maior distância aos perfis nas faces de todas as habitações. Para isto traçaram-se rectas paralelas às faces dos edifícios de acordo com a Figura 2.1.16, e a intersecção das duas rectas há-de garantir o ponto de maior distância às faces dos mesmos.

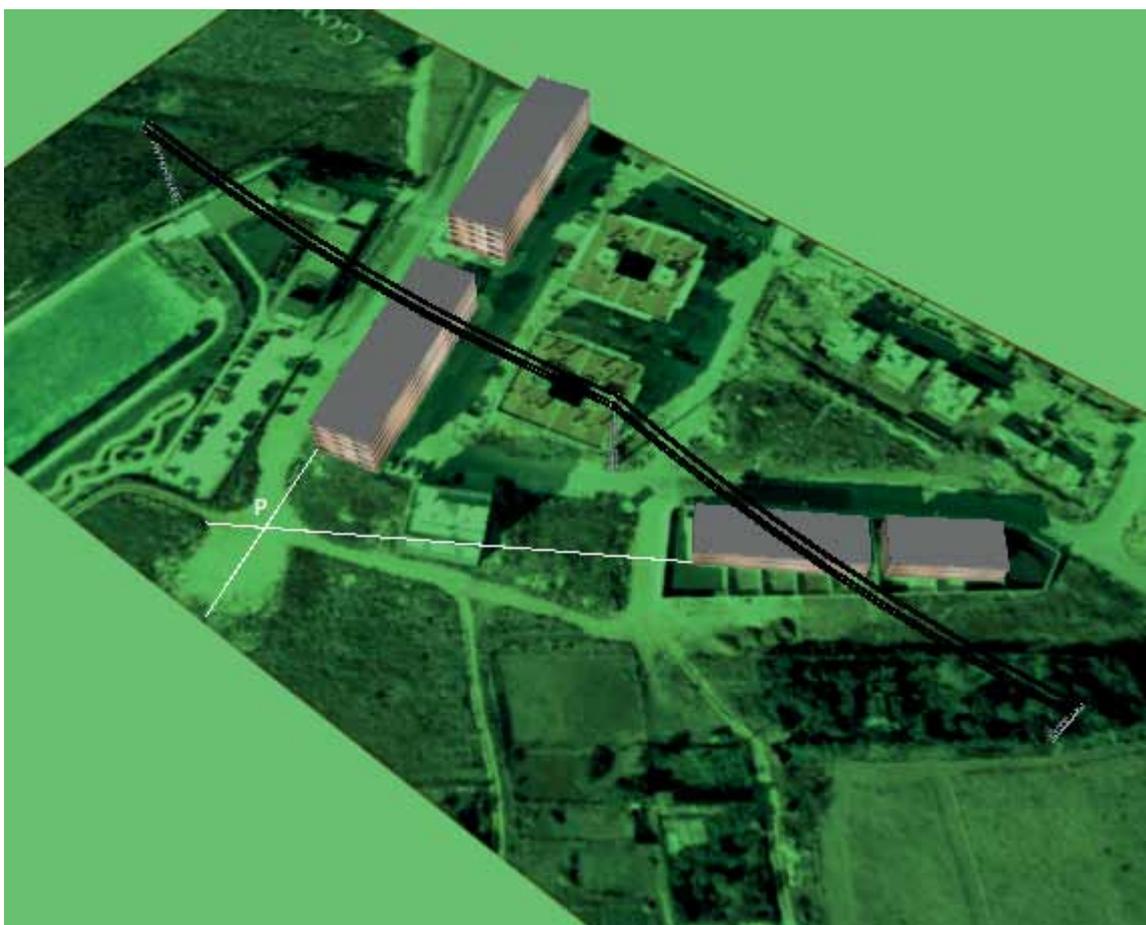


Figura 2.1.16 - Intersecção das duas rectas paralelas às faces dos edifícios

Colocando o Apoio no ponto P da intersecção obtém-se então para o troço considerado na composição mostrada na Figura 2.1.17. Claro que isto implicará a substituição não apenas dos condutores, nos vãos P27-P28 e P28-P29, mas também dos próprios apoios P27 e P29, uma vez que tanto o comprimento de cada vão, como o esforço à cabeça nos apoios passarão a ser substancialmente diferentes.

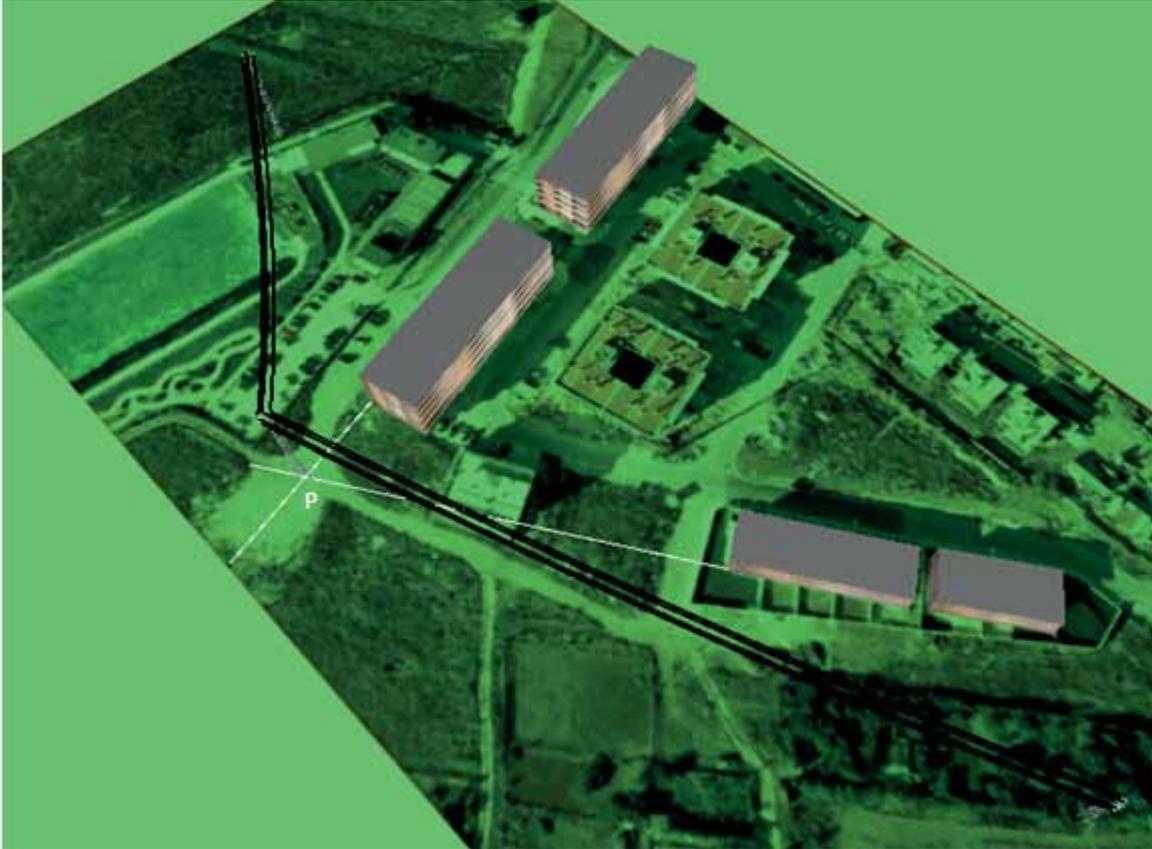


Figura 2.1.17 – Localização do Apoio 28 no ponto P da intersecção

Os valores do campo magnético obtidos permitem verificar que de facto o ideal é colocar o Apoio 28 numa posição que permita uma distância considerável dos perfis habitacionais.

As figuras que se seguem permitem observar os resultados obtidos, sendo que só são apresentados os resultados para os perfis cujos valores do campo magnético são mais elevados, considerando-se que o comportamento é semelhante em todos os outros perfis.

É fácil verificar que a melhor solução a aplicar aqui é a colocação do poste no ponto P (ou num semelhante). Neste caso, o valor do campo magnético seria bastante reduzido (inferior a $1\mu\text{T}$) para todos os perfis no interior das habitações, quer a 10.5m quer a 4.5m de altura.

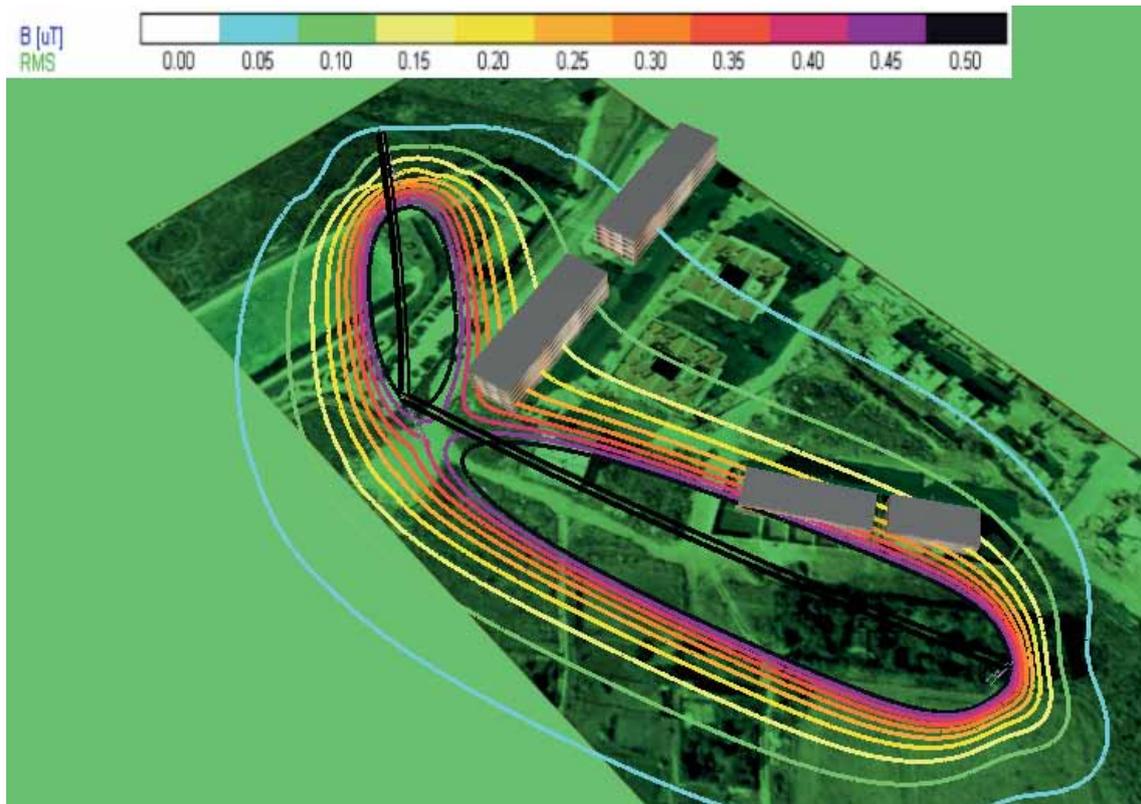


Figura 2.1.18 - Campo magnético obtido quando o Apoio 28 é deslocado para o ponto P

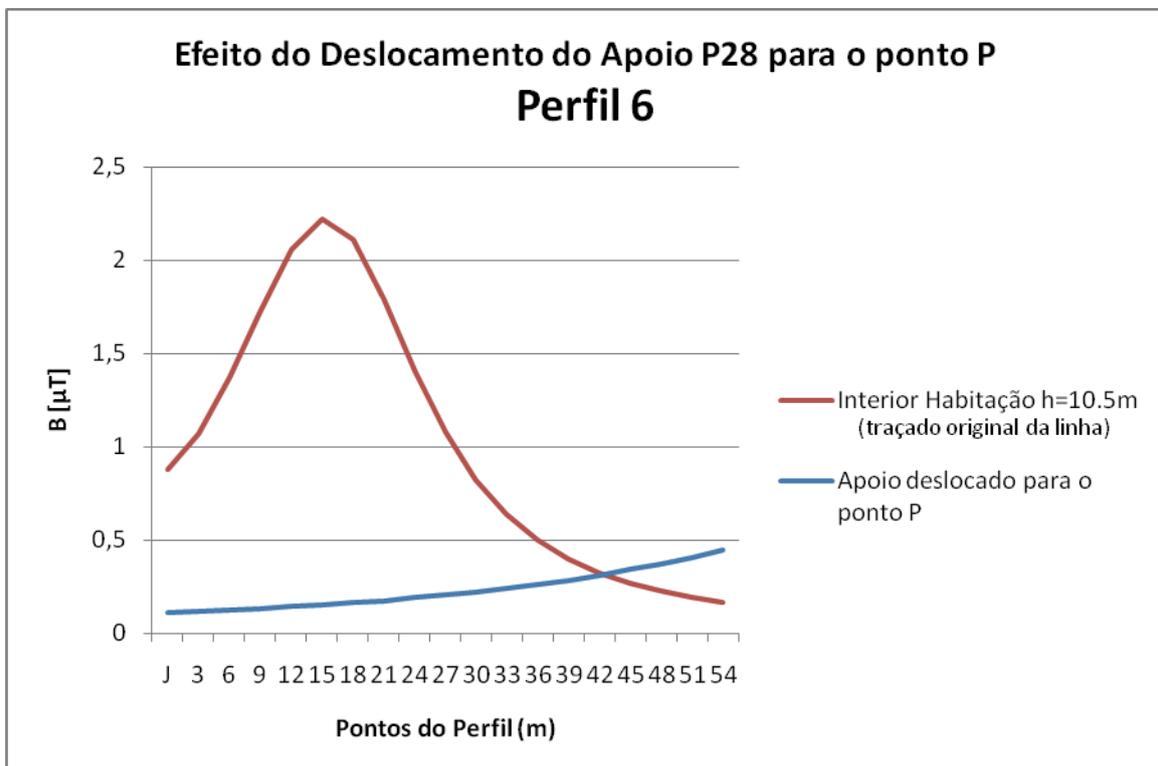


Figura 2.1.19 - Interior da habitação (h=10,5m): Efeito do afastamento do poste 28 para o ponto P nos pontos do Perfil 6

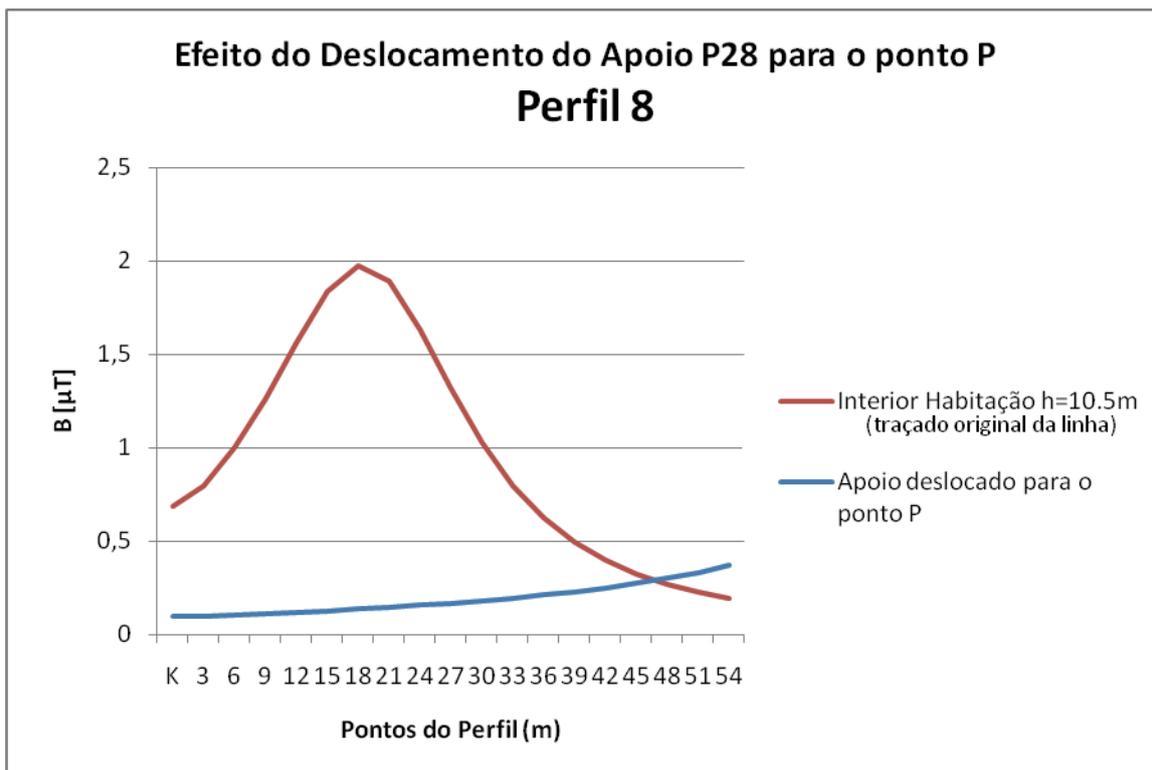


Figura 2.1.20 – Interior da habitação (h=10,5m): Efeito do afastamento do poste 28 para o ponto P nos pontos do Perfil 8

2.1.5 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA LINHAS DE 60 KV SIMPLES SOBREPASSANDO EDIFÍCIOS

Outras medidas de mitigação foram estudadas, como o desdobramento dos condutores e a blindagem. Porém, tais medidas são mais complexas e dispendiosas do que as aqui apresentadas. Caso se pretenda a limitação do campo emitido a valores muito exigentes, as medidas de redução da distância entre condutores e elevação dos postes são provavelmente as menos dispendiosas, mas deparam-se com dificuldades regulamentares e efeitos ambientais secundários (no caso da elevação), além de serem relativamente pouco eficazes. Assim, nesta situação, o afastamento da linha da sobrepassagem dos edifícios afigura-se a medida de mitigação mais prática, sendo aconselhável o desvio do respectivo traçado e a garantia de uma distância mínima à face dos edifícios de algumas dezenas de metros.

Acentua-se, no entanto, que esta medida só é necessária para satisfazer o objectivo de reduzir a exposição ao campo magnético a valores muito baixos (inferiores a 1 μT), para linhas com carga média de 40 MVA. Com qualquer outra referência menos severa que se adopte, nenhuma medida é necessária.

2.2 LINHAS AÉREAS DUPLAS

Neste estudo considerou-se uma linha aérea dupla de 60kV localizada num arrabalde de uma grande cidade.

A numeração dos apoios não é idêntica em ambas as linhas, pelo que o troço em estudo será o que contém os apoios P50/52, P51/53 e P52/54, de acordo com a Figura 2.2.3.

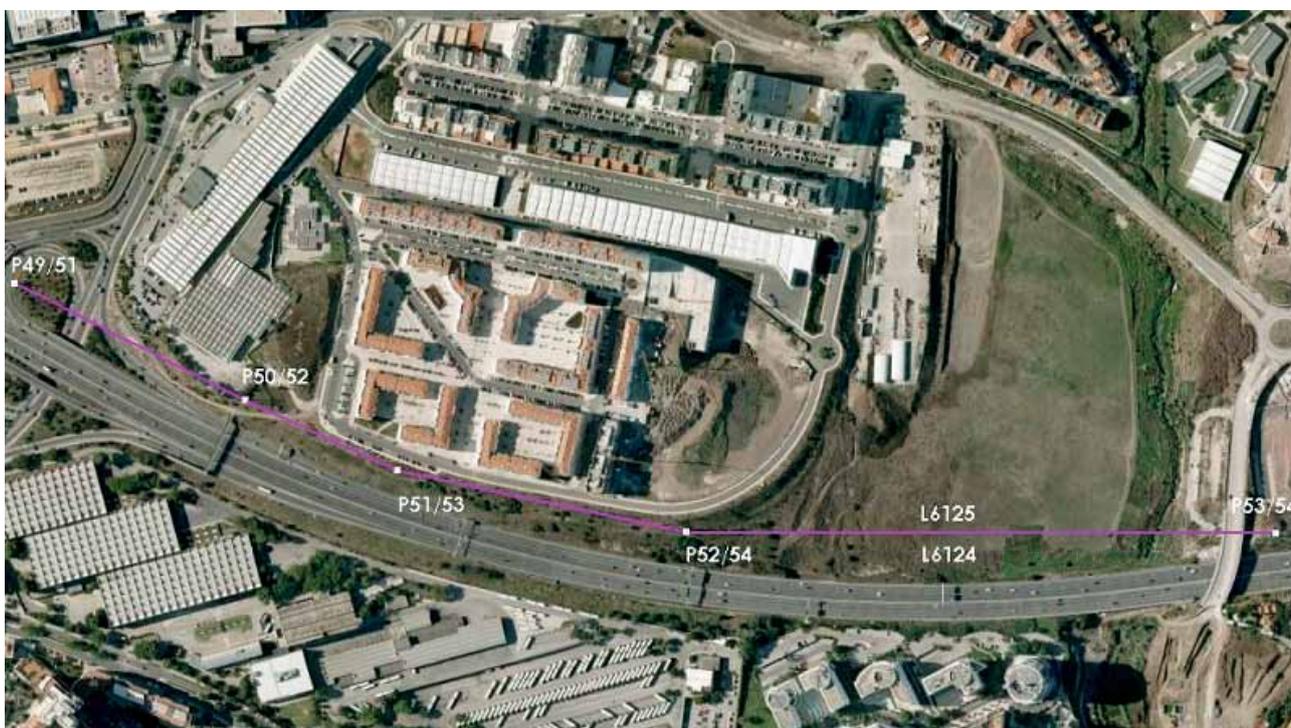


Figura 2.2.3 - Traçado da linha dupla 60kV em estudo

Foram estudados vários perfis objectos de medições (perfis 1 e 2 entre os apoios P50/52 e P51/53 e perfis 3 e 4 entre os apoios P51/53 e P52/54) e, de forma a completar o estudo, foram acrescentados novos perfis paralelos às faces dos prédios mais próximos da linha no troço considerado.

Nas simulações foi considerado que o solo tinha desníveis.

As Figura 2.2.4.2.2 e 2.2.3 permitem visualizar a localização dos perfis considerados.

Os apoios da linha são do tipo esteira vertical dupla e as cadeias de isoladores do tipo amarração. O campo magnético é calculado considerando que $U=60\text{kV}$ e $I=430\text{A}$ (valor do diagrama de carga aquando das medições que constam no relatório da EDP, correspondendo a 80 MVA).



Figura 2.2.4 - Pormenor do troço considerado

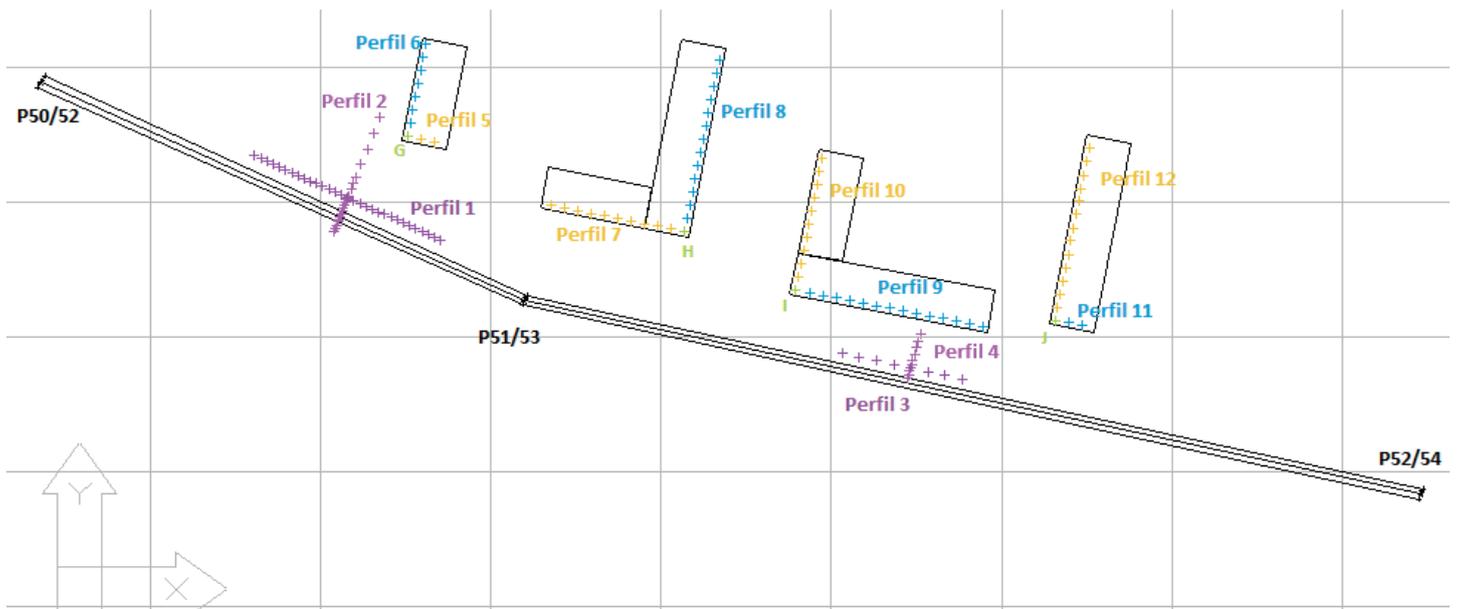


Figura 2.2.5 - Perfis considerados para o cálculo do campo magnético

Foram calculados os valores do campo magnético a várias alturas do solo nos perfis paralelos às faces dos prédios e no topo destes, podendo concluir-se que a altura para a qual os valores do campo magnético são mais elevados é $h=10\text{m}$. Este valor justifica-se uma vez que o prédio é mais alto que a linha em si e o campo magnético decresce com o aumento da distância aos condutores, e os 10m correspondem à altura mais próxima da dos condutores no ponto médio do vão.

As medidas tomadas para a linha dupla são portanto consideradas para a altura $h=10\text{m}$ que corresponde aproximadamente ao 3º andar de um prédio de 7 andares com a altura de 24.5m.



Figura 2.2.4 – Aspecto tridimensional do troço da linha dupla considerado (vista lateral)

	Altura no Poste do Condutor(m)			
	Cabo Guarda	Fase 1=Fase 1'	Fase 2=Fase 2'	Fase 3=Fase 3'
Poste 50/52	23.8	21.8	19.8	17.8
Poste 51/53	23.8	21.8	19.8	17.8
Poste 52/54	31.4	29.4	27.4	25.4
	Altura no Ponto Médio Vão do Condutor (m)			
	Cabo Guarda	Fase 1=Fase 1'	Fase 2=Fase 2'	Fase 3=Fase 3'
Poste 50/52	21.3	19.3	17.3	15.3
Poste 51/53	15.5	13.5	11.5	9.5
Poste 52/54				

Tabela 2.2.1 - Altura dos Condutores ao longo do troço considerado

Quanto aos perfis mais próximos da linha (perfis de 1 a 4), os valores do campo magnético indicados são para a altura que se considera ser a de referência, 1m.

Os perfis 5 a 12 são pontos nas faces dos prédios habitacionais. No entanto ninguém vive ou frequenta regularmente o topo dos edifícios ou as superfícies dos mesmos. Assim, para uma visão mais realista, estes perfis são considerados para o interior da habitação. Considera-se que a espessura das paredes tem aproximadamente 0.3m e o cálculo do campo será calculado a 0.5m destas, deste modo todos os perfis foram deslocados de modo a ficar a 0.8m no sentido interior dos pontos em que estavam.

Verificou-se que os valores do campo magnético para todos estes perfis do interior da habitação são menos elevados que os correspondentes nas faces dos edifícios. A título de exemplo é representada na Figura 2.2.5 esta comparação, em relação ao perfil 9 que corresponde ao perfil com valores do campo mais elevados. Através dos valores obtidos, verifica-se que quanto mais próximo da linha está o perfil a considerar, maior o valor do campo magnético. O mesmo se verifica para os perfis transversais à linha.

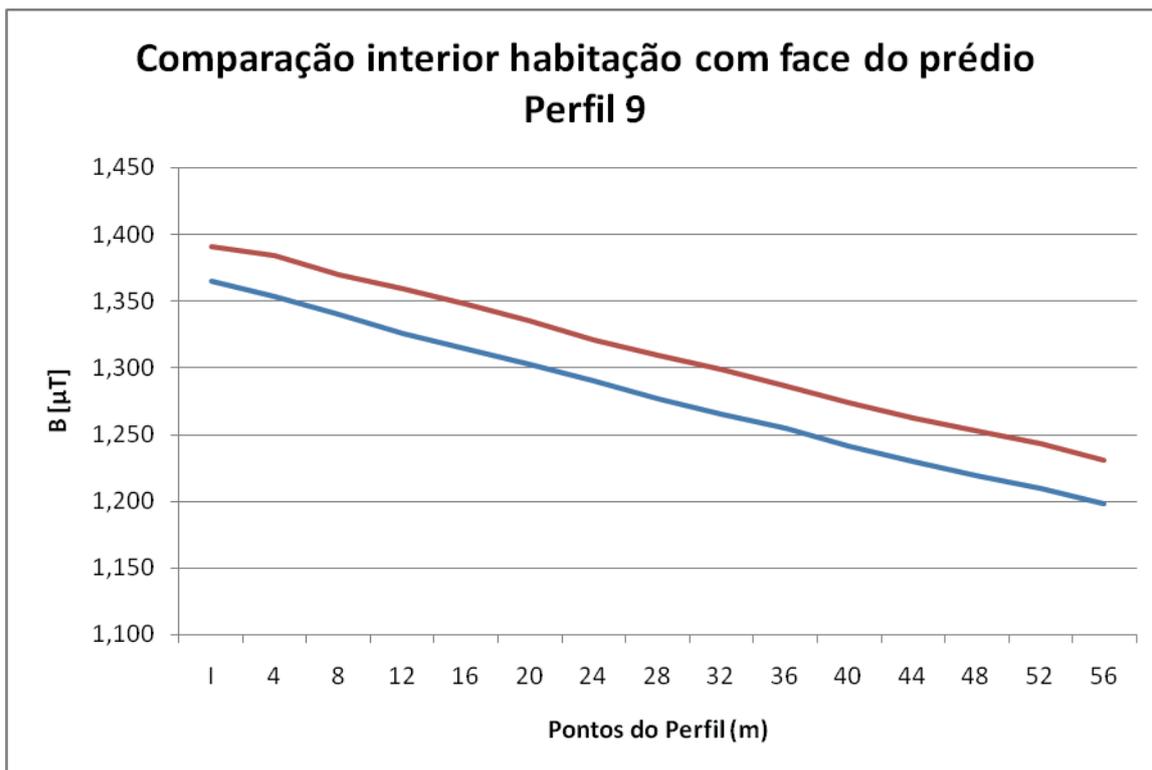


Figura 2.2.5 - Comparação entre os pontos do interior da habitação (a azul) e os pontos na face do prédio (a vermelho)

Os resultados da Fig. 2.2.5 também comprovam que nas condições de carga existentes nesta linha dupla (80 MVA) não são alcançados os limiares de campo mais exigentes praticados correntemente num país da União Europeia, 3 e 10 μT . Mesmo admitindo um valor particularmente exigente (por exemplo 1 μT) este só é ligeiramente ultrapassado. Mesmo que a carga média da linha ascenda a 100 MVA (mais 25%), como é possível numa linha dupla desta envergadura, ainda assim o campo máximo atingido nas habitações mais próximas seria apenas de 1,8 μT .

Apoio P50/52

d1	d2	d3	d4
4m	2m	2m	2m

Apoio P51/53

d1	d2	d3	d4
4m	2m	1.5m	1.5m

Apoio P52/54

d1	d2	d3	d4
4m	2m	1.5m	1.5m

Tabela 2.2.2 - Distâncias entre condutores para a linha considerada

O tipo de apoios, sistemas e geometria dos condutores a estudar estão representa-

dos na Figura 2.2., sendo os valores das distâncias entre condutores apresentados na Tabela 2.2.2.

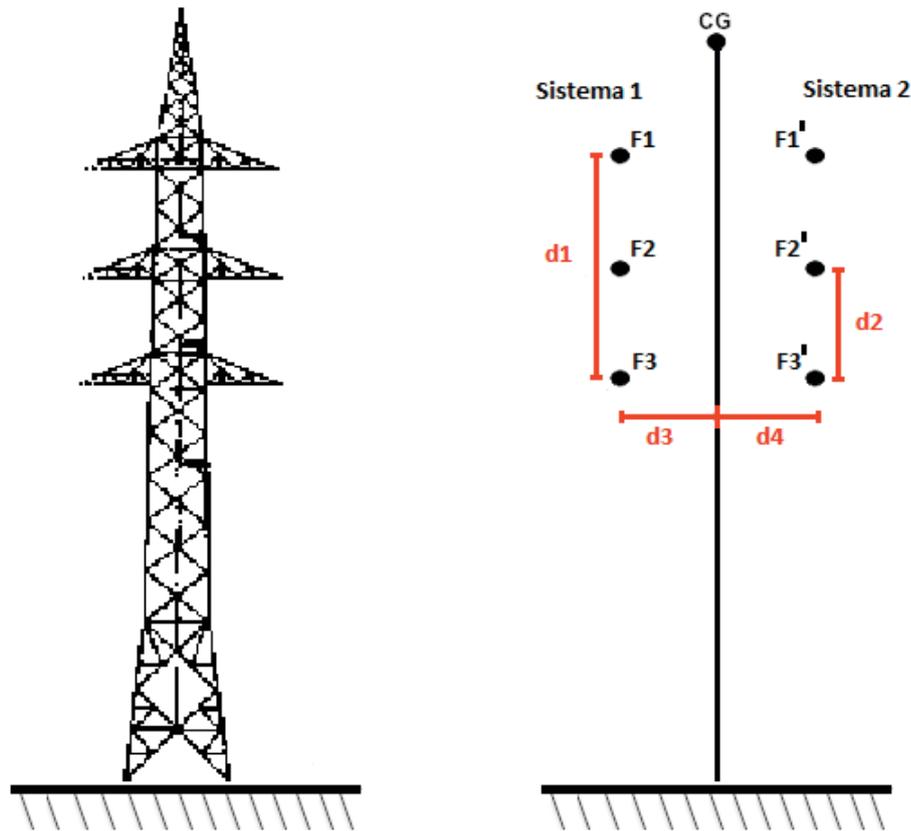


Figura 2.2.6 - Geometria da linha dupla 60kV a estudar

2.2.1 MITIGAÇÃO POR TROCA DE SEQUÊNCIA ENTRE FASES

Sabe-se que a medida que obtém melhores resultados numa linha dupla de forma a reduzir o campo magnético é a troca da sequência entre fases. Por isso tomou-se esta como a primeira medida a testar.

Serão sempre aqui representados, uma vez que o comportamento em todos os perfis é semelhante, os perfis 9 e 4 que correspondem aos valores do campo magnético mais elevado, respectivamente no interior da habitação e na proximidade da linha.

As simulações efectuadas consideram que há dois tipos de troca de sequência de fases, numa primeira análise as fases do Sistema 1, e depois as fases do Sistema 2. É de notar que o sistema 2 corresponde ao que se encontra mais próximo das habitações.

Os resultados obtidos (vd. Figs. 2.2.8 e 2.2.9) permitem afirmar que trocar a sequência de fases do Sistema 1 ou do Sistema 2 é praticamente indiferente, pois os valores do campo magnético obtidos são muito semelhantes.

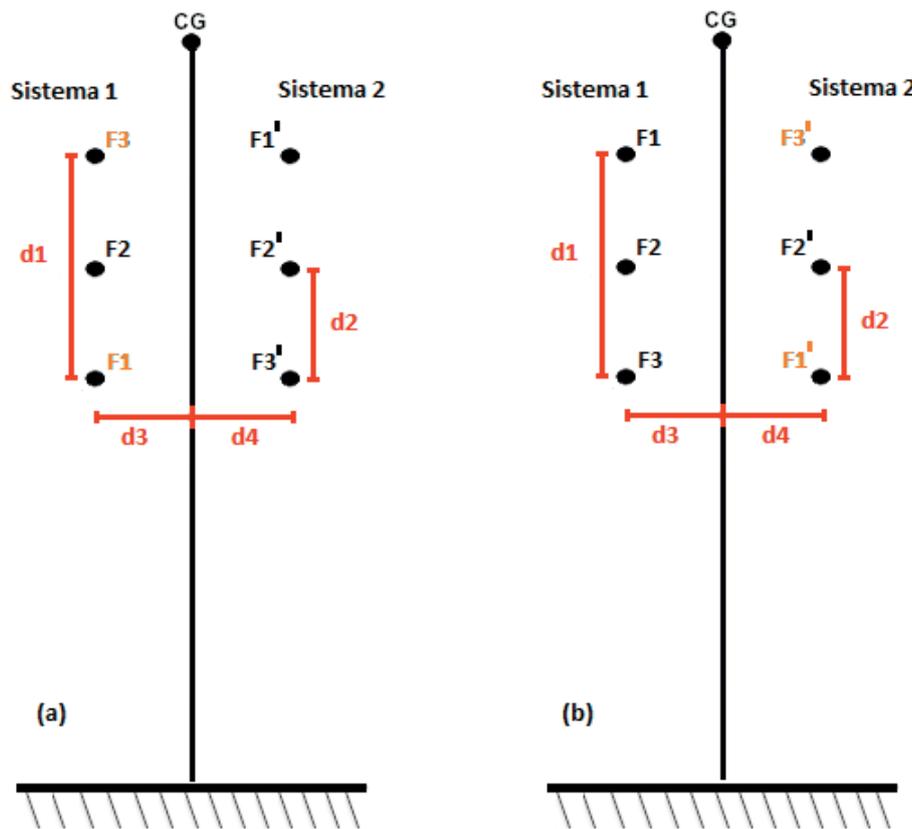


Figura 2.2.7 - Troca de Sequência de Fases realizada, (a) Troca no Sistema 1, (b) Troca no Sistema 2

Verifica-se que tanto para os perfis das habitações como para os perfis mais próximos da linha, a troca da sequência de fases permite obter uma redução nos valores do campo magnético da ordem dos 70% a 80%. Para os perfis das habitações (portanto mais longe do trecho da linha) os valores passam a ser apenas aproximadamente 20% dos valores iniciais e nos perfis imediatamente abaixo da linha aproximadamente 30%. Pode portanto concluir-se que o efeito da troca da sequência de fases melhora com a distância, uma vez que o Perfil 4 se encontra imediatamente abaixo da linha e o Perfil 9 a aproximadamente 17m da linha.

Para os perfis nas habitações consegue-se assim reduzir o campo para valores quase residuais.

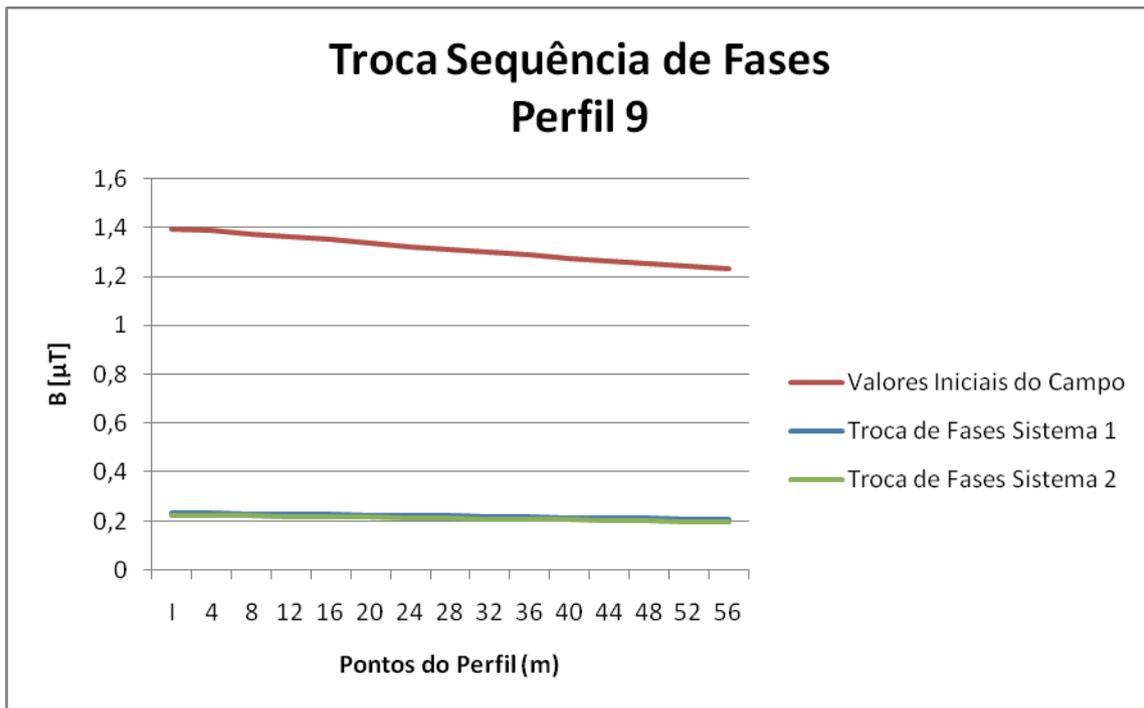


Figura 2.2.8 - Redução do Campo Magnético para os pontos do perfil 9 executando Troca de Sequência de Fases

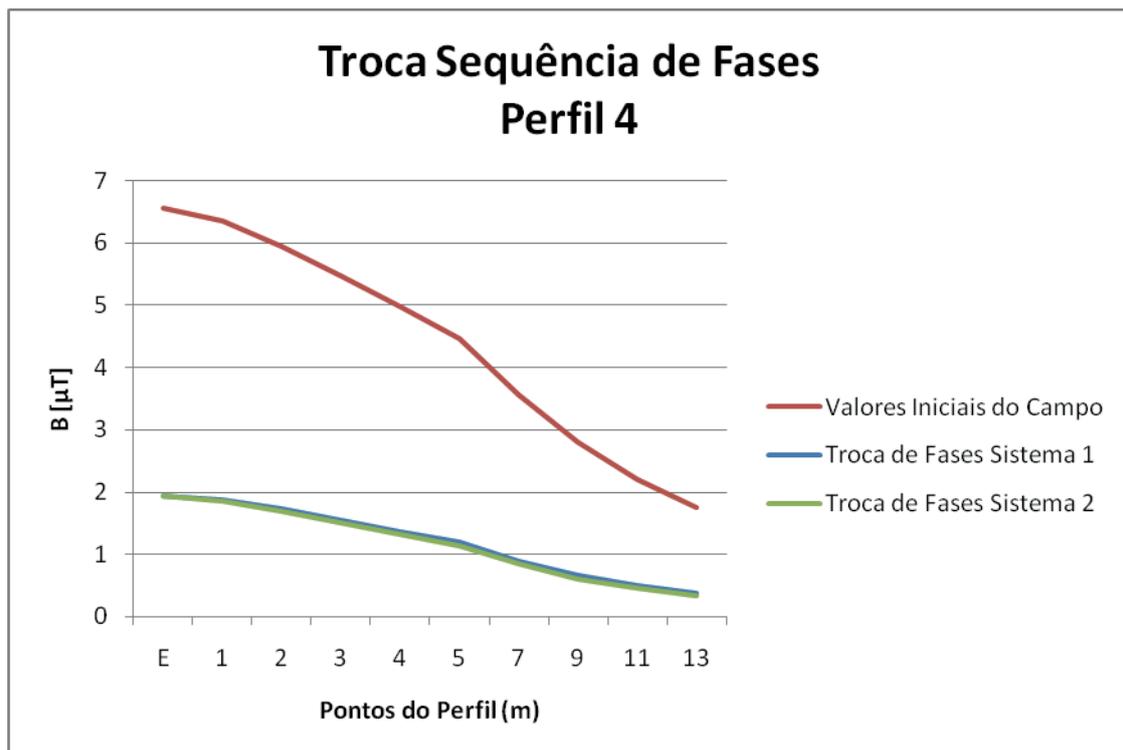


Figura 2.2.9 - Redução do Campo Magnético para os pontos do perfil 4 executando Troca de Sequência de Fases

2.2.2 COMPARAÇÃO DA LINHA DUPLA COM TROCA DE FASES E CORRENTES IGUAIS COM A SITUAÇÃO DE LINHA SIMPLES

Considerou-se que seria interessante analisar o efeito de se ter apenas um dos sis-

temas activos, tendo o outro corrente nula. Assim pode determinar-se a corrente mínima a passar num único sistema com a configuração de esteira vertical que obtém os mesmos valores do campo magnético que a linha dupla em esteira vertical.

Comparou-se, ainda na configuração inicial, o campo magnético quando os dois sistemas estão activos, com correntes $I_1 = I_2 = 430A$, com as situações em que apenas se tem $I_1 = 430A$ ou $I_2 = 430A$.

Claro que para esta comparação se considera que já terá sido efectuada a Troca da Sequência de Fases. Assim, para as configurações geométricas representadas na Figura , são efectuadas simulações considerando as situações em que apenas um dos sistemas está activo. Quando $I_1 = 430A, I_2 = 0$, considerando-se que a Troca da Sequência de Fases é realizada no Sistema 1, e quando $I_1 = 0, I_2 = 430A$ que esta troca se dá no Sistema 2.

Os resultados obtidos encontram-se na Figura .

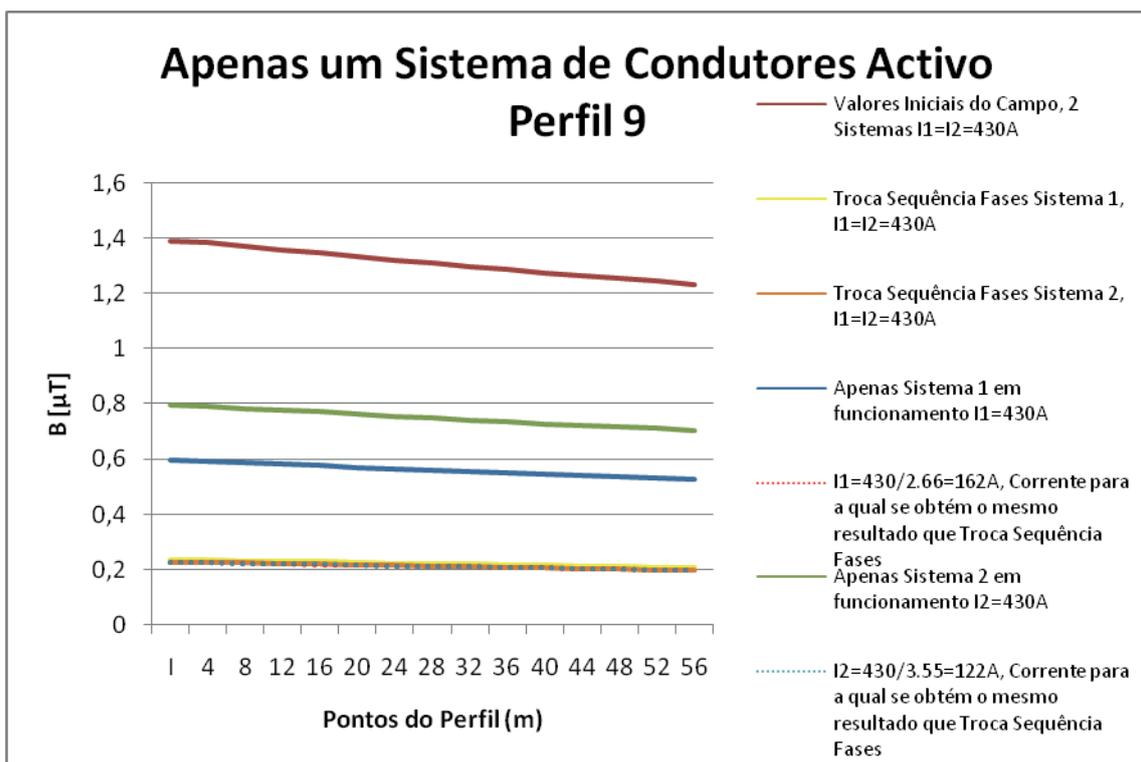


Figura 2.2.10 - Comparação entre as várias configurações quando apenas um dos sistemas está activo

Verifica-se que para se ter os mesmos valores do campo magnético que os obtidos com a Troca da Sequência de Fases no Sistema 1, quando é este que está activo e $I_2=0$, basta ter-se uma corrente de aproximadamente 162A. Isto corresponde a dizer que os valores do campo são **2.66 vezes** superiores quando se tem apenas o Sistema 1 activo.

Quanto ao Sistema 2 bastaria ter-se uma corrente de apenas 122A, o que se compre-

ende visto este ser o sistema mais próximo dos perfis habitacionais, o que corresponde a dizer que os valores do campo são **3.55 vezes** superiores quando se tem apenas o Sistema 2 activo na configuração inicial da linha.

A duplicação das linhas, se acompanhada da adequada sequência de fases é, portanto, um modo extremamente eficaz de reduzir o campo magnético a que possa haver exposição pública em edifícios próximos.

2.2.3 MITIGAÇÃO POR ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA DOS CONDUTORES

Tal como para a linha simples, também aqui foi estudado o efeito de se tornar a geometria mais simétrica. Neste caso, como se têm seis condutores distintos, a alteração é efectuada de modo a formar uma estrutura hexagonal como descrito na Figura (b).

Neste caso, como mostra a Tabela 2.2.2, a distância entre os condutores não é a mesma nos vários apoios. Assim, a distância mínima óbvia que se pode utilizar entre condutores é de 1.5m. Obtém-se, por simples manipulação geométrica, para as várias distâncias representadas na Figura (b) os valores representados na Tabela 2.2.3.

d1	d2	d3	d4	d5	d6
1.3m	1.3m	1.5m	1.5m	0.75m	0.75m

Tabela 2.2.3 - Valores das distâncias entre condutores de forma a tornar a geometria da linha dupla hexagonal

Por razões de estimativa também se efectuou o estudo considerando que a distância entre condutores poderia ser de 2m. No entanto, uma vez que se pode reduzir esta distância para 1.5m, será mais vantajoso considerar esta distância.

Considera-se que os valores do campo magnético serão mais favoráveis se forem usados como referência os condutores referentes às fases 1 e 1'. Deste modo, todos os outros serão modificados em função destes, de forma a obter a geometria desejada. Os valores do campo magnético obtidos estão ilustrados na Figura .

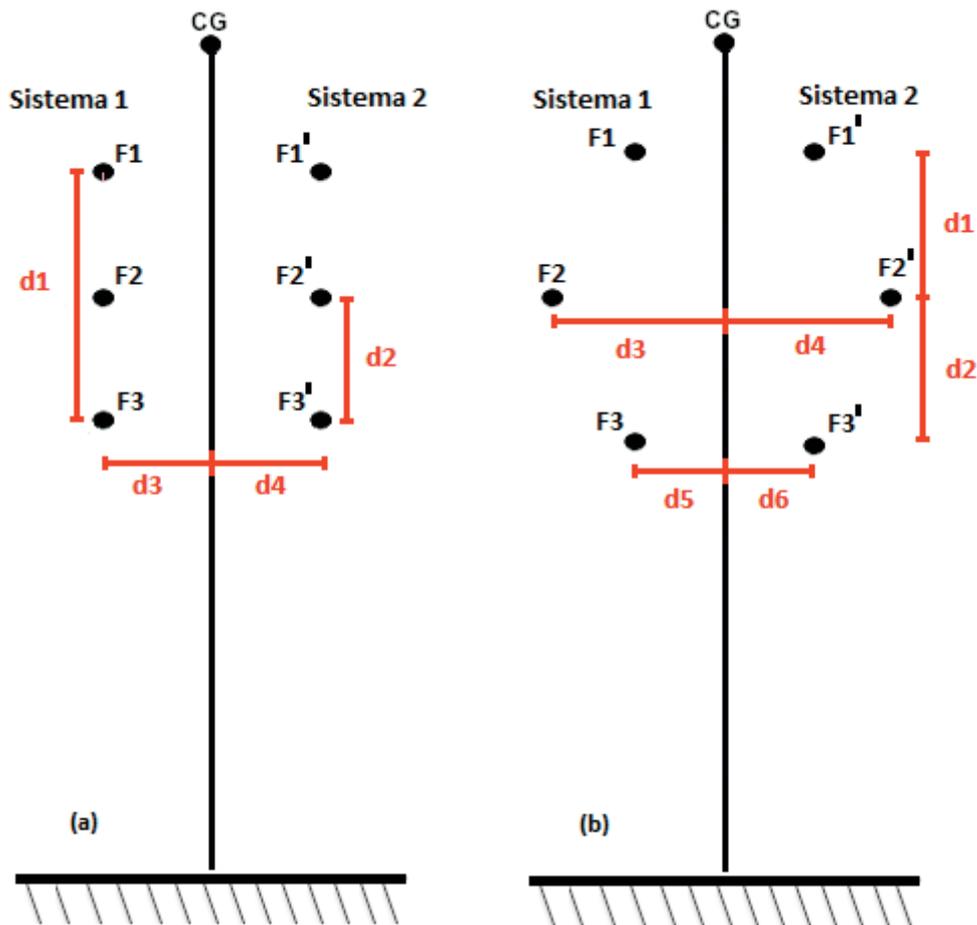


Figura 2.2.11 – Alteração da Geometria dos Condutores para Hexagonal: (a) Situação Inicial, (b) Geometria Hexagonal

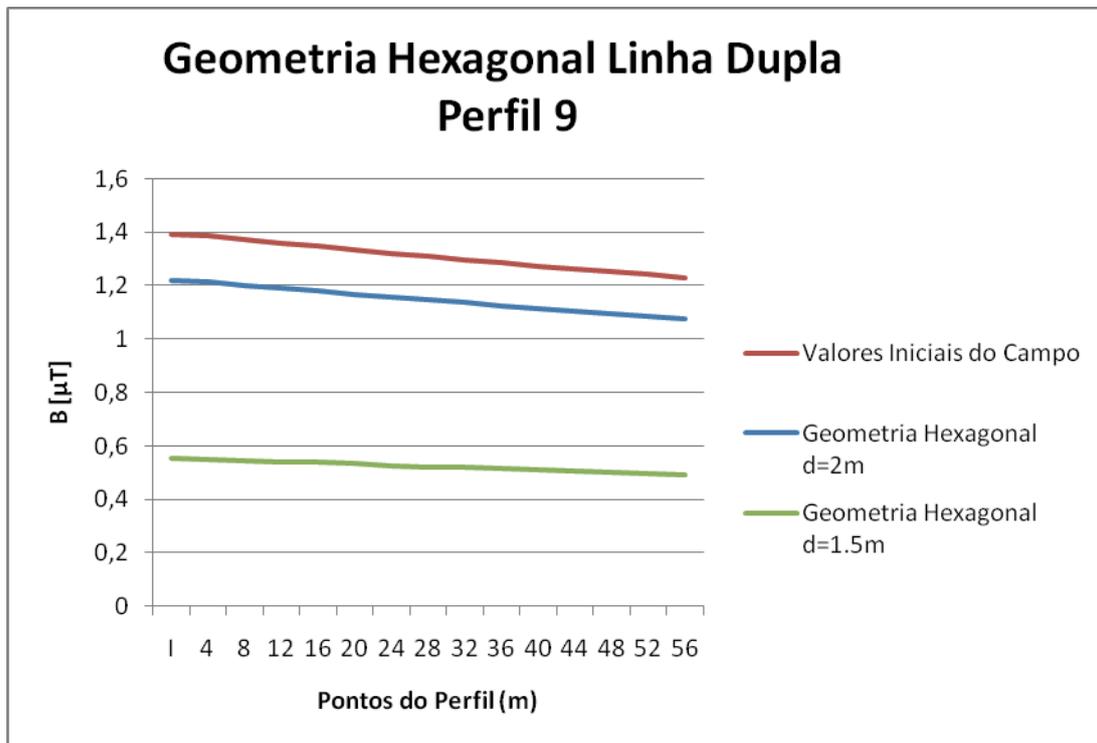


Figura 2.2.12 – Redução do Campo Magnético para os pontos do perfil 9 usando Geometria Hexagonal

Considerando os mesmos valores usados para a linha simples de 60kV, 1.5m é então a distância mínima a que os condutores nus podem ser colocados uns dos outros em segurança. Assim, pode verificar-se que as reduções nos valores do campo magnético em relação à situação inicial são da ordem dos 60% a 65%.

2.2.4 MITIGAÇÃO POR CONJUGAÇÃO DA TROCA DE SEQUÊNCIA DE FASES COM APROXIMAÇÃO DOS CONDUTORES

Uma vez que a troca de sequência de fases é a medida que obtém melhores resultados, considerou-se ser interessante estudar, para a linha dupla, o efeito conjugado desta técnica com as outras já referidas de forma a determinar a máxima mitigação. Assim, compararam-se os resultados já obtidos para esta medida de mitigação com o efeito conjugado de se ter uma troca de sequência de fases em geometria hexagonal ou com uma aproximação dos condutores na horizontal mantendo a esteira vertical dupla.

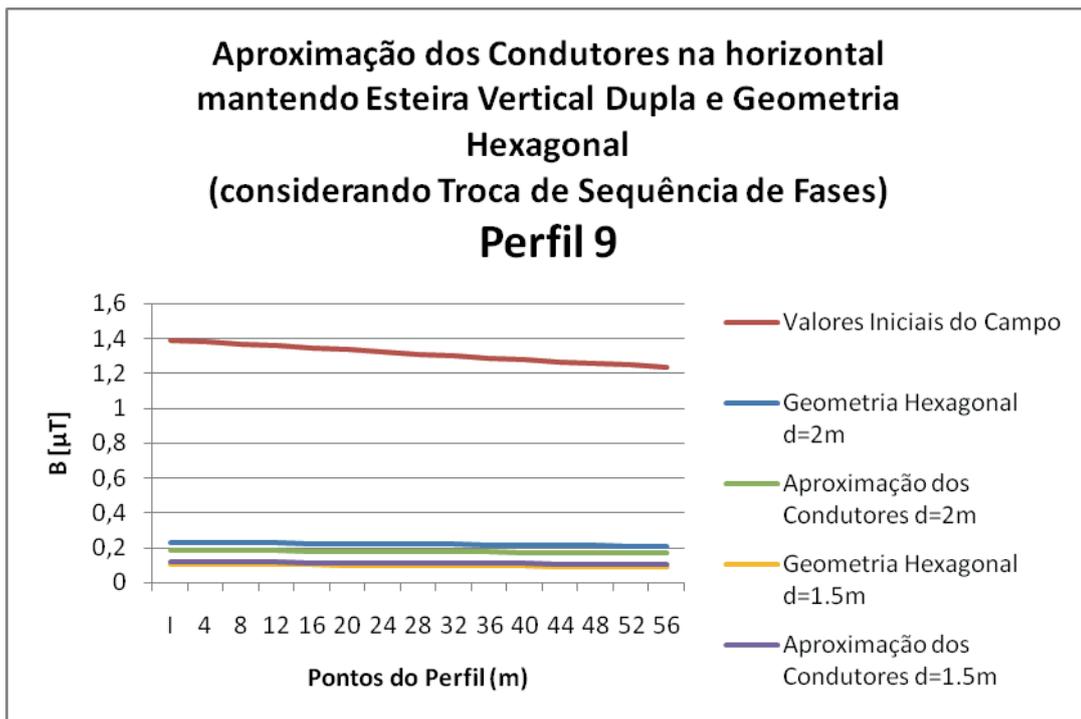


Figura 2.2.13 - Valores do Campo Magnético para o Perfil 9 com Aproximação dos Condutores na Horizontal e Geometria Hexagonal considerando Troca de Sequência de Fases

Como seria de esperar, pelos resultados acima descritos, a solução óptima será o efeito conjugado da Troca de Sequência de Fases com a Geometria Hexagonal. Pode observar-se que o método dominante na redução obtida é, no entanto, o da troca de sequência de fases, e se não for possível conjugar os dois aquela será a melhor solução. É também, em princípio a medida de mais baixo custo, uma vez que à partida só é preciso trocar a disposição de duas das fases de um dos sistemas da linha du-

pla, não sendo necessário nenhum tipo de alteração nos apoios em si.

2.2.5 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA LINHAS DUPLAS DE 60 KV LATERALMENTE PRÓXIMAS DE EDIFÍCIOS

Outras medidas de mitigação foram estudadas, como a aproximação dos condutores com revestimento. Porém, tais medidas são mais complexas e dispendiosas do que as aqui apresentadas. A medida de sequenciação adequada das fases é simultaneamente a mais barata e a mais eficaz.

Note-se, entretanto, que esta medida só é necessária para satisfazer o objectivo de reduzir a exposição ao campo magnético a valores muito exigentes (por exemplo inferiores a $1 \mu\text{T}$), para linhas duplas com carga média de 90 MVA. Para qualquer outra referência técnica menos severa, nenhuma medida é necessária.

3. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EMITIDO POR CABOS SUBTERRÂNEOS DE ENERGIA DE ALTA TENSÃO

O cabo subterrâneo de 60 kV estudado situa-se no centro de Lisboa, como se mostra no mapa da Figura 3.1.



Figura 3.1 - Mapa de Lisboa com identificação da rua onde estão localizados os cabos.

A planta da rua referente à localização dos cabos está representada na Figura 3.2.

A Figura 3.3 mostra a localização exacta do cabo de 60 kV. A Figura 3.4 mostra um conjunto de fotografias dos passeios onde se encontram enterrado o cabo.

A distância do cabo de 60 kV à habitação mais próxima é de 3,5m.

A partir do ponto B na Fig. 3.2, ponto que se situa exactamente por cima do cabo, foi definido um perfil transversal para os dois lados do cabo. Os valores do campo magnético ao longo desse perfilé alvo de estudo nos sub-capítulos que se seguem.

O cabo de 60kV foi posicionado a 0,7m de profundidade e foi modelado segundo uma configuração em triângulo com uma distância entre centros de fases de 0,056m.

Apesar da profundidade medida no local ser 1,15m, devido à diferença entre os valores do campo magnético medidos no local da abertura da vala e os valores no ponto B do perfil de medição, e do conhecimento de que a inclinação da rua não será acompanhada pelo cabo no local em análise, admitiu-se que o cabo está mais próximo da superfície. Esta hipótese revelou-se incontornável para a obtenção de uma adequada correspondência entre os valores de campo medidos e os monitorizados, e é plausível.

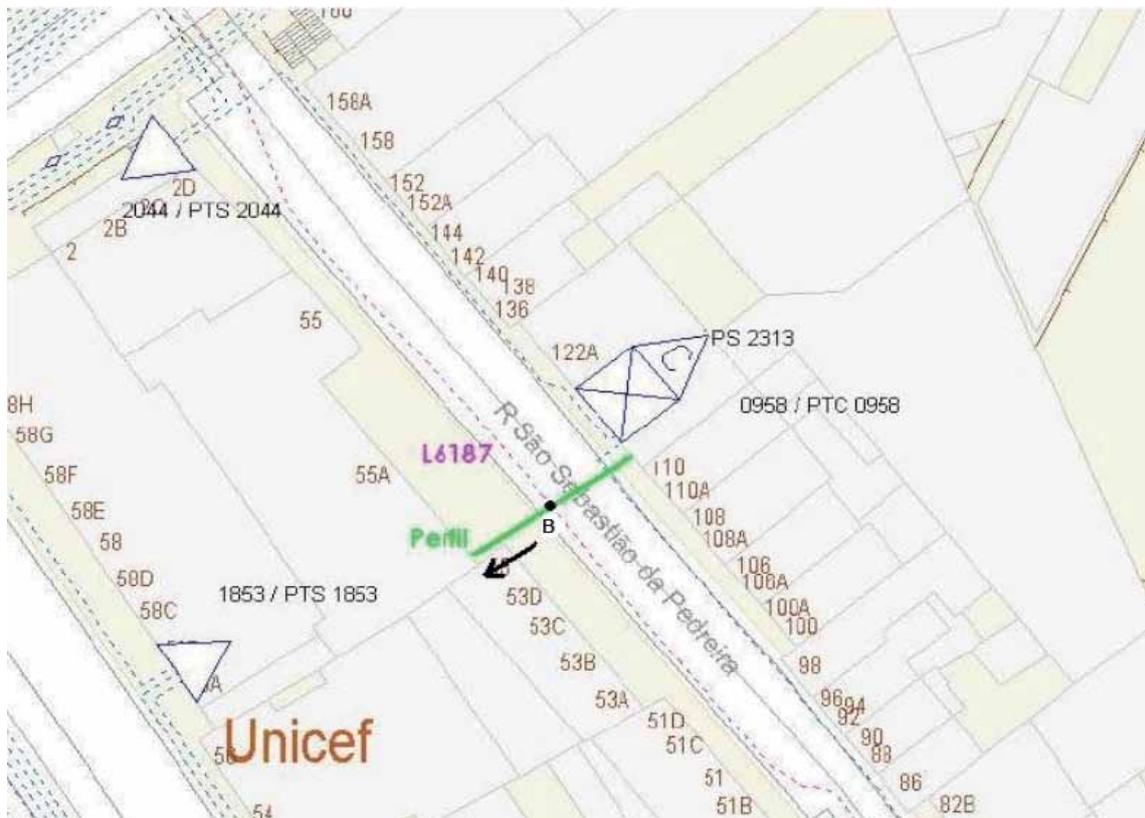


Figura 3.2 - Identificação da localização do cabo de 60 kV.

Deste modo, neste estudo o cabo de 60 kV foi colocado a 0,7m de profundidade ao longo de um troço de alguns metros de comprimento (Figura 3.5) e possui fases equilibradas dispostas em triângulo com uma distância entre centro de fases de 0,056m. Como o diâmetro de cada fase é 0,056m, isto significa que estão justapostos (Figura 3.6). Na Figura 3.7 encontra-se a representação do perfil transversal do cabo de 60kV no *software* EFC-400. Nesta representação apenas se mostramos almas dos condutores.

O perfil transversal com todos os pontos onde campo é calculado está representado na Figura 3.8. Os pontos com coordenada negativa correspondem aos pontos à esquerda do ponto B, ponto que se situa por cima do cabo. Estes são os que mais interessam a este estudo, uma vez que a habitação mais próxima está do lado esquerdo do cabo, na figura.



Figura 3.3 - Fotografias do passeio sob o qual está enterrado o cabo de 60 kV.



Figura 3.4 - Fotografia do cabo de 60 kV

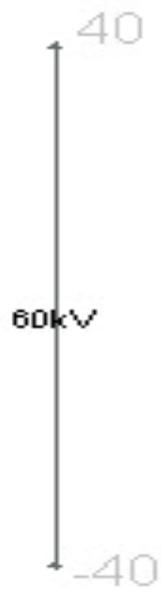


Figura 3.5 - Perfil longitudinal do cabo de 60kV.

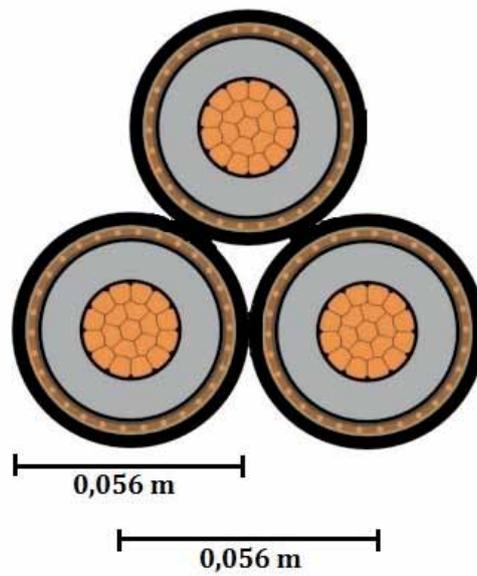


Figura 3.6 - Perfil transversal do cabo 60kV

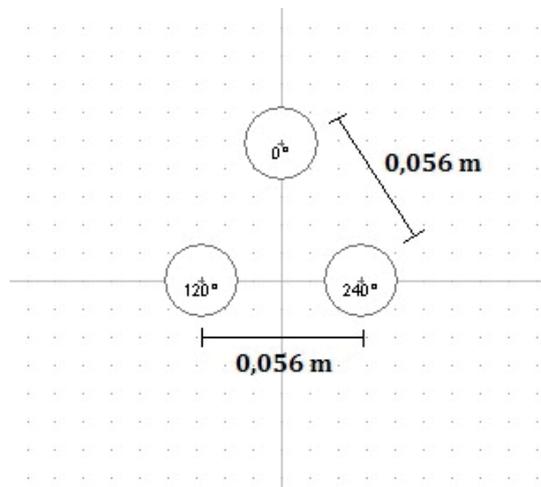


Figura 3.7 - Perfil transversal do cabo 60kV (almas condutoras)

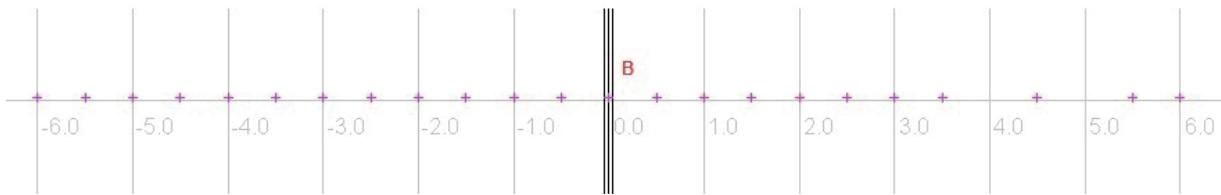


Figura 3.8 - Perfil do cabo de 60kV com pontos de medição.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DE UM CABO À POTÊNCIA MÉDIA DE 55MVA

(m)	B [□T]			
	0,5 m	1,0 m	1,5 m	Média (1 m)
6,0	0,386	0,371	0,353	0,370
5,5	0,456	0,435	0,410	0,434
5,0	0,546	0,516	0,481	0,514
4,5	0,664	0,620	0,571	0,618
4,0	0,824	0,758	0,685	0,756
3,5	1,046	0,942	0,832	0,940
3,0	1,366	1,194	1,023	1,194
2,5	1,841	1,542	1,268	1,550
2,0	2,575	2,025	1,578	2,059
1,5	3,730	2,677	1,948	2,785
1,0	5,492	3,477	2,339	3,769
0,5	7,662	4,237	2,661	4,853
B	8,825	4,570	2,788	5,394
-0,5	7,662	4,237	2,661	4,853
-1,0	5,492	3,477	2,339	3,769
-1,5	3,730	2,677	1,948	2,785
-2,0	2,575	2,025	1,578	2,059
-2,5	1,841	1,542	1,268	1,550
-3,0	1,366	1,194	1,023	1,194
-3,5	1,046	0,942	0,832	0,940
-4,0	0,824	0,758	0,685	0,756
-4,5	0,664	0,620	0,571	0,618
-5,0	0,546	0,516	0,481	0,514
-5,5	0,456	0,435	0,410	0,434
-6,0	0,386	0,371	0,353	0,370

Tabela 3.1 - Campo magnético ao longo do perfil transversal,

A potência de 55MVA é a máxima razoavelmente esperável neste tipo de cabo, ao longo de todo o seu percurso entre Subestações. Para esta potência a corrente por

fase é $I = 530 \text{ A}$. Nestas condições o campo magnético ao longo do perfil referido acima encontra-se na Tabela 3.1.

As seguintes Figuras permitem a visualização do campo magnético em torno do cabo de 60kV.

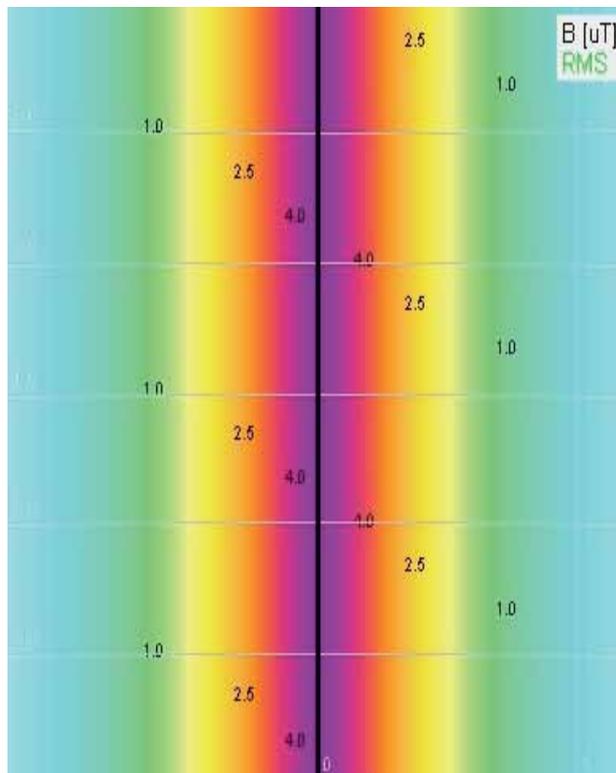


Figura 3.9 - Campo magnético a $z=1\text{m}$ ao longo do perfil longitudinal

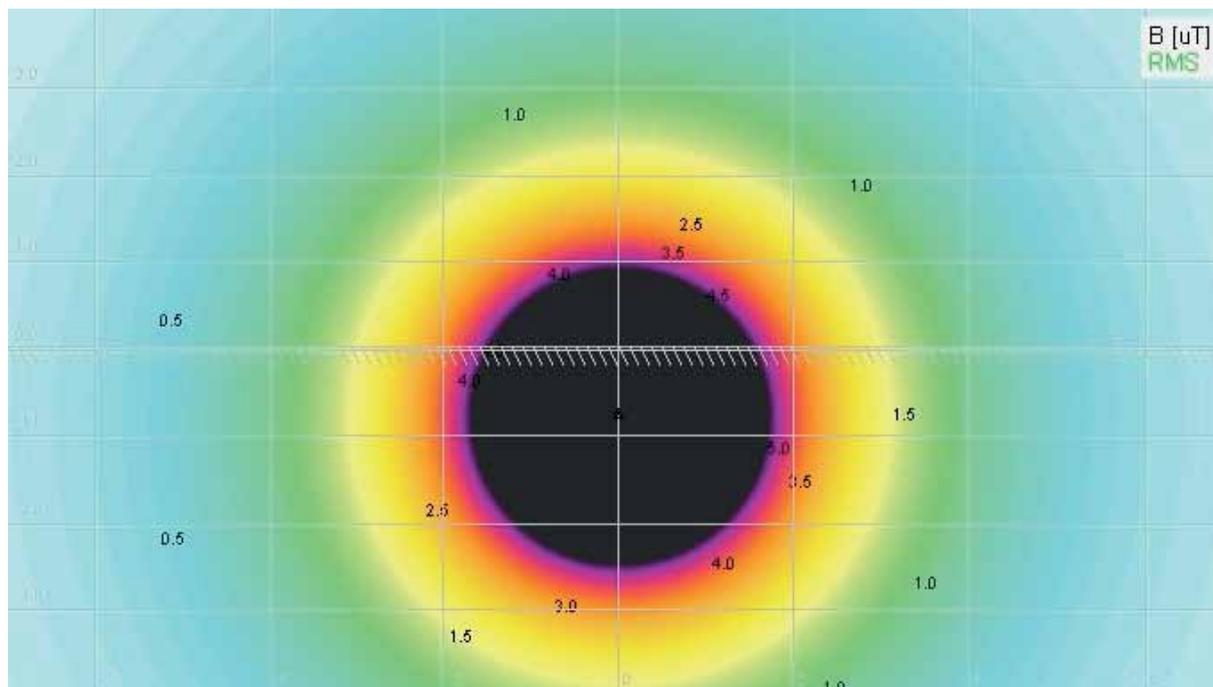


Figura 3.10 - Campo magnético a $y=0$ ao longo do perfil transversal

Nesta situação os valores do campo são suficientemente elevados, inclusive a alguns metros de distância de B e, por isso, poderão justificar a aplicação de medidas de mitigação. No caso em estudo a distância lateral do cabo à habitação é de 3,5m e, por isso, a região de interesse é a 4m de distância do mesmo (de acordo com a norma CEI 62110), considerando a espessura das paredes e a distância de 0,20 metros a considerar para o seu interior. Para esta distância o campo magnético médio é muito reduzido (inferior a $1 \mu T$) e, portanto, neste caso e em outros em que similar distância lateral exista, não há necessidade de qualquer medida de mitigação.

No entanto, estes cabos podem não estar colocados a uma distância tão elevada das habitações, havendo, por isso, interesse em estudar e aplicar medidas que diminuam os valores do respectivo campo sempre que as distâncias laterais a zonas de exposição pública sejam inferiores.

Para instalações existentes e afastadas de edifícios sem crianças (escritórios, por exemplo), a prática mais exigente de um país da União Europeia, a Itália, recomenda o “*objectivo de qualidade*” de $3 \mu T$ o que, como se vê, é sempre satisfeito, não requerendo, por isso, qualquer medida de mitigação.

3.2 ESTUDOS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO A CURTA DISTÂNCIA DE EDIFÍCIOS HABITADOS

As técnicas seleccionadas para análise foram:

- Distância do cabo à região de interesse;
- Maior enterramento;
- Colocação de redes metálicas como blindagem.

Como o objectivo é mitigar na vizinhança do cabo, em particular na vizinhança em que haja edifícios, admite-se o lado esquerdo como o a mitigar. Deste modo, apenas são apresentados os valores que dizem respeito a esse lado. Neste caso, como já foi referido anteriormente, a distância do cabo à habitação é 3,5m, logo, pela norma CEI 62110 o ponto de medição do campo magnético é a 4m. No entanto, os cabos podem não estar colocados a uma distância tão elevada das habitações, por isso, definiu-se uma região de interesse mais ampla: entre B (0m) e 4m de distância ao cabo.

3.2.1 AUMENTO DA PROFUNDIDADE DE ENTERRAMENTO

Com recurso a esta técnica foi incrementada a profundidade a que o cabo está enterrado, partindo do valor inicial de 0,7m até 1,4m. O incremento foi feito aumentando gradualmente 0,10m a profundidade de enterramento do cabo com o objectivo de relacionar o campo magnético com a profundidade de enterramento e, também, a sua relação com a distância.

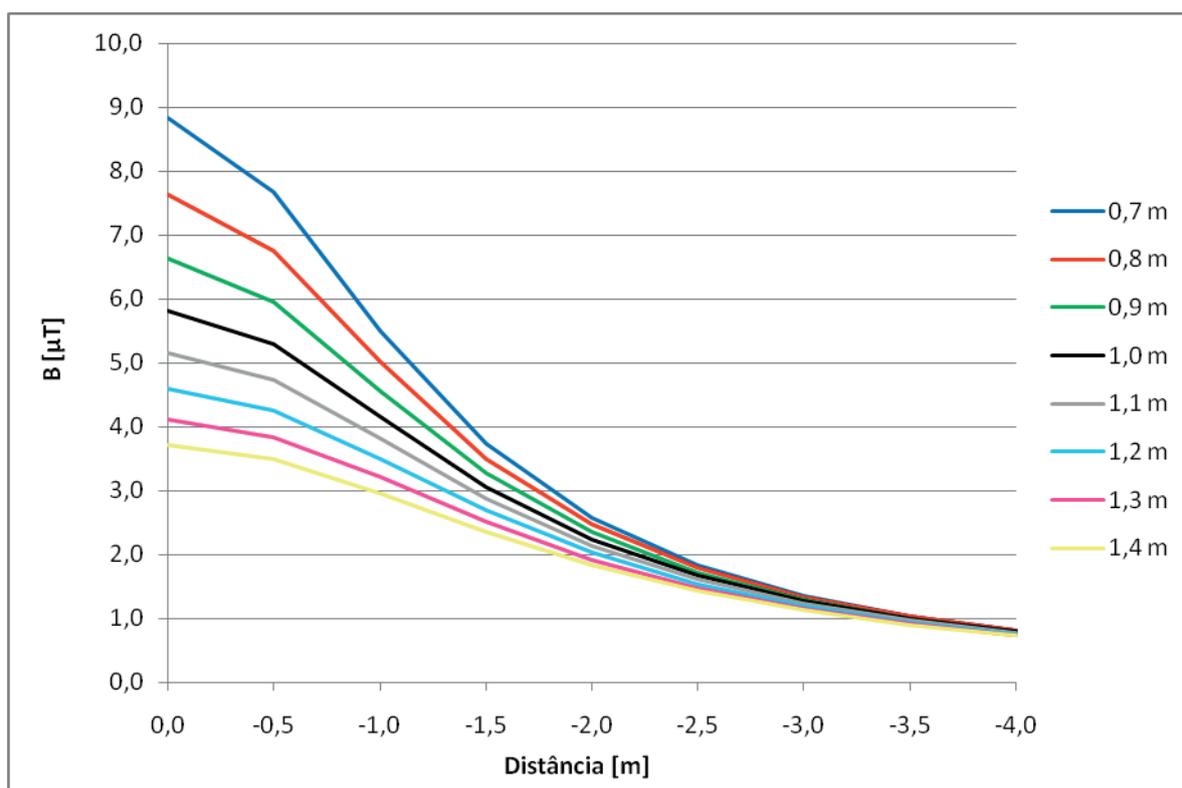


Figura 3.11 - Campo magnético com $I = 530A$ para as diferentes profundidades de enterramento a $0,5 m$ de altura do solo.

Da Figura 3.11 conclui-se que, naturalmente, há uma diminuição do campo magnético à medida que a profundidade a que o cabo está enterrado aumenta. Contudo, essa diminuição só é significativa exactamente sobre o cabo, sendo menos acentuada a partir de sensivelmente 2,5m de distância lateral, como é evidenciado na Figura 3.12, o que lhe retira interesse prático.

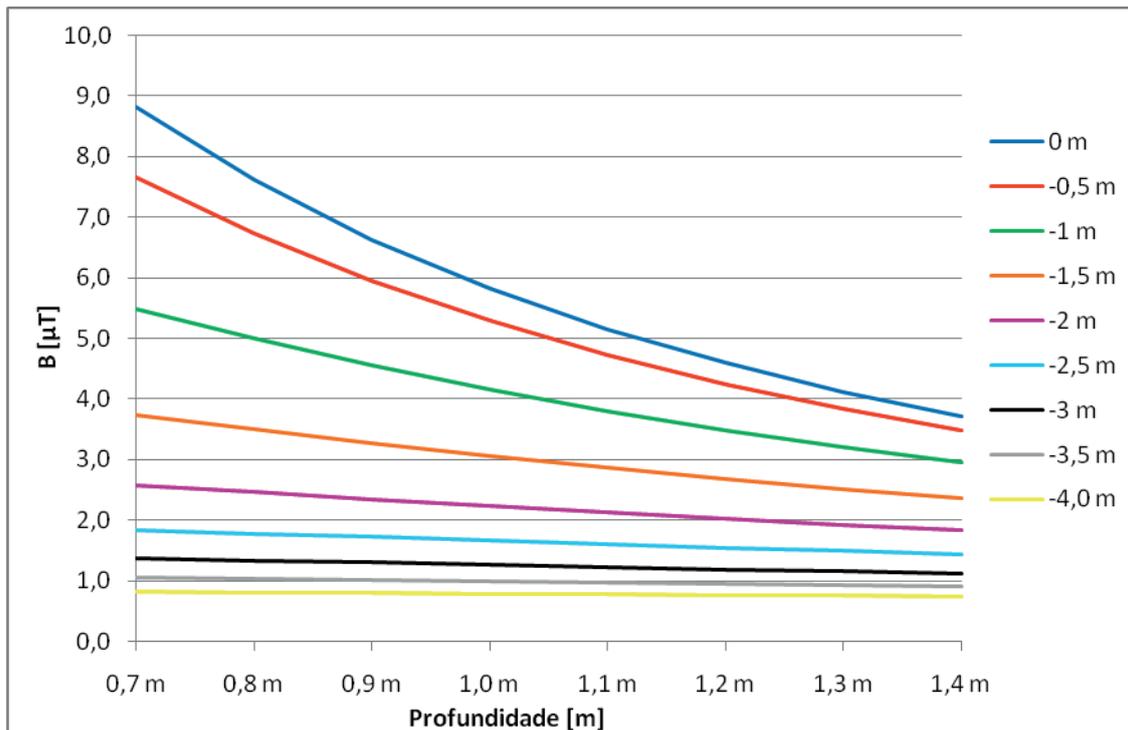


Figura 3.12 - Variação do campo magnético, com $I = 530A$, em cada ponto do perfil transversal em função da profundidade de enterramento a $z = 0,5 m$.

Na Figura 3.13 encontra-se um gráfico que compara os resultados com o cabo enterrado a 0,7m e enterrado a 1,4m.

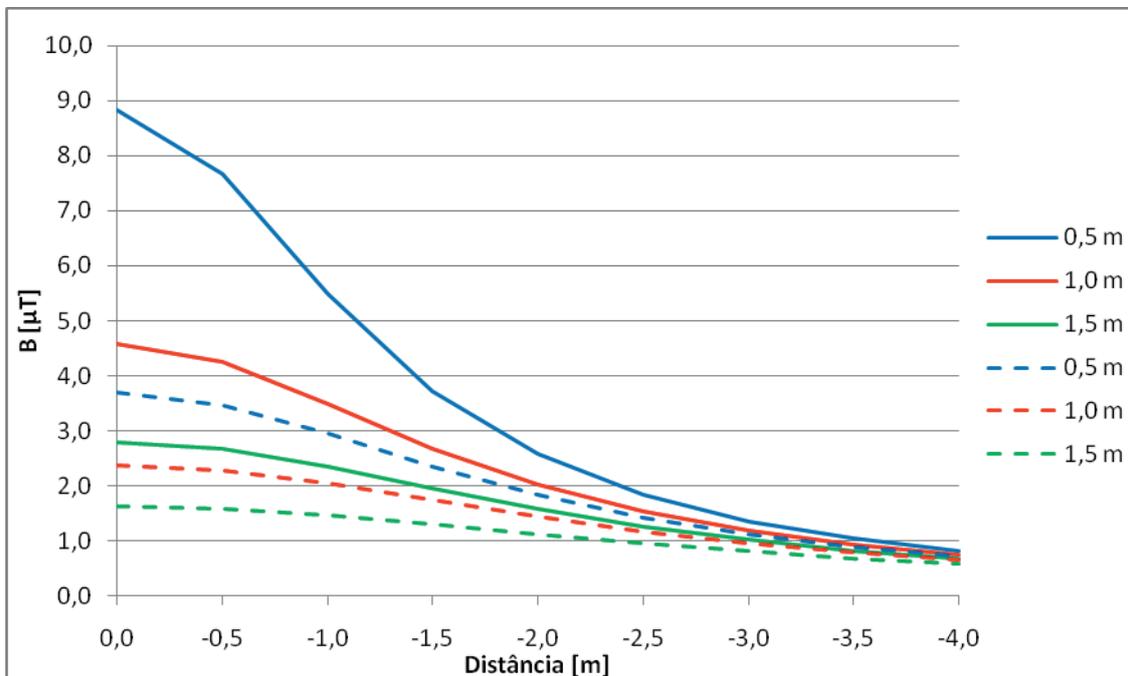


Figura 3.13 - Campo magnético com $I = 530A$ para cabo enterrado a 0,7m (traço a cheio) e a 1,4m (tracejado) para três alturas relativamente ao solo.

Para esta profundidade dupla da inicialmente considerada (1,4m), o campo magnético médio é inferior a $1\mu T$ a partir de 3m de distância ao cabo (2,5m da superfície exterior das paredes). Isto traduz-se numa melhoria de cerca de 0,4m face à profun-

didade de enterramento inicial. Apesar da melhoria, esta solução envolve elevados custos de operação associados à escavação o que a pode tornar desinteressante relativamente às demais.

3.2.2 BLINDAGEM POR COLOCAÇÃO DE REDES METÁLICAS MALHADAS

A blindagem de cabos por metais, nomeadamente por chapas metálicas, é uma solução comum estudada internacionalmente e publicada amplamente, mas apresenta elevados custos. Por esta razão investigar-se-á a blindagem com redes metálicas de uso comum em cercas como elementos separadores, portanto constituindo soluções menos dispendiosas em material e construção.

Relativamente às dimensões da rede, no que diz respeito à sua largura quanto maior melhor. O mesmo se passa para a espessura, uma vez que faz aumentar as correntes parasitas e conseqüentemente melhora a eficácia da mitigação. Quanto mais perto a rede se encontrar da fonte, melhor. Porém, quando a rede é instalada muito perto dos cabos e, caso seja de alumínio, pode reduzir a dissipação de calor. Este factor não é, geralmente, importante, mas por vezes é preciso ser levado em conta para calcular a transferência de energia.

A resistência eléctrica de um material define-se como a medida de oposição à passagem de corrente eléctrica. Esta grandeza é directamente proporcional à resistividade eléctrica e inversamente proporcional à área da secção do material. Isto significa que o aumento da secção (para a mesma resistividade e comprimento) provoca uma diminuição da resistência. Quanto mais baixa for a resistência mais facilmente o material permite a passagem de corrente, aumentando, deste modo, as correntes parasitas e, conseqüentemente, a eficácia de mitigação.

Como a condutividade do alumínio é maior que a do aço, e sendo a condutividade inversamente proporcional à resistividade, para obter a mesma resistência é necessário que a secção das redes do aço seja maior que a do alumínio.

No que se segue são estudadas diferentes formas que os mecanismos de blindagem podem ter. São estudados os casos em que estes são constituídos por uma, duas ou três redes metálicas. Para cada uma das três formas consideradas foram efectuadas diversas simulações a fim de estudar o efeito da variação da largura, comprimento e distância ao cabo para um determinado material. O material escolhido foi aço de construção civil com retícula de 0,10m e secção de 200mm². Entende-se por retícula a dimensão dos quadrados que constituem a rede. Em todos os casos foi imposta a

condição do comprimento da rede metálica ser muito maior que a sua largura a fim de eliminar os efeitos de fronteira.

Feita a análise da forma dos mecanismos de blindagem e escolhida a tipologia que garante resultados mais baixos de campo magnético procedeu-se à avaliação do material e respectivas características.

A. Uma só Rede Metálica

Com uma única rede metálica podem-se obter diversas configurações, fazendo variar a sua posição relativamente ao cabo. Para isso, fez-se variar o ângulo que a rede faz com o eixo horizontal. A figura 3.14 ilustra essa variação.

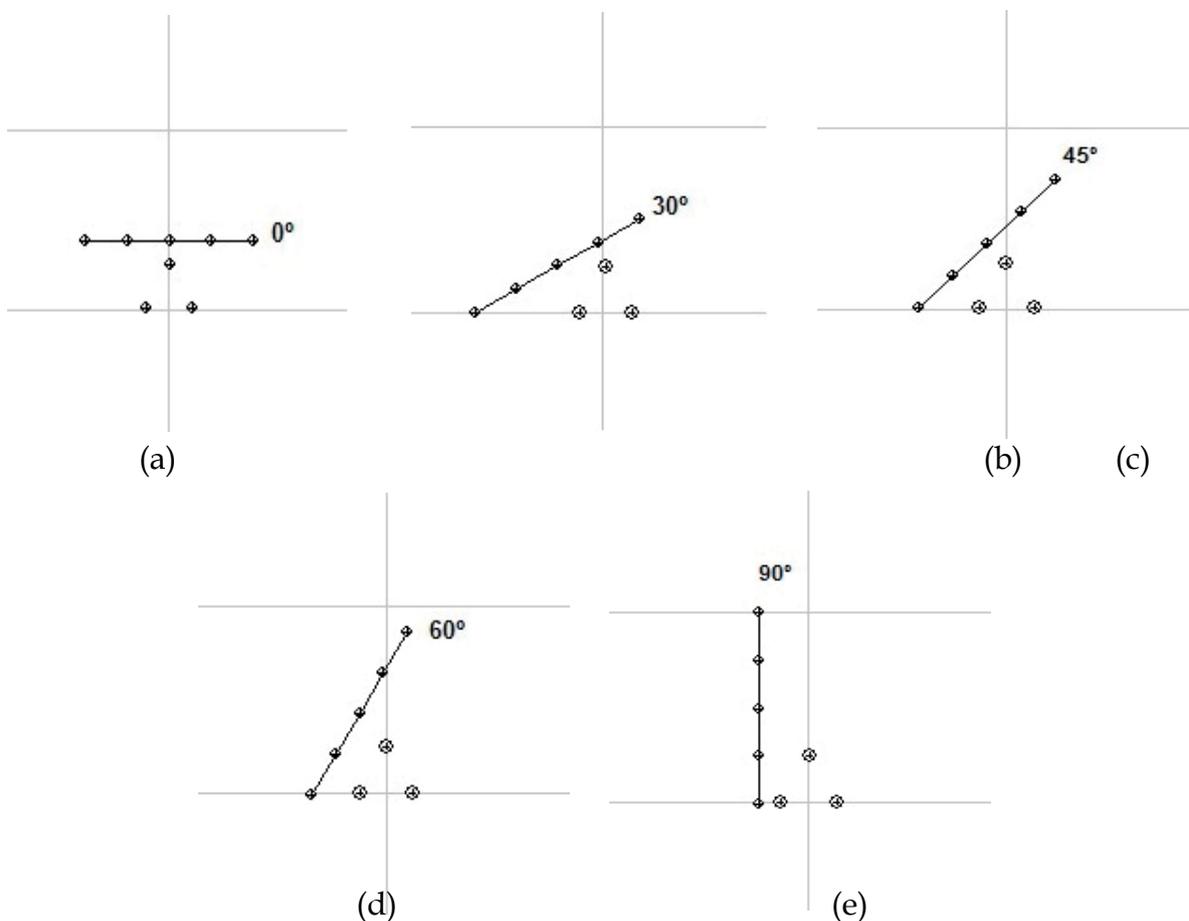


Figura 3.14 - Cinco posicionamentos relativamente ao cabo com uma rede metálica.

Para identificação da melhor inclinação foram efectuadas diversas simulações tendo como variáveis: o ângulo, a distância da rede ao cabo, a largura e o comprimento da rede metálica. Para além da análise da posição da rede, é igualmente importante investigar o efeito desta com a variação da largura para um determinado comprimento.

Definiram-se dois comprimentos da rede metálica: 3m e 5m. Como o comprimento tem de ser maior que a largura e, por razões económicas e operacionais, a largura da grelha não deve ser muito grande, definiu-se que a largura mínima como 0,3m e a máxima 0,5m. A rede foi colocada a 0,05m do cabo e o material de que é constituída é aço de construção civil com retícula de 0,10m e secção de 200mm².

Para o objectivo visado, a redução da distância lateral a áreas de exposição pública à altura média de 1,0m do solo, as melhores inclinações obtidas para as grades foram, com poucas diferenças, os 30° e os 45°, sendo também pouco diferente o resultado obtido com grades de 3 e de 5m de comprimentos. Por este motivo, ilustram-se no seguimento os resultados obtidos para 30° de inclinação com grade de 3m de comprimento (solução mais económica).

Na Figura 3.15 encontra-se a representação gráfica do campo magnético médio inicial e para as diferentes larguras da rede.

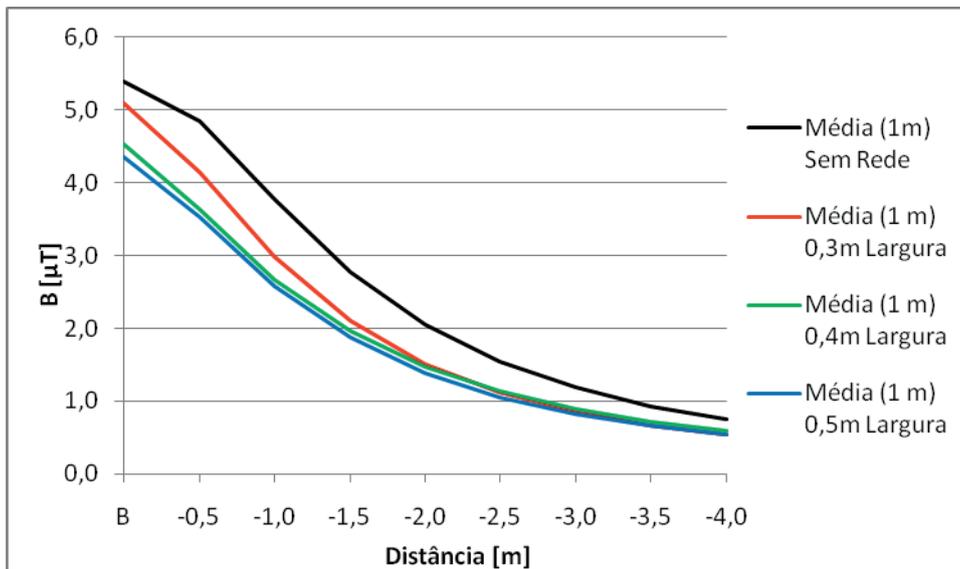


Figura 3.15 - Campo magnético médio para diferentes larguras de uma rede com 3m de comprimento posicionada a 30°

Para uma rede com 3m de comprimento posicionada a 30° a sua largura é indiferente, porque o campo magnético médio é extremamente baixo (inferior a 1μT) para a mesma distância ao cabo. Independentemente da largura, o campo magnético médio inferior a 1μT a 2,7m de distância do cabo (2,2m da superfície exterior das paredes), sendo das soluções que recorrem a redes metálicas esta a que apresenta melhores resultados.

B. Rede Metálica Convexa

Ainda com apenas uma rede metálica é possível obter outra configuração – convexa, representada na Figura 3.16. Os comprimentos considerados foram os do caso anterior. Relativamente à largura foram consideradas apenas duas hipóteses: 0,3m e 0,5m. É impossível formar um semicírculo com 0,4m de largura, uma vez que a retícula é de 0,1m.

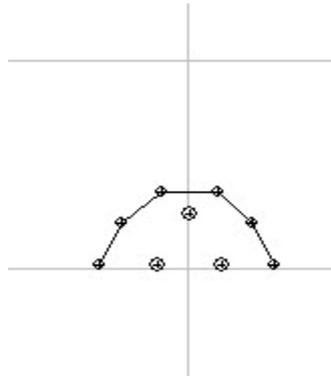


Figura 3.16 - Configuração da rede metálica convexa.

Quando essa rede tem 3m de comprimento os resultados do campo magnético são os apresentados na fig. 3.17.

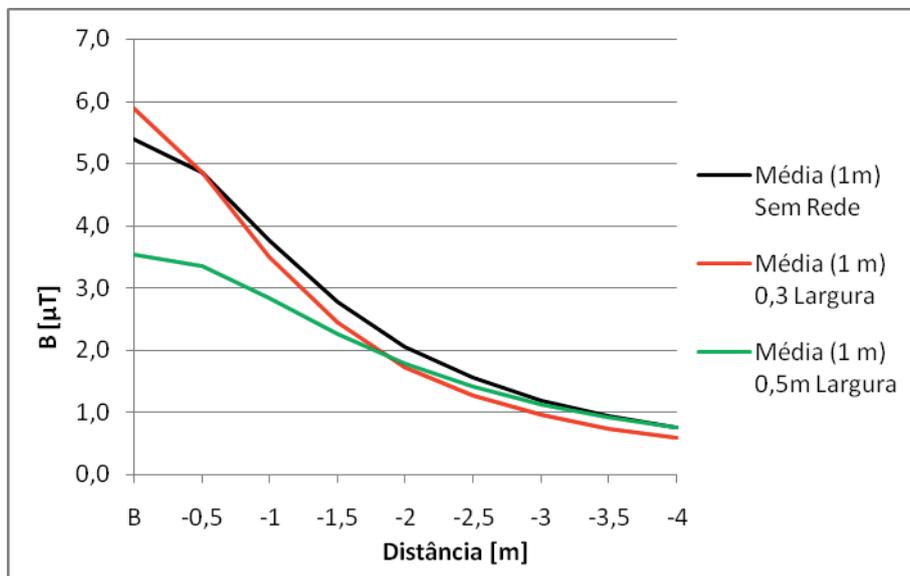


Figura 3.17 - Campo magnético médio para diferentes larguras de uma rede convexa com 3m de comprimento

O campo magnético médio reduz-se significativamente (por exemplo é inferior a $1\mu T$) a partir de:

- 2,9m de distância ao cabo (**2,4m** da superfície exterior das paredes), para uma rede de largura 0,3m;

- 3,5m de distância ao cabo (**3,0m** da superfície exterior das paredes), para uma rede de largura 0,5m;

Com redes de largura 0,5m não há melhoria, enquanto que com redes de largura 0,3m há uma melhoria de 0,6m face à ausência de rede metálica.

Da análise conclui-se que, quando o objectivo é reduzir a distância ao cabo para a qual o campo magnético médio se reduz significativamente (por exemplo para um valor inferior a $1\mu T$), não há vantagem em utilizar redes de 5m, uma vez que não há melhoria face à ausência de rede metálica. Porém, a eficácia de mitigação junto do cabo é substancial.

Portanto, tendo em conta as anteriores soluções também com uma rede metálica, esta configuração não se apresenta vantajosa.

Discussão

Com uma solução que envolve uma rede metálica os resultados são sempre piores quando a rede está posicionada a 0° (horizontalmente), independentemente do comprimento e largura da rede. Para os restantes posicionamentos da rede metálica as melhorias são, regra geral, correspondentes a 20% a 30% da distância inicial.

As redes convexas, em comparação com as soluções que envolvem apenas uma rede metálica, não apresentam valores que constituam vantagem.

C. Duas Redes Metálicas

Com a junção de duas redes metálicas obtém-se uma configuração em L ilustrada na Figura 3.18.

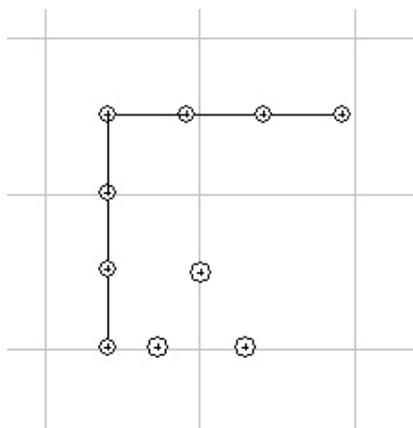


Figura 3.18 - Configuração com duas redes metálicas ou em L

Tal como no caso em que só há uma rede metálica também para este caso é importante analisar a variação das diversas variáveis: altura da rede colocada vertical-

mente, largura da rede colocada horizontalmente e comprimento da rede total. Definiram-se dois comprimentos (3m e 5m) e para cada um deles fez-se variar a largura da rede horizontal e a altura da rede vertical. Como referido acima, a condição do comprimento ser muito maior que a largura tem que se verificar. Portanto, definiu-se um valor mínimo e máximo para a altura e largura das redes, 0,3m e 0,5m.

Para todas as simulações efectuadas optou-se por colocar o centro da rede horizontal sempre alinhado com o centro do triângulo formado pelos três condutores. Deste modo, a variação da distância das redes ao cabo está implícita, uma vez que o incremento das duas variáveis faz também aumentar a distância das redes ao cabo.

Fixando o comprimento em 3m, fez-se variar a largura da rede colocada horizontalmente para uma determinada altura da rede vertical.

Para uma rede vertical com 0,3m de altura, os valores do campo médio para três larguras da rede horizontal encontram-se na Figura 3.19.

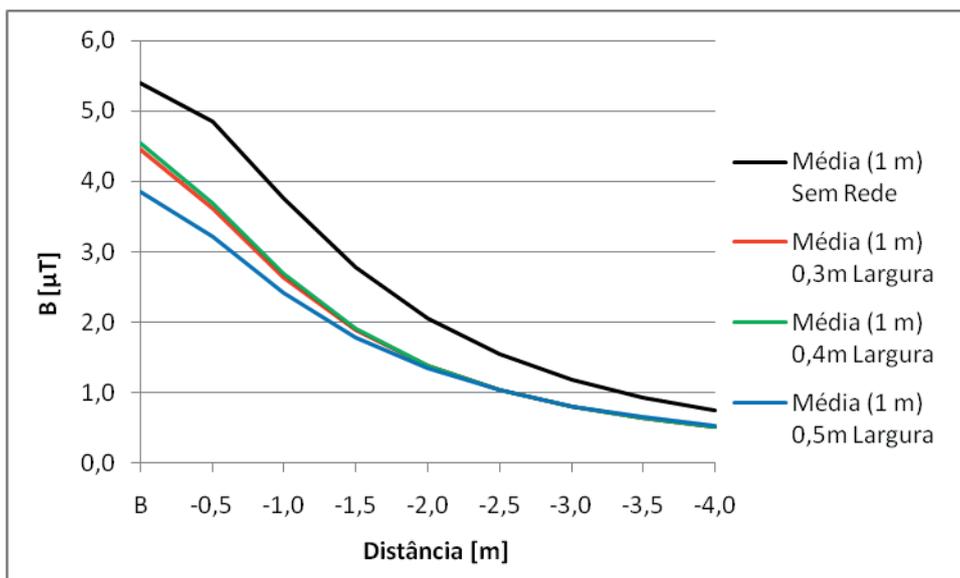


Figura 3.19 - Campo magnético médio para diferentes larguras da rede colocada horizontalmente, com rede vertical com 0,3m de altura

O campo magnético médio é muito reduzido (inferior a $1\mu T$), para as três larguras consideradas, a partir de 2,6m de distância ao cabo (**2,1m** da superfície exterior das paredes). Este valor representa uma melhoria de **0,9m** face à ausência de rede metálica, mas de apenas 0,1m relativamente à alternativa de uma única grade inclinada a 30° ou a 45° .

D. Três Redes Metálicas

Ao juntar três redes metálicas obtém-se uma configuração também conhecida por U invertido, ilustrada na Figura 3.20.

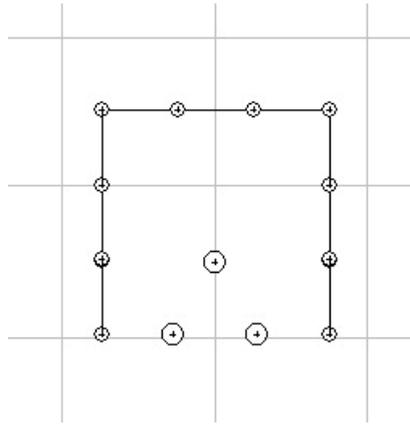


Figura 3.20 - Configuração com três metálicas ou em U invertido

Na Figura 3.21 está a ilustração gráfica do comparativo do campo magnético médio para cada uma de três larguras.

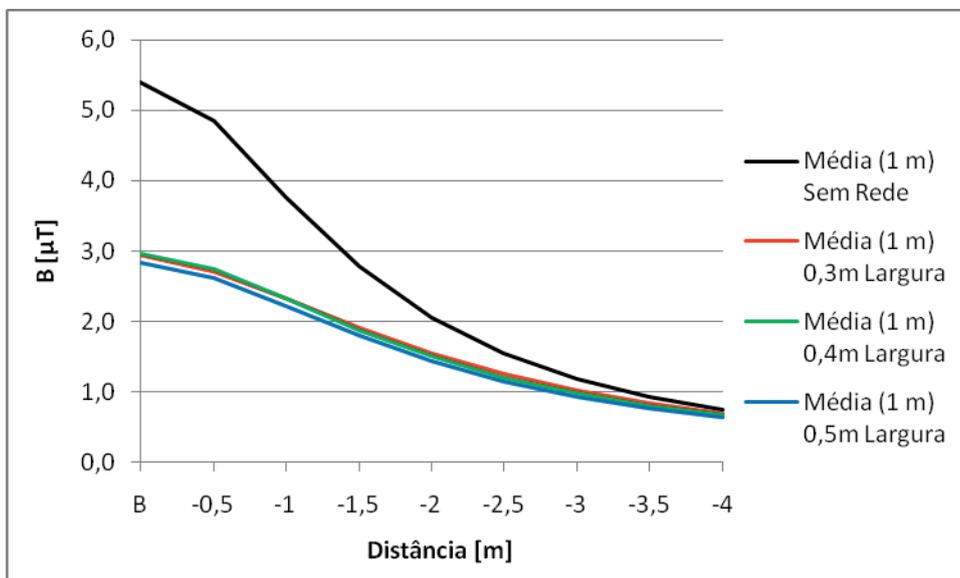


Figura 3.21 - Campo magnético médio para diferentes larguras da rede colocada horizontalmente, com redes verticais com 0,3m de altura

Discussão

Com redes metálicas em U invertido, independentemente do seu comprimento e largura, a distância para a qual o campo magnético médio se reduz significativamente (por exemplo para um valor inferior a $1\mu T$) é sempre maior do que nas soluções anteriormente estudadas. A isso acresce o facto de esta solução ser mais dispendiosa pois faz uso de três redes metálicas.

No entanto, para distâncias muito próximas do cabo obtêm-se bons factores de mitigação.

E. Material das Grades

A fim de compreender o comportamento dos diversos materiais e das suas características físicas foram utilizadas as seguintes redes:

- 3AA7: Painel corrugado com retícula de 0,03m feito de Alumínio Anodizado com secção de 7mm²;
- 3AA16: Painel corrugado com retícula de 0,03m feito de Alumínio Anodizado com secção de 16mm²;
- 4AA16: Painel corrugado com retícula de 0,04m feito de Alumínio Anodizado com secção de 16mm²;
- 3AZ7: Painel corrugado com retícula de 0,03m feito de Aço Zincado com secção de 7mm²;
- 10AC80: Malha com retícula de 0,10m feita de aço de construção civil com secção de 80mm²;
- 10AC200: Malha com retícula de 0,10m feita de aço de construção civil com secção de 200mm².

Os valores das propriedades eléctricas relativas aos aços de construção são:

- Resistividade: 0,205 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$;
- Permeabilidade magnética relativa, μ_r : 100;
- Permittividade eléctrica relativa, ϵ_r : 1.

Relativamente ao alumínio as características utilizadas são as seguintes:

- Resistividade: 0,029280 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$;
- Permeabilidade magnética relativa, μ_r : 1;
- Permittividade eléctrica relativa, ϵ_r : 1.

A resistividade do alumínio puro é 0,0282 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ mas, devido ao facto de poderem existir impurezas nas redes consideradas, utiliza-se o valor típico de 0,02928 $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$.

As redes metálicas de alumínio existem à venda no mercado, enquanto as de aço de construção foram consideradas apenas para fins de estudo teórico.

Foram efectuadas diversas simulações com as diferentes características das redes com o intuito de verificar a influência da retícula, secção e do material utilizado. Para tal utilizaram-se duas redes metálicas (ou configuração em L) com 3m de com-

primento e 0,5m de altura e largura. Os resultados são apresentados na Figura que se segue.

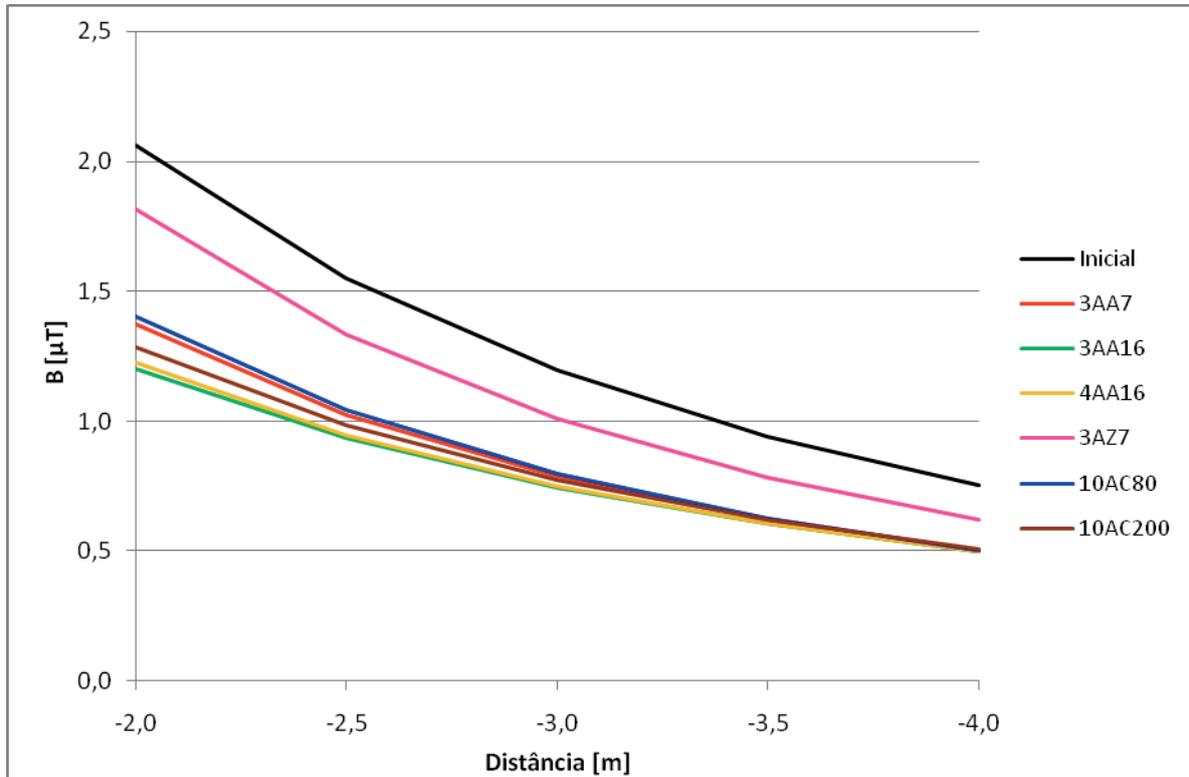


Figura 3.22 - Campo magnético médio com diferentes materiais, retículas e secções para a mesma rede metálica (escala ampliada)

No que diz respeito à secção e, conforme expectável, quanto maior a secção mais baixo é o campo magnético (melhor a mitigação).

Relativamente à retícula, pela comparação da linha a verde (retícula 0,03m) e a laranja (retícula 0,04m), conclui-se que os resultados são semelhantes, embora os resultados com retícula mais pequena sejam ligeiramente melhores. Isto significa que redes mais compactas são melhores.

Verifica-se que os resultados obtidos com aço de construção civil com 0,10m de retícula e 200mm² de secção são idênticos aos obtidos com alumínio anodizado com 0,03m de retícula e 16mm² de secção e com alumínio anodizado com 0,04m de retícula e 16mm² de secção. Como foram feitas simulações com 10AC200 e, sendo os resultados semelhantes a 3AA16 e 4AA16 é fácil extrapolar todos os valores do campo magnético apresentados no relatório, bastando, para isso, multiplicá-los por um factor de 0,95. Para efeitos práticos devem-se considerar os valores iguais, uma vez que a melhoria é insignificante.

Portanto, na prática, devem ser implementadas as redes de alumínio porque para além de existirem no mercado com estas dimensões, são mais fáceis de montar uma

vez que sua densidade é inferior e terem melhor resistência à corrosão.

3.3 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA CABOS SUBTERRÂNEOS DE 60 KV LATERALMENTE PRÓXIMOS DE EDIFÍCIOS

Os cabos subterrâneos de Distribuição de energia não constituem geralmente um problema enquanto fontes emissoras de campo magnético, mesmo se comparados com as recomendações mais severas adoptadas por um país da União Europeia, ou seja, $3\mu\text{T}$ (“*objectivo de qualidade*”) e $10\mu\text{T}$ (“*nível de atenção*”), respectivamente para instalações novas e já existentes.

Caso se pretendam atingir níveis ainda mais exigentes de redução do valor do campo magnético, exceptuada a óbvia solução de uma deslocação dos cabos para um maior afastamento das referidas paredes, uma solução relativamente barata e eficaz consiste no enterramento de uma grade, preferencialmente de alumínio, na zona a mitigar e lateralmente ao cabo, com uma inclinação horizontal entre 30° e 45° .

Nenhuma outra solução pouco dispendiosa, como um maior enterramento ou blindagens mais complexas com o mesmo tipo de material, acrescenta significativa melhoria na mitigação.

4. MEDIDAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO EMITIDO POR POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO INTERIORES

4.1 ESTUDO DE UM POSTO DE TRANSFORMAÇÃO INTERIOR

O estudo de mitigação aqui apresentado incide sobre o modelo computacional de um PT situado na cave de um edifício residencial, cuja potência nominal do único transformador presente é de 400 *kVA*, com relação de transformação de 10kV/400V. Na Figura 4.1 é possível observar aspectos da composição interior do PT em causa.



Figura 4.1 - Fotografias do PT, mostrando aspectos da sua composição interior, situado na cave de um edifício residencial

A disposição dos equipamentos no modelo computacional do PT foi efectuada com recurso a uma planta da instalação e com fotos do local.

Segundo os dados experimentais recolhidos no local, as correntes medidas foram de **100A** nas fases e de **30A** no neutro, na saída do transformador, o que corresponde a uma potência de **70 kVA**, cerca de 1/6 da potência nominal do transformador em causa. Com essas correntes e medições de campo B efectuadas no local, procedeu-se à calibração do modelo, para garantir que é fidedigno.

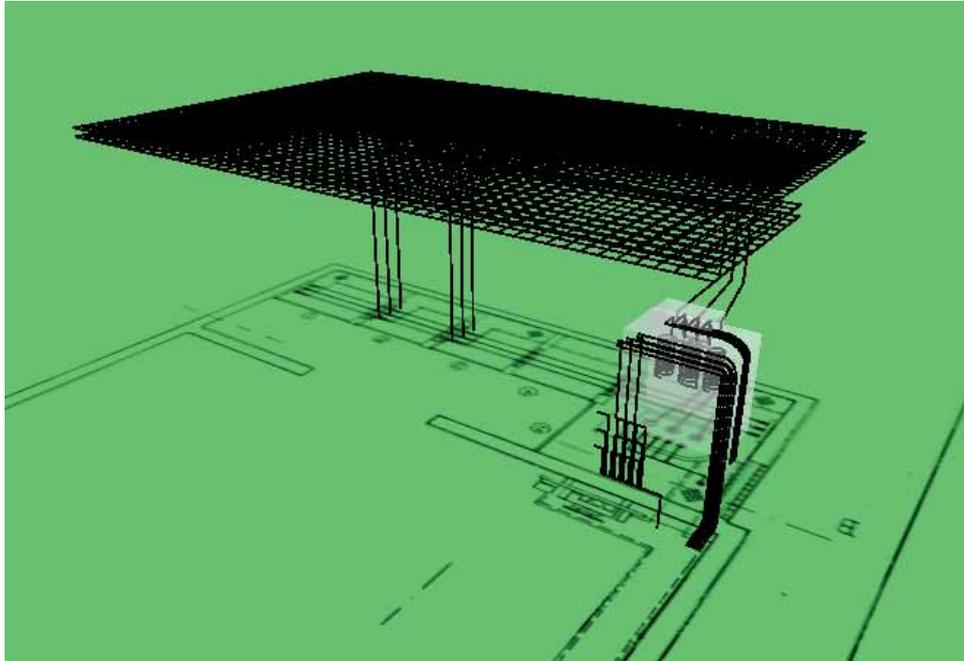


Figura 4.2 - Modelo computacional do PT considerando a armadura da laje

Considerando uma carga de 50% da potência nominal do transformador, utilizaram-se correntes de **11,6 A** na MT e de **285 A** em cada uma das fases de BT, obtendo-se **85,7A|1,144°** no neutro. As conclusões retiradas da modelação foram as seguintes:

- Nos apartamentos localizados por cima do PT, o campo de indução magnética calculado a **4,0 m** de altura (que pretende representar **0,5 m** de altura no apartamento), atinge cerca de **1,09 μT** a meio metro do solo, sendo superior a **1 μT** no interior do apartamento²⁰ numa área de, aproximadamente, **1,5 m²**. Constatou-se ainda que o campo médio, em altura, atinge os **0,77 μT** ;
- O valor de pico de campo B só se verifica numa reduzida área localizada imediatamente por cima dos terminais de saída do transformador, decaindo rapidamente fora dessa zona.

²⁰ Na simulação efectuada a **4,0 m** de altura verifica-se que o campo é superior a **1 μT** numa área de **3 m²**. No entanto, os elementos do circuito que mais contribuem para o campo calculado estão localizados na periferia do edifício, fazendo com que parte do campo calculado não esteja no interior das habitações em estudo.

Foi definido um perfil na zona de interesse, P1, ilustrado na Figura 4.3, de modo a estabelecer comparações entre os campos calculados antes e após as medidas implementadas. As simulações foram efectuadas a alturas de $4,0\text{ m}$, $4,5\text{ m}$ e $5,0\text{ m}$, pretendendo representar $0,5\text{ m}$, $1,0\text{ m}$ e $1,5\text{ m}$, respectivamente, no apartamento imediatamente por cima do PT, visto que o pé-direito da sala que contém o PT é de, aproximadamente, $3,2\text{ m}$.



Figura 4.3 - Perfil definido nas habitações localizadas imediatamente por cima do PT.

Realça-se o facto desta instalação eléctrica estar localizada na cave de um edifício residencial, o que significa que não existem habitações adjacentes ao PT. Devido a este facto, não foi criado um perfil nessa zona, contrariamente ao caso de estudo seguinte.

Como o campo médio inicial é bastante reduzido (inferior a $1\ \mu T$), não se justificaria nenhuma medida de mitigação. Contudo, pese embora este facto, ainda se estudará a modificação da disposição dos cabos de BT. Tem interesse aplicar esta medida porque, como se verá mais à frente, os condutores de fase e de neutro são ligados no QGBT a diferentes alturas, como se pode observar na Fotografia 1 da Figura 4.1.

4.1.1 MODIFICAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO

No modelo inicial deste PT, os cabos de baixa tensão saem do secundário do transformador com uma disposição em esteira, fazendo parte do percurso a $-0,4\text{ m}$ de altura (numa caleira) onde, posteriormente, sobem paralelamente ao QGBT até uma

altura próxima de $1,90\text{ m}$, exceptuando o cabo de neutro, que entra por baixo e se liga directamente ao barramento de neutro.

Na execução desta medida de mitigação modificou-se a geometria dos cabos de BT, utilizando um arranjo otimizado que será discutido adiante (secção 4.3.1). Devido à diferença de altura a que é feita a ligação do condutor de neutro no QGBT, desenvolveram-se dois modelos com essa configuração dos cabos de BT modificada: um onde se manteve o neutro a entrar por baixo do QGBT (Figura 4.4) e outro onde o neutro foi modificado passando a entrar por cima, tal como os condutores de fase (Figura 4.5). Com isto espera-se determinar se o percurso do condutor de neutro influencia o campo B calculado nas habitações.

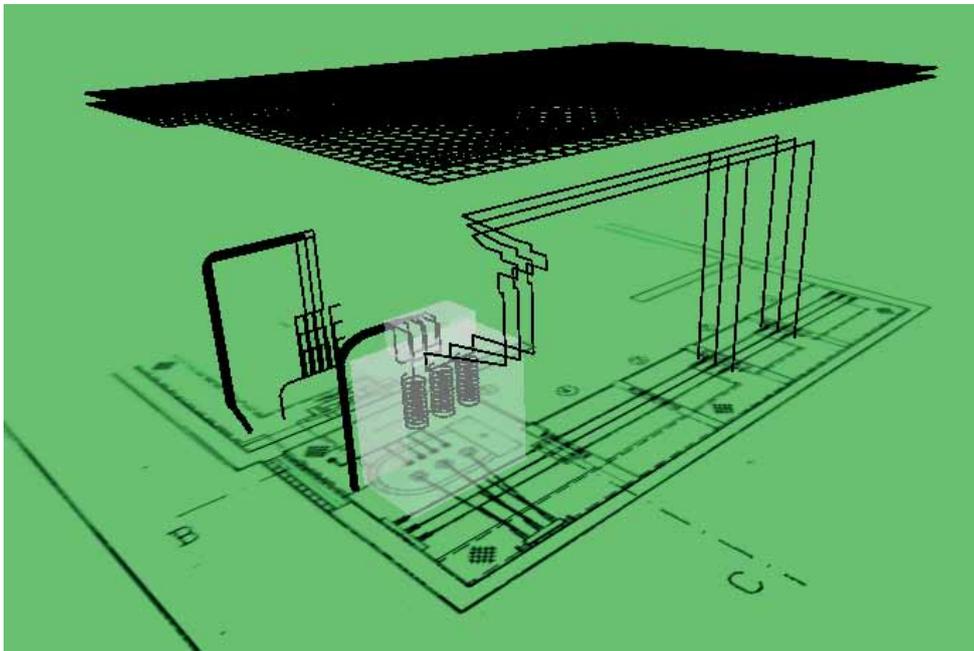


Figura 4.4 - Modelo do PT com a configuração dos cabos de BT modificada (vd. Secção 4.3.1)

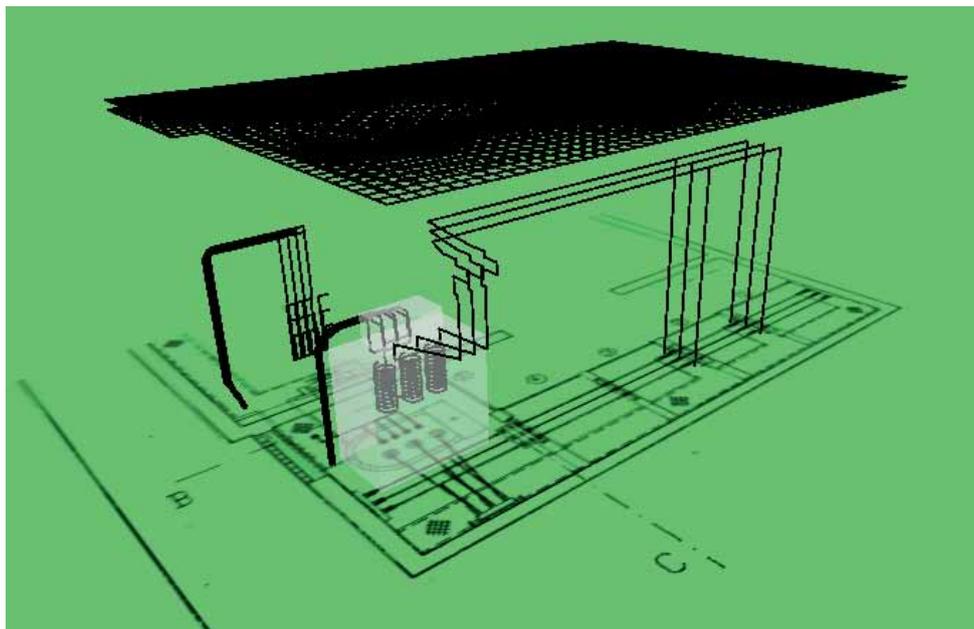


Figura 4.5 - Modelo do PT com a configuração dos cabos de BT modificada (vd. Secção 4.3.1) e neutro a entrar no QGBT por cima

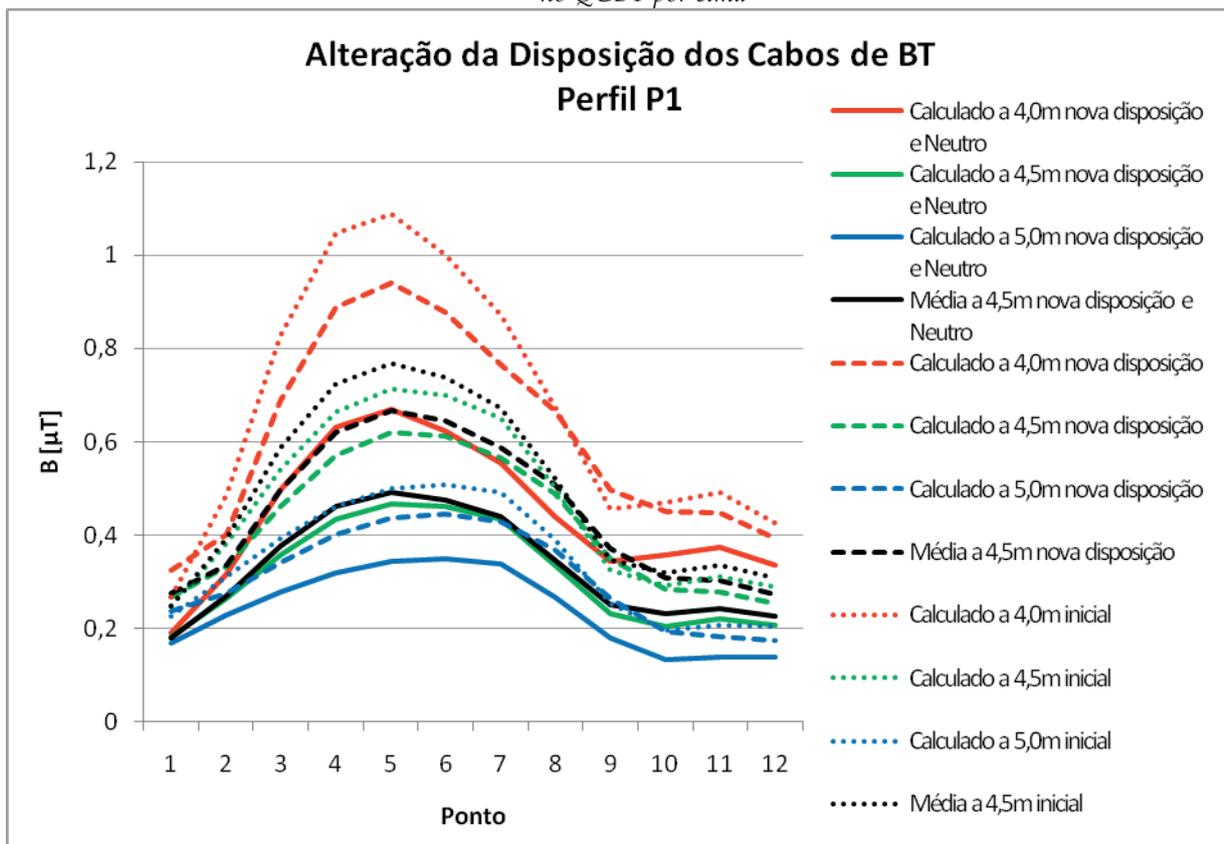


Figura 4.6 - Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P1 com os modelos anteriormente descritos

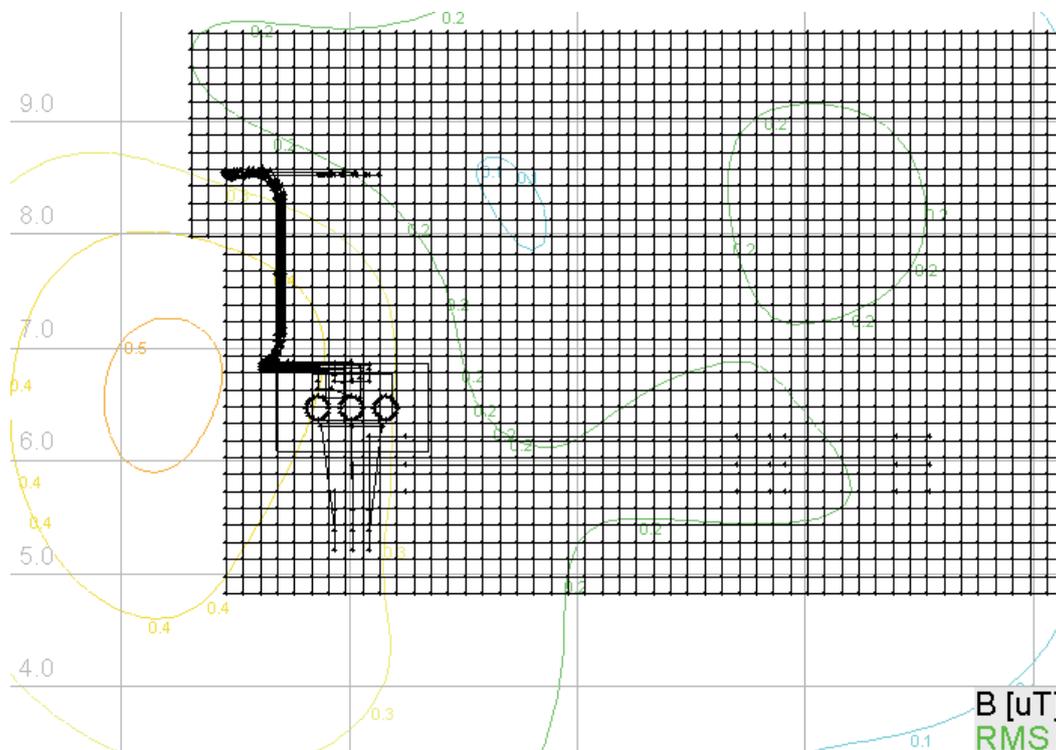


Figura 4.7 - Isolinhas de campo B em plano $z=4,5m$ utilizando o modelo que possui a disposição dos cabos de BT e a ligação do condutor de neutro modificadas.

Na Figura 4.6 são ilustrados todos os resultados obtidos com os dois modelos descritos e comparados com o modelo inicial e nas Figuras 4.7 e 4.8 é apresentada a distribuição espacial de campo.

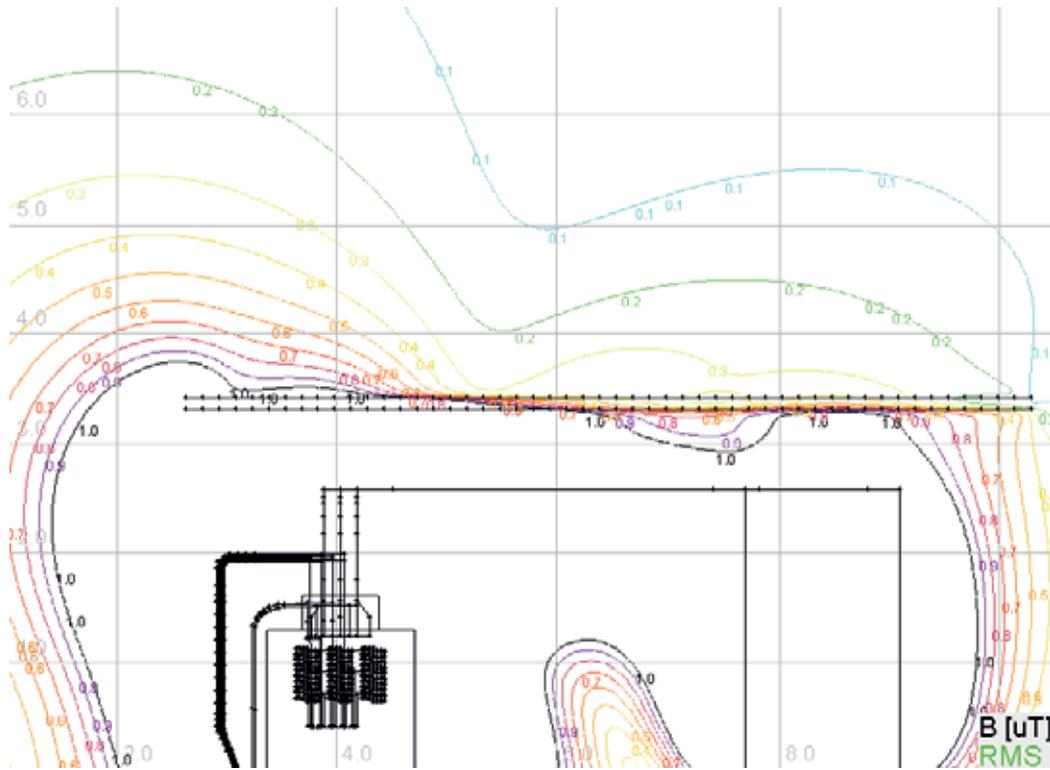


Figura 4.8 - Isolinhhas de campo B em plano $y=7,0m$ utilizando o modelo que possui a disposição dos cabos de BT e a ligação de neutro modificadas

Na situação inicial calculou-se um campo B de valor médio igual a $0,77 \mu T$. Contudo, este PT possui características distintas específicas, que afectam o campo B calculado nas habitações localizadas por cima, tais como o local da conexão do condutor de neutro e o facto do circuito de BT estar localizado na periferia do prédio.

Comparando o desempenho entre ambos os modelos simulados, constata-se que a redução de campo é diminuta, face ao modelo base, quando se modificou a disposição dos condutores (de acordo com o justificado em 4.3.1), mantendo o neutro a entrar por baixo do QGBT. Nestas condições, o valor de pico do campo médio sofreu uma ligeira redução, atingindo cerca de $0,62 \mu T$. Esta redução deve-se ao facto de se ter minimizado a contribuição do secundário do transformador na área de interesse considerada. Quando se procedeu à modificação do QGBT, fazendo o neutro entrar por cima, tal como os condutores de fase, constatou-se que o campo B calculado foi reduzido para $0,49 \mu T$.

A posição do PT, relativamente à armadura da laje, influencia o campo calculado, como mostra a Figura 4.8. É possível observar que junto à periferia da armadura a redução de campo é menor, porque as isolinhhas de elevada intensidade contornam

as malhas metálicas. Devido a este facto é preferível deslocar os componentes que emitem campos de maior intensidade para o centro da sala do PT, a fim de maximizar a mitigação pela armadura da laje.

4.1.2 SOLUÇÃO CONSTRUTIVA NO PT

Embora só existam habitações localizadas por cima do PT, é possível comentar o efeito que a disposição dos equipamentos teria no campo B calculado em zonas adjacentes ao mesmo.

Analisando a Figura 4.9 atesta-se que o valor máximo de campo B na situação inicial no PT é de $31,07 \mu T$, a $1,0 m$ de altura. Na Figura 4.10 é apresentada uma simulação onde foi utilizada outra disposição para os cabos de BT, onde o condutor de neutro entra por cima do QGBT. Nesta situação verifica-se que o campo B médio, em altura, é de $3,75 \mu T$ e atinge um máximo de $3,92 \mu T$, a $1,0 m$ de altura.

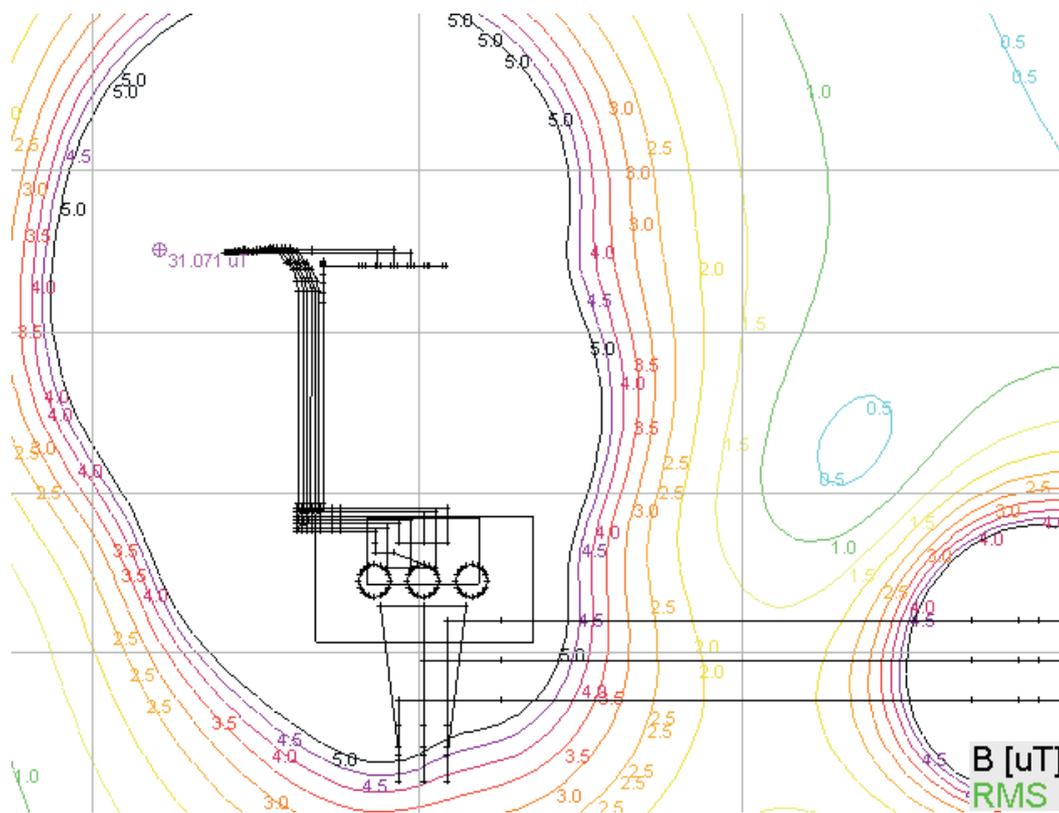


Figura 4.9 - Isolinhas de campo B em plano $z=1,0m$ utilizando o modelo inicial do PT

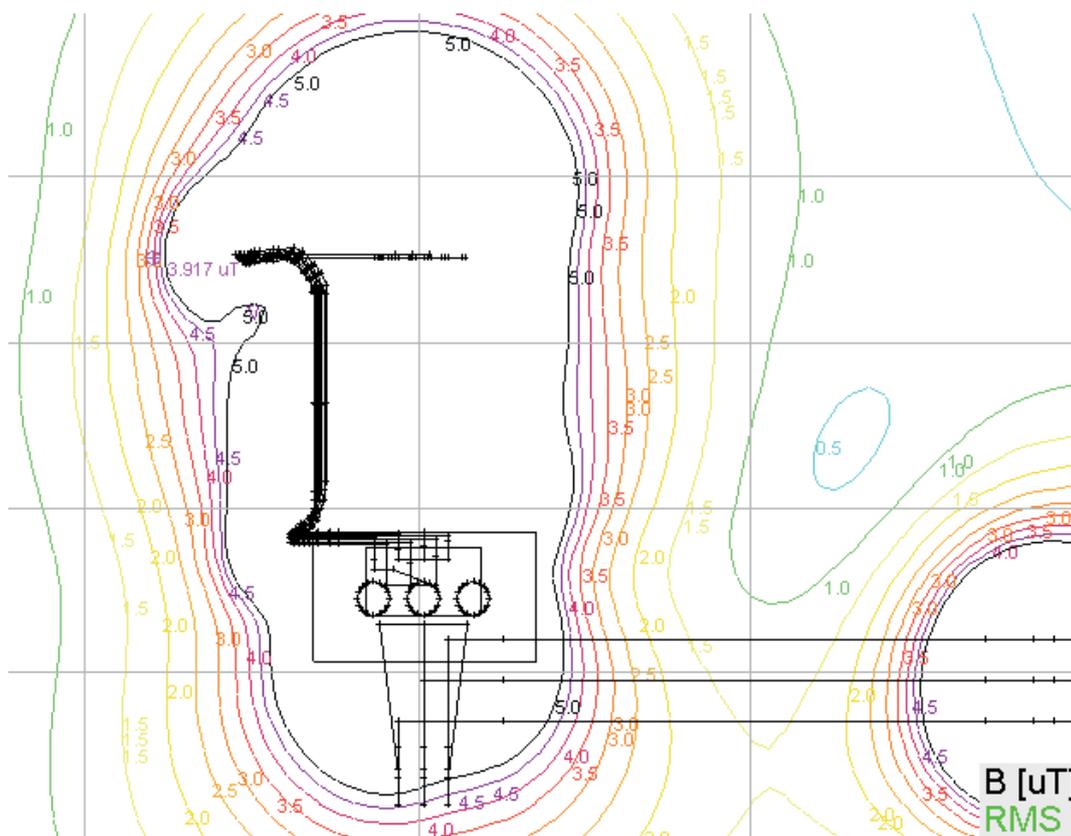


Figura 4.10 - Isolinhas de campo B em plano $z=1,0\text{m}$ utilizando o modelo que possui a disposição dos cabos de BT e a ligação do condutor de neutro modificadas (cabos BT modificados de acordo com 4.3.1)

4.1.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com as simulações efectuadas nas habitações localizadas por cima do PT, é possível tirar duas importantes conclusões deste tipo de instalações eléctricas.

A primeira conclusão é que os condutores devem fazer o mesmo percurso sempre que possível, para que a redução do campo B calculado seja máxima. Quando não for possível, como neste caso que possuía um QGBT com o neutro a entrar por baixo, verifica-se uma ligeira redução do valor de campo com a utilização da nova configuração só numa parte do circuito.

A segunda conclusão é o facto de ser preferível que o circuito de BT não esteja localizado na periferia do prédio, para que a redução de campo B proporcionada pela armadura da laje superior seja maximizada.

Efectuaram-se simulações extra onde foi verificado que a solução construtiva, utilizada na montagem do QGBT deste PT produz campos menos intensos nos locais adjacentes. Isto deve-se ao facto de ser utilizada uma parede independente para sustentar o QGBT, contrariamente a outros casos estudados, onde o equipamento está apoiado nas paredes que delimitam a sala que contém o PT.

4.2 ESTUDO DE UM OUTRO TIPO DE POSTO DE TRANSFORMAÇÃO INTERIOR

O estudo de mitigação apresentado seguidamente incide sobre um PT típico de zonas urbanas de Portugal, situado no rés-do-chão e numa esquina do prédio onde se encontra inserido, com relação de transformação de 10 kV para 400 V e uma potência nominal típica (400 kVA) para este tipo de localização.

Para modelar o PT, procedeu-se à colocação de todos os blocos (QGBT, transformador, seccionadores, celas de MT e cabos MT/BT) nos devidos locais. Esta colocação foi realizada com base nas fotografias do local (Figura 4.11) e na planta do PT cedida pela EDP. Na Figura 4.12 é mostrada a representação tridimensional do modelo computacional do PT em questão.



Figura 4.11- Fotografias do interior do PT, mostrando aspectos da sua arquitectura, situado no rés-do-chão do prédio

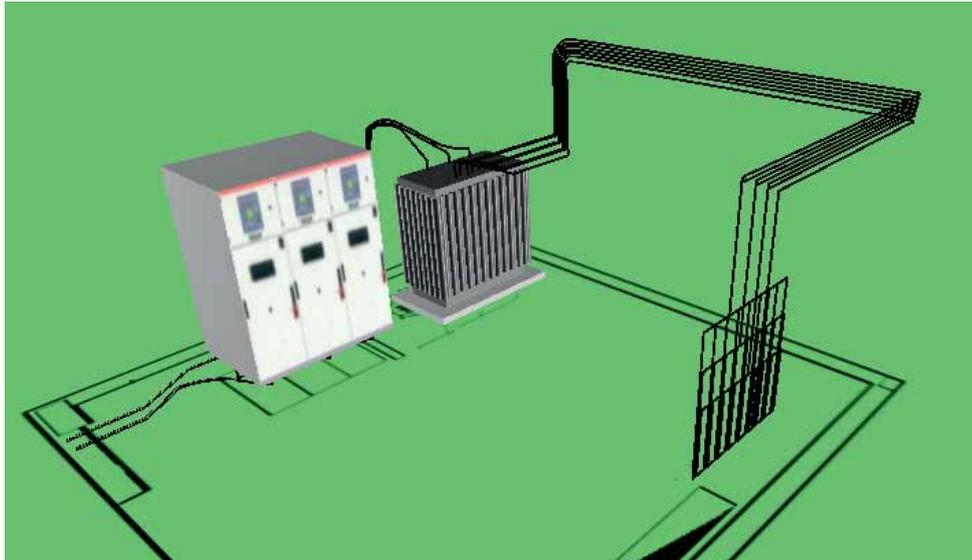


Figura 4.11 - Modelo computacional inicial do PT.

Segundo as medições realizadas pelo LABELEC, as correntes registadas na BT foram de 61A, 74A e 80A nas Fases e 35A no Neutro, o que corresponde a uma potência de cerca de 49,5 kVA, pouco menos de 1/8 da potência nominal deste transformador. Com estes valores para as correntes calibrou-se o modelo e efectuou-se uma extrapolação para os locais onde existe exposição humana ao campo B.

Contudo, e tendo por base a determinação da exposição crónica, o estudo de mitigação será desenvolvido para uma carga de 50% da potência nominal do transformador, ou seja, para uma potência de **200 kVA**, cerca de quatro vezes a verificada *in loco*. Devido a este facto, consideraram-se correntes de **$244,2A|0^\circ$** , **$296,3A| - 100^\circ$** e **$320,3A|99,75^\circ$** nas fases da BT, e uma corrente no neutro de cerca de **$140,5A|9,78^\circ$** .

As conclusões retiradas do relatório de modelação, na condição de uma carga de 50% da potência nominal do transformador, foram:

- No interior dos apartamentos adjacentes ao PT (confinantes com a parede situada no lado oposto ao da porta do PT e com a parede lateral onde se encontra o QGBT), o campo B chega a um valor máximo de **$59,94 \mu T$** , na zona dos barraamentos do QGBT a **1,5 m** de altura, atingindo o valor médio, a **1,0m** de altura, de cerca de **$30,63 \mu T$** ;
- O transformador e os cabos de BT que saem do secundário também são uma importante fonte de campo B, já que se calculou na proximidade destes elementos um campo B máximo de **$27,3 \mu T$** , a **1,5 m** de altura, e médio, em altura, de **$13,98 \mu T$** ;
- Nos apartamentos localizados por cima do PT, o campo de indução magnética calculado a **4,0 m** de altura (que pretende representar **0,5 m** de altura no

apartamento), atinge cerca de $1,76 \mu T$;

- Constatou-se ainda que a consideração da armadura da laje afecta o valor do campo B calculado nas habitações localizadas por cima do PT, reduzindo o campo, em média, por um factor de dois.

Verifica-se que o valor de campo B no apartamento adjacente ao QGBT é potencialmente problemático quando o transformador estiver a funcionar a cerca de 85% da sua potência nominal (a potência média poderá ser inferior), mesmo que seja durante pequenos momentos, dado que o limite de $100 \mu T$ estabelecido pelo ICNIRP, para a exposição aguda do público em geral, e adoptado por Portugal poderá ser ultrapassado.

Para comparar os valores de campo B iniciais com os obtidos após serem efectuadas as alterações, definiram-se perfis de cálculo nas áreas de interesse. Nos apartamentos adjacentes ao PT foram definidos dois perfis, P2 e P3 a 20 cm da parede interior da habitação. De igual modo, na parede que confina com a rua foi definido o perfil P1²¹. O cálculo do valor de campo foi efectuado a 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m de altura do solo (Figura 4.13). Nas habitações localizadas imediatamente por cima do PT optou-se por definir um perfil, P4, a passar pelas zonas onde o campo B é superior (Figura 4.14). As simulações foram efectuadas a alturas de 4,0 m, 4,5 m e 5,0 m, que pretendem representar, respectivamente, 0,5 m, 1,0 m e 1,5 m no apartamento imediatamente superior ao PT. A área da sala que contém o PT é de $4,75 \times 4,65 m^2$ e o pé-direito é de 3,20m.

As modificações mitigatórias estudadas neste caso foram as seguintes:

1. Alteração da disposição/geometria dos cabos de BT;
2. Modificação do percurso dos condutores de BT;
3. Afastamento do QGBT e Transformador das paredes que delimitam o PT;
4. Aplicação da configuração *Back to Back*;
5. Variação da distância entre as barras do QGBT, utilizando a configuração *Back to Back* (actuando nas dimensões do interruptor tetrapolar);
6. Configuração *Back to Back* com utilização de elementos metálicos.

²¹O perfil P1 está definido numa zona exterior ao edifício, mas optou-se por traça-lo já que se podem tirar conclusões do valor de campo B em PTs que possuam uma arrumação diferente.

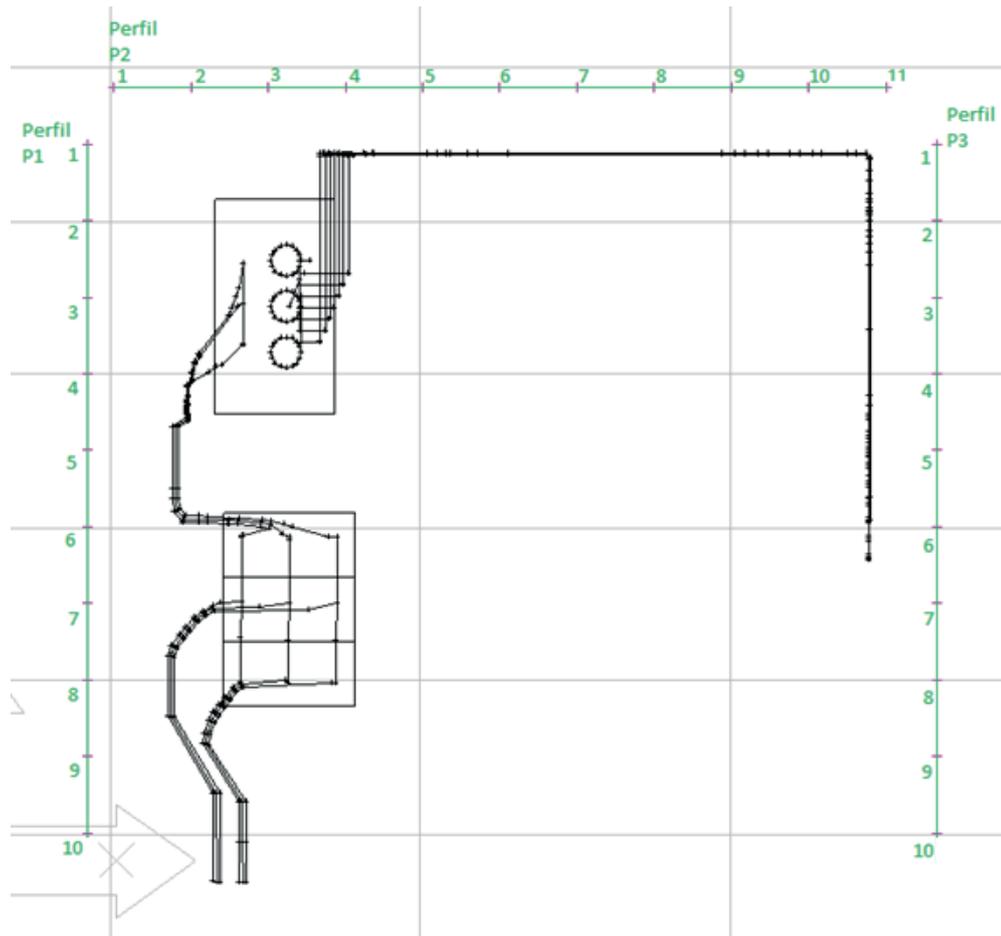


Figura 4.12 - Perfis definidos nas habitações adjacentes ao Posto de Transformação

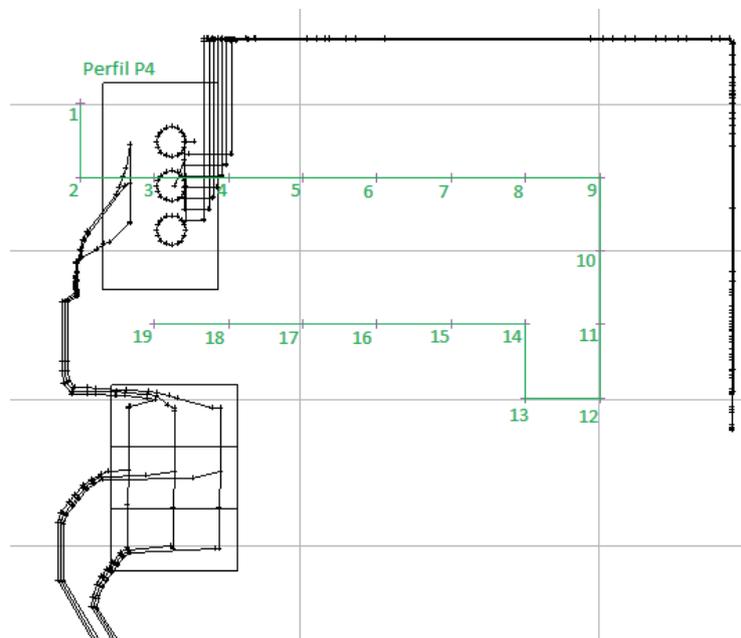


Figura 4.13 - Perfil definido na habitação localizada imediatamente por cima do Posto de Transformação

4.2.1 ALTERAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO

Na execução desta medida de mitigação modificou-se a geometria dos cabos de BT, utilizando um arranjo otimizado e que será discutido adiante (secção 4.3.1). Na Figura 4.15 é mostrado, em pormenor, a disposição dos cabos de BT e na Figura 4.16 é apresentado o modelo utilizado na simulação. É possível verificar que, nas ligações do secundário do transformador, a disposição dos cabos não foi alterada, ficando a dever-se à forma como são efectuadas as conexões.

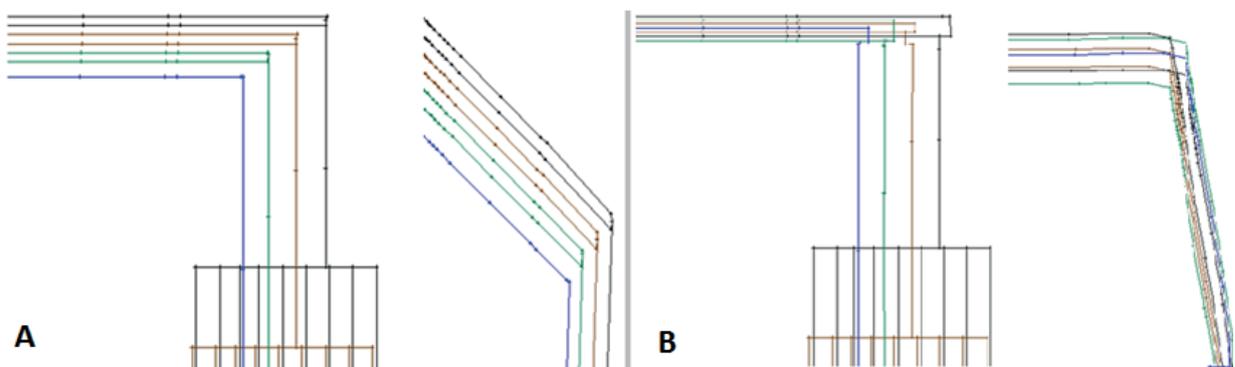


Figura 4.14 - Disposição dos cabos de Baixa tensão: A) modelo inicial B) modelo alterado

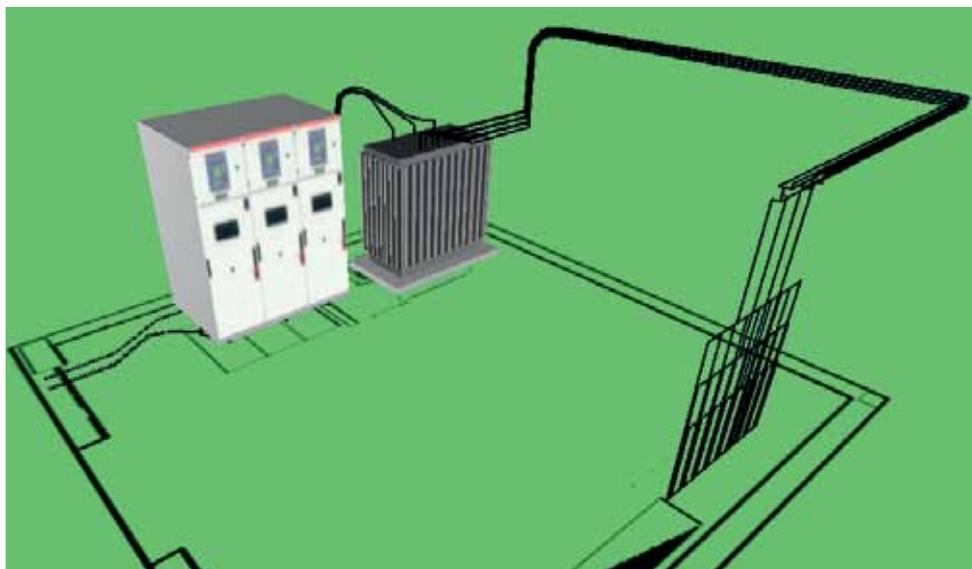


Figura 4.15 - Modelo do PT com a configuração dos cabos de baixa tensão modificada

Alguns resultados obtidos nos quatro perfis de cálculo encontram-se representados graficamente nas Figuras 4.17 a 4.19.

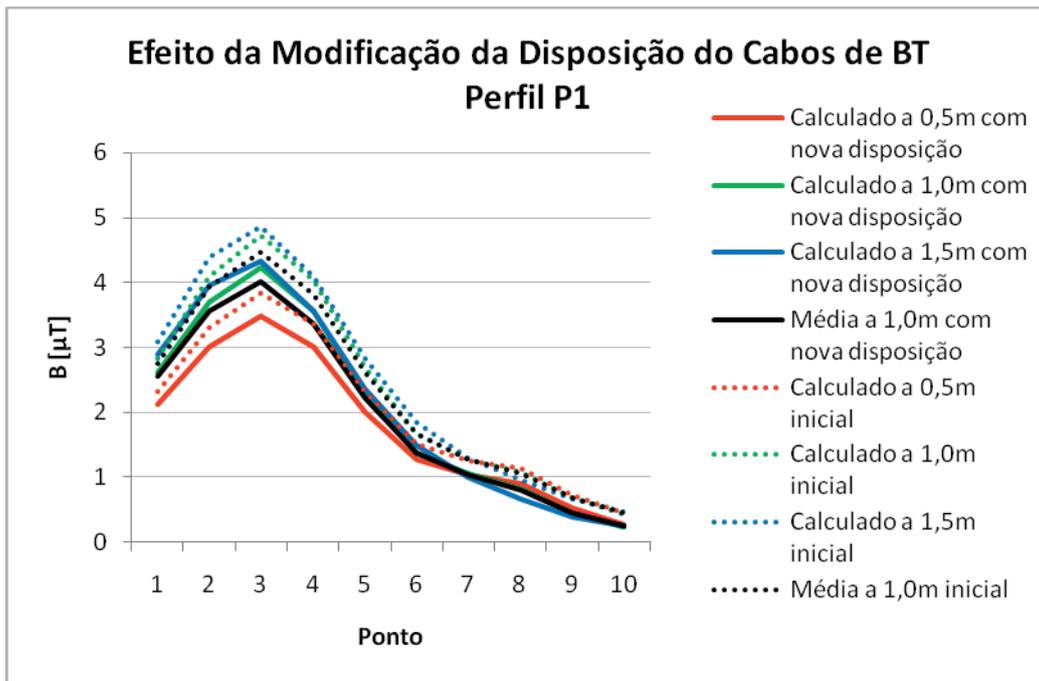


Figura 4.16 - Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P1, com disposição inicial e modificada dos cabos de BT

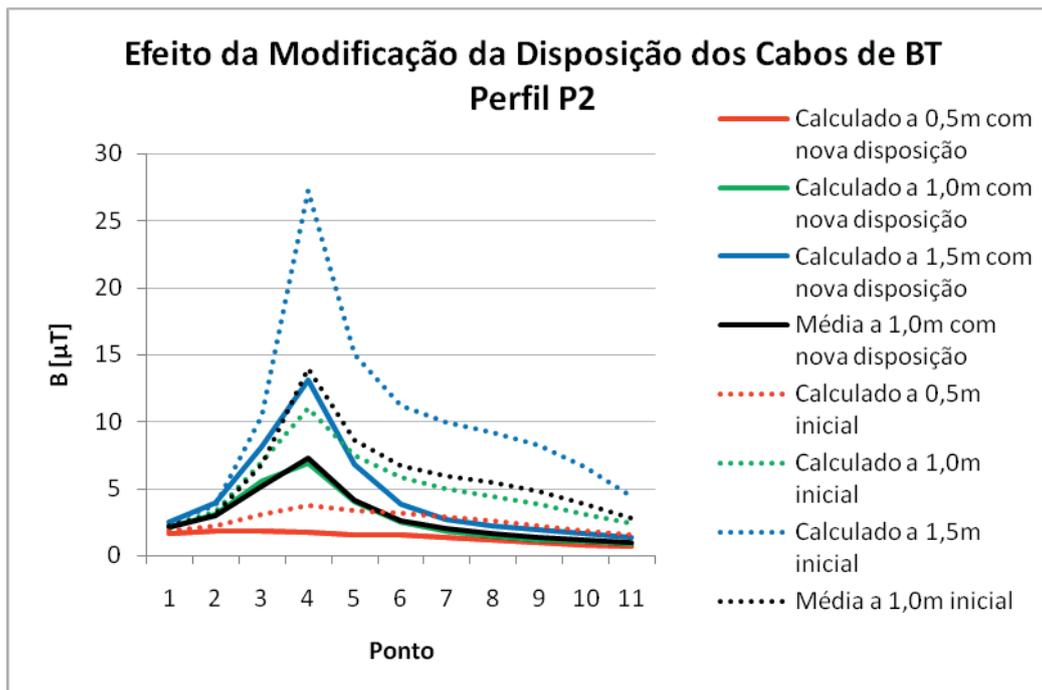


Figura 4.17 - Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P2, com disposição inicial e modificada dos cabos de BT

Os resultados obtidos nas simulações efectuadas, nas duas áreas de maior interesse, encontram-se ilustrados nas Figuras 4.20 e 4.21. Note-se a inclusão da armadura metálica na simulação efectuada no apartamento localizado por cima do PT.

Verifica-se que, após a modificação da disposição dos cabos de baixa tensão, o campo B calculado sofreu alterações consideráveis nos perfis P2 e P4 (um piso adja-

centee no piso superior). Nos restantes perfis, P1 e P3 (adjacentes), observa-se que os valores atingidos são similares aos calculados na configuração inicial, ficando a dever-se ao facto das maiores contribuições para o campo total serem provenientes do transformador e do QGBT.

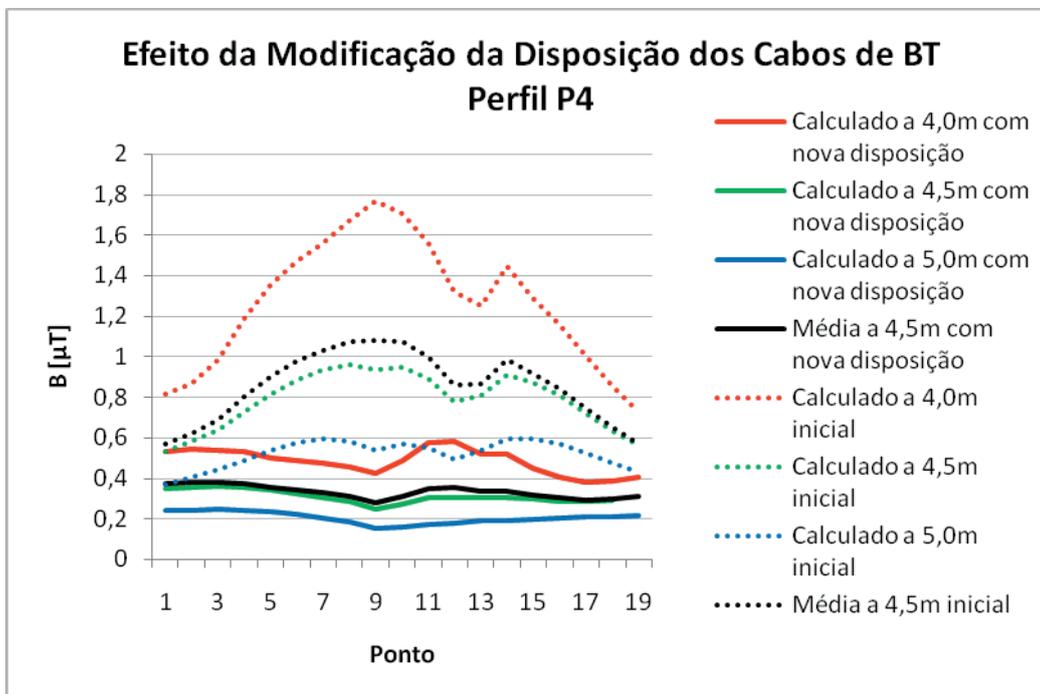


Figura 4.8 - Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P4, com disposição inicial e modificada dos cabos de BT

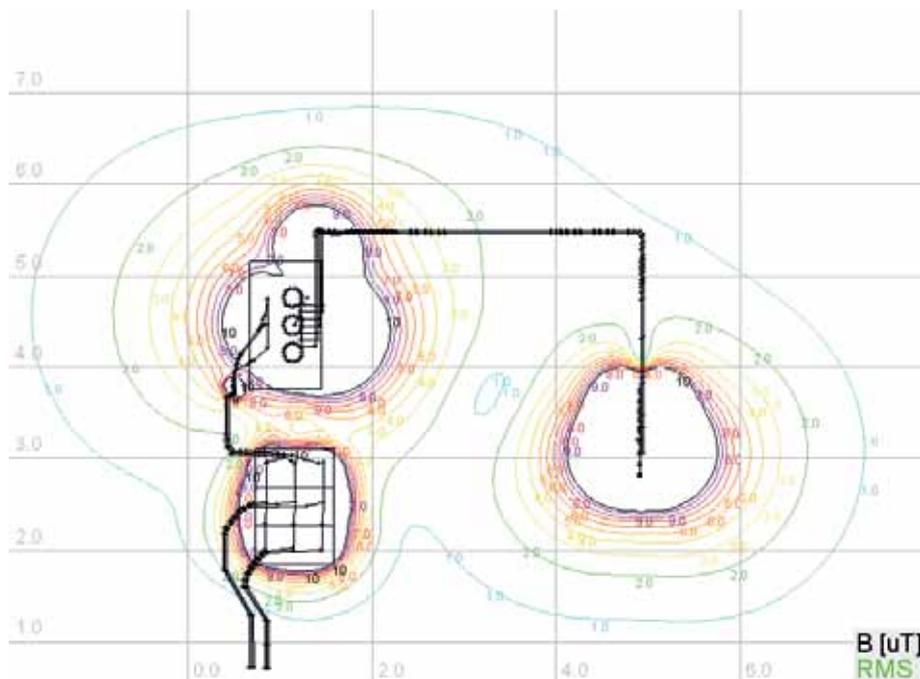


Figura 4.20- Linhas de campo B em plano z=1,0m com disposição dos cabos de BT modificada

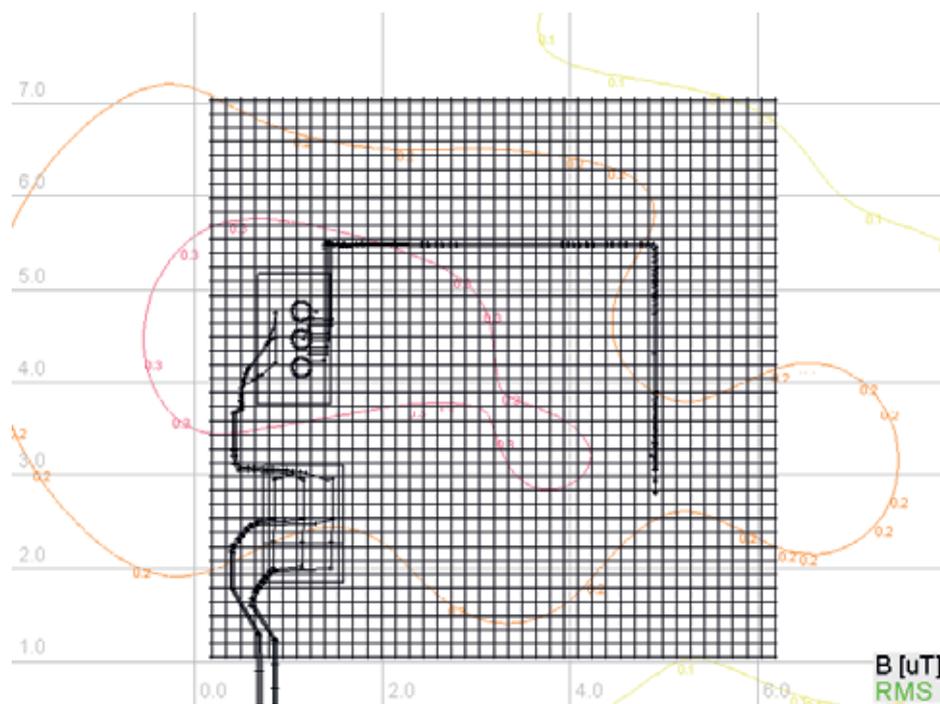


Figura 4.21- Linhas de campo B em plano $z=4,5m$ com disposição dos cabos de BT modificada

No perfil P2 o campo sofreu uma redução considerável, atingindo agora o valor médio, em altura, de $7,2 \mu T$, ao invés de $14,0 \mu T$. É de realçar que o campo calculado neste perfil, após a modificação, alcança apenas **44%**, em média, do campo inicial a $1,5m$ de altura. Este resultado era expectável visto que este perfil é adjacente aos cabos de BT e o campo emitido por estes sofreu uma grande diminuição com a medida de mitigação aplicada, como pode ser constatado na Figura 4.22. Nos pontos médios do perfil P2 verifica-se que o campo B calculado atingiu, em média, apenas 25% do valor a $1,5m$ de altura. Isto acontece porque estes pontos estão afastados das contribuições, para o campo B total, do transformador e do QGBT, fazendo com que a redução do campo emitido dos cabos de BT seja mais notória.

Nas habitações localizadas por cima do PT, constatou-se que o campo na situação inicial alcançava o valor médio, em altura, de $1,08 \mu T$, na proximidade dos terminais do QGBT, e agora atinge apenas $0,38 \mu T$, na zona localizada por cima dos terminais de BT do transformador. A $0,5 m$ de altura no interior das habitações verifica-se que o campo é cerca de **38,6%**, em média, do valor inicial.

Conclui-se que esta medida é uma forma eficaz de reduzir o campo B, produzido pelos cabos de baixa tensão que fazem o percurso a uma altura elevada (neste caso a $2,3 m$), sobretudo nas habitações localizadas por cima desta instalação.

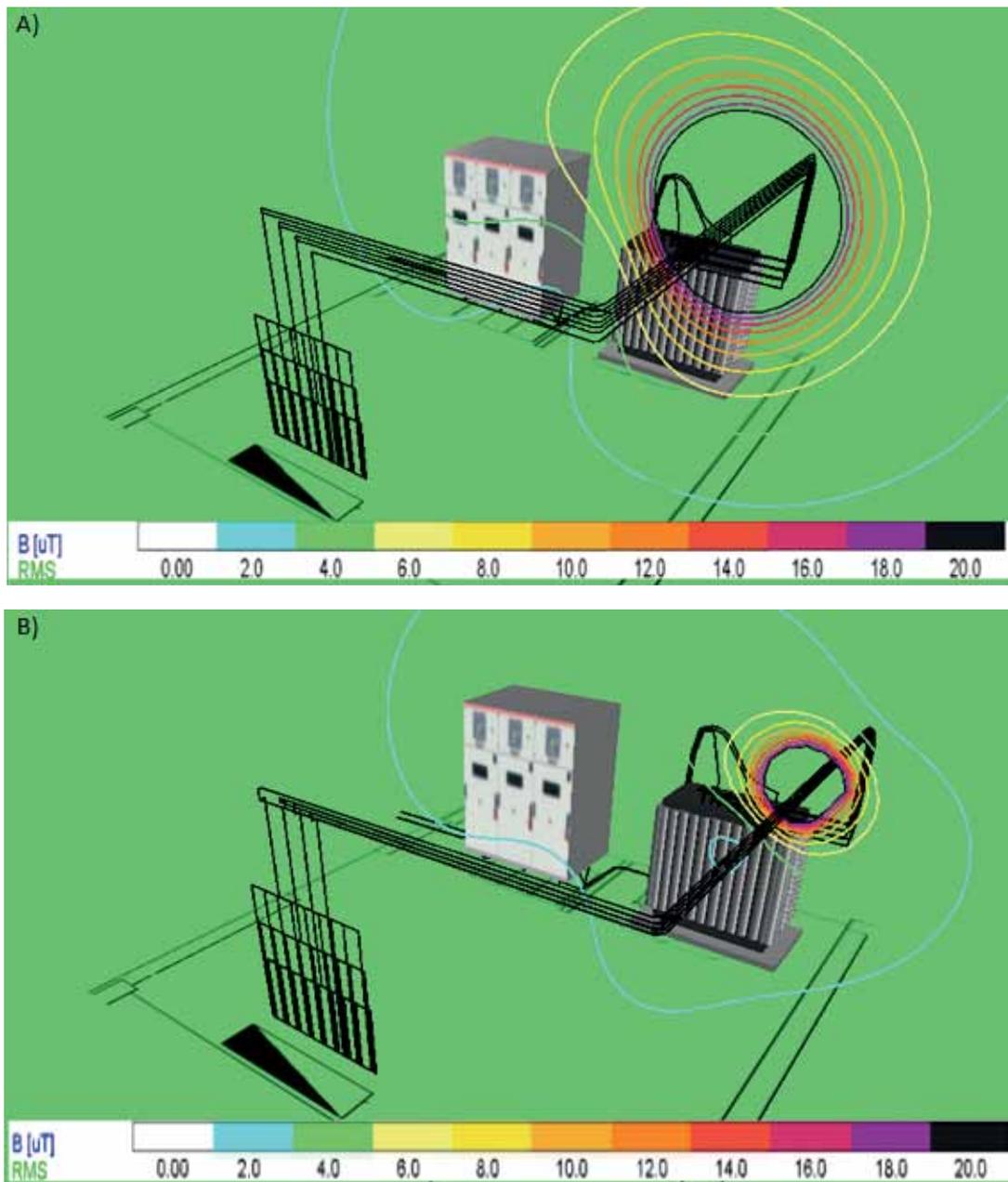


Figura 4.22 - Linhas de campo B em plano $x=2,5m$ em vista tridimensional sem armadura metálica: A) disposição em esteira B) disposição modificada

4.2.2 MODIFICAÇÃO DO PERCURSO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO

Esta medida de mitigação consiste na alteração do caminho dos cabos de baixa tensão e será aplicada no modelo onde se modificou a disposição dos cabos de BT. Com isto pretende-se determinar se a altura a que é feito o referido percurso é determinante para o campo total, nas áreas de interesse, quando se utiliza a disposição alternativa para os condutores.

Na Figura 4.23 está representado o modelo simulado e na Figura 4.24 são apresen-

tados os resultados obtidos para o perfil P2 (fogo adjacente).

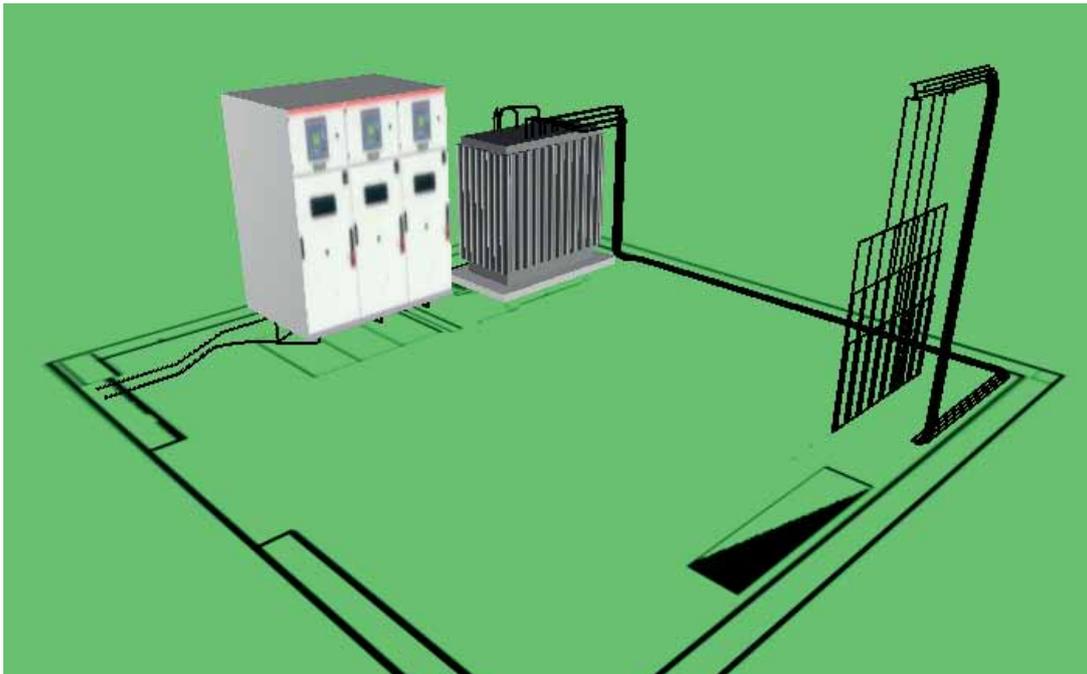


Figura 4.23 - Modelo do PT com o percurso dos cabos de BT modificado

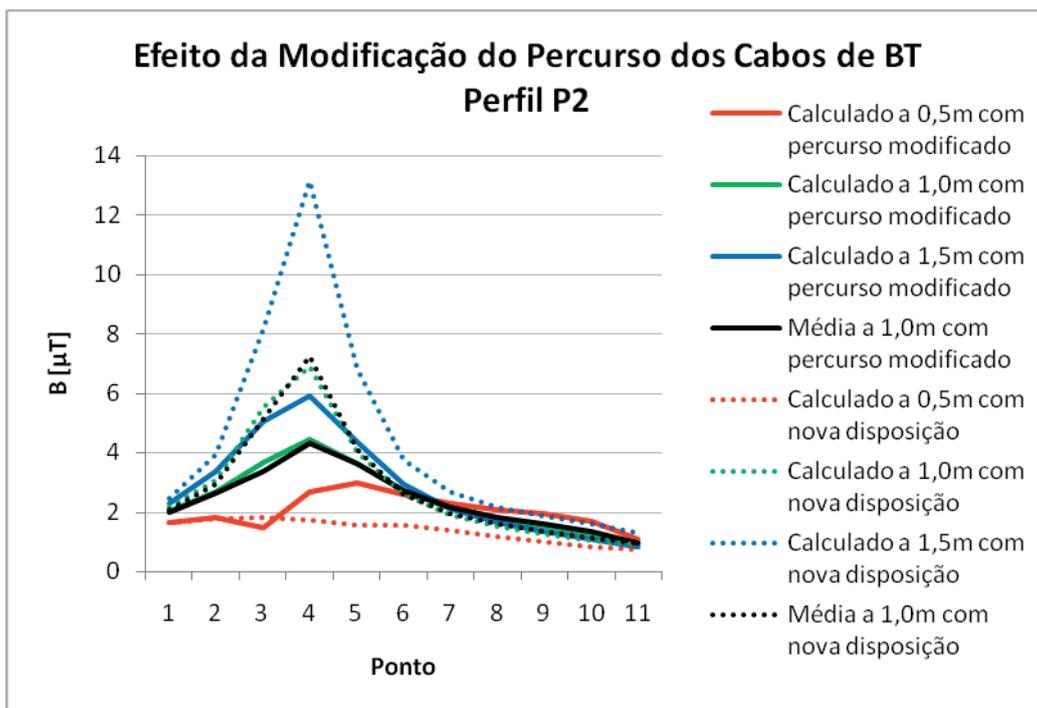


Figura 4.24- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P4, com disposição inicial e modificada dos cabos de BT

Nas Figuras 4.25 e 4.26 são apresentados os resultados das simulações efectuadas, a $1,0\text{ m}$ de altura no interior nas habitações adjacentes e localizadas por cima do PT, com a modificação do percurso dos condutores de BT.

Com excepção do perfil P2, constata-se que não houve grandes variações nos valores de campo calculado.

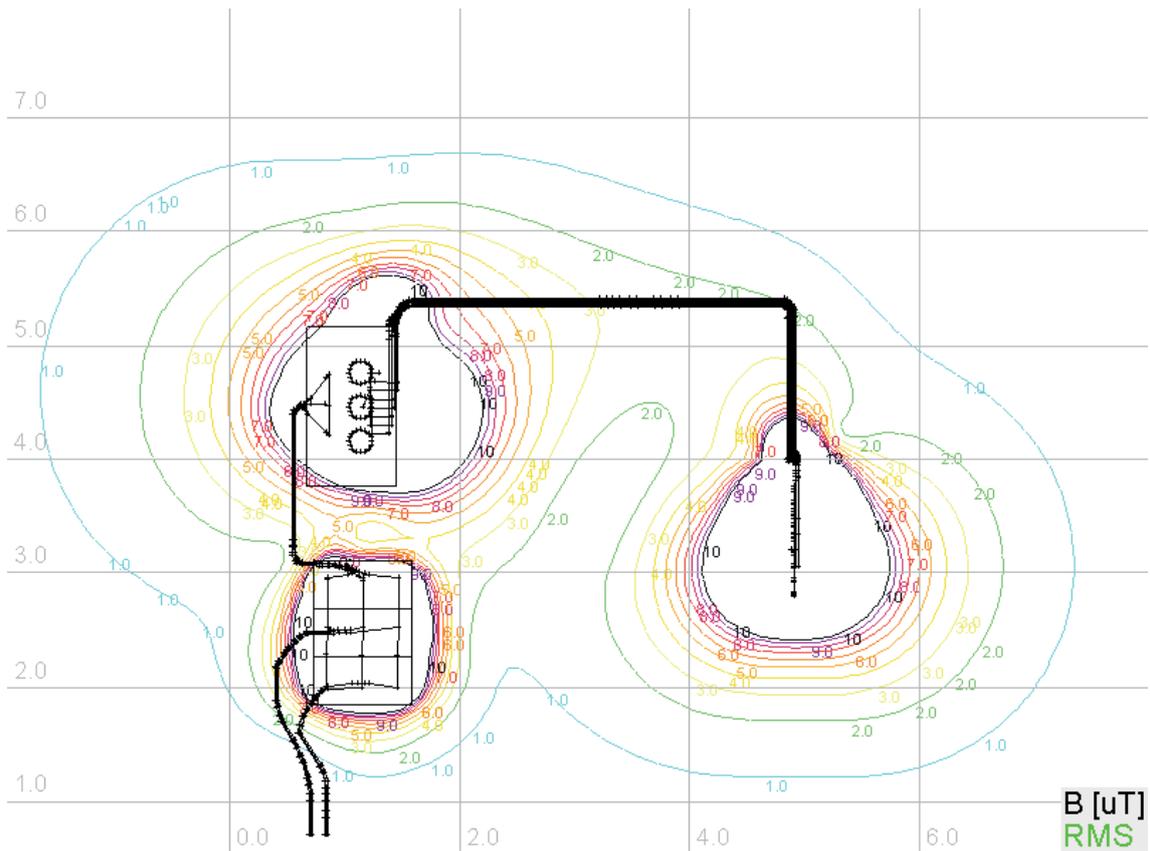


Figura 4.25 - Isolinhas de campo B em plano $z=1,0m$ com a alteração do percurso dos cabos de BT

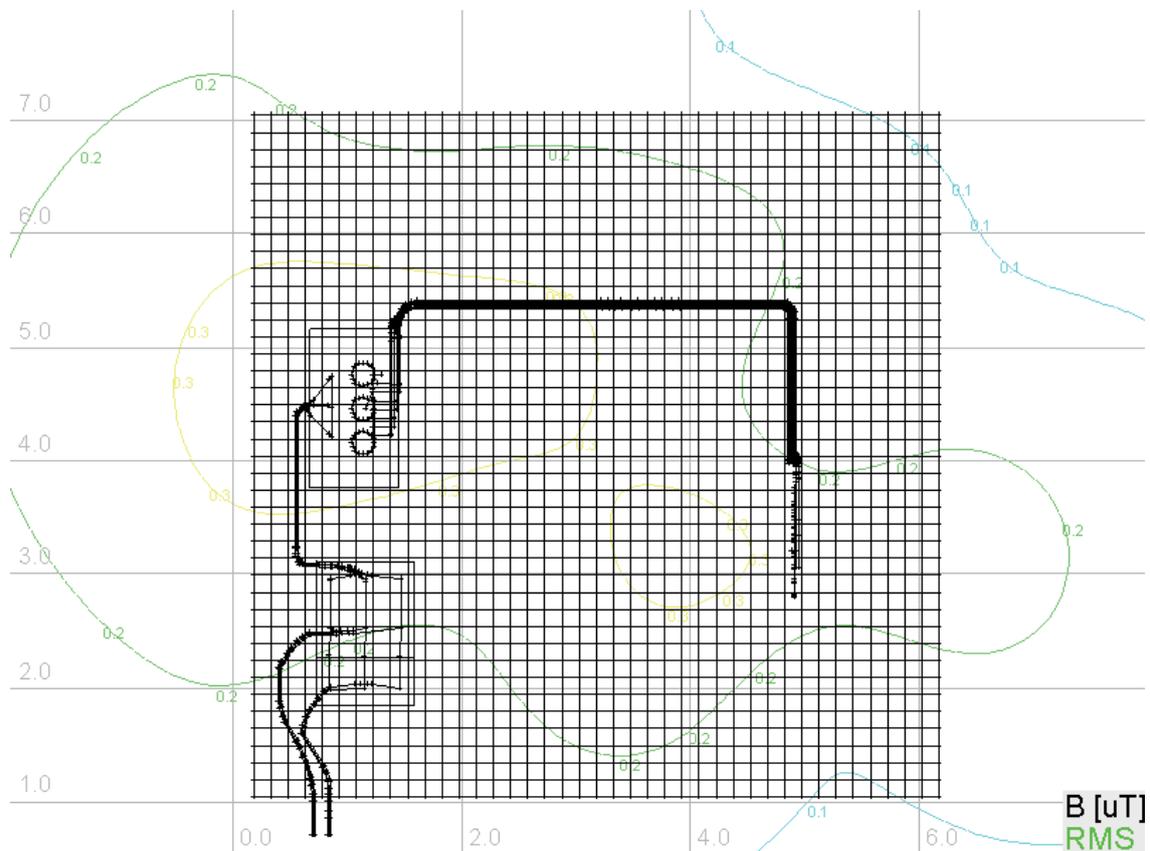


Figura 4.26- Isolinhas de campo B em plano $z=4,5m$ com a alteração do percurso dos cabos de BT

Nos perfis P1, P3 e P4 foi calculado que o campo atinge entre 97% e 106%, em média, do seu valor inicial nas três alturas de cálculo. Portanto, com tais variações de campo conclui-se que esta alteração não surte qualquer efeito nos referidos perfis.

No perfil P2, porém, houve um decréscimo considerável dos valores máximos obtidos, o que levou a que o valor médio, em altura, mais elevado seja de 4,34 μT , contra os 7,24 μT alcançados antes da aplicação da medida. Em ambos os casos o local onde foi calculado o valor de maior intensidade está localizado na proximidade do transformador (ver Figura 4.25). Como seria de esperar, com a colocação dos cabos ao nível do solo, o campo a 0,5 m aumentou, em média, para 147% do valor antes da aplicação da medida, tendo-se obtido 87% para 1,0 m e 65% para 1,5 m de altura.

Com os resultados obtidos neste ponto atesta-se que o percurso dos cabos de BT é irrelevante para o campo total, nas áreas de interesse, quando se considera uma disposição de baixo campo emitido, visto que as principais fontes são o QGBT e o transformador. No perfil P2, adjacente aos cabos de BT modificados, houve reduções assinaláveis de campo.

4.2.3 AFASTAMENTO DO QGBT E TRANSFORMADOR DAS PAREDES QUE DELIMITAM O PT

Sabendo que o campo B decai consideravelmente com o aumento da distância à fonte, de seguida afasta-se o QGBT da parede que lhe é adjacente para determinar se esta medida é vantajosa. Na figura 4.27 é mostrado um dos modelos simulados com o QGBT a 2,0 m da parede adjacente.

Foram efectuadas várias simulações considerando um aumento gradual do afastamento entre o QGBT e a parede que delimita o PT, onde se registou o valor máximo de campo B (ponto 5 do perfil P3 a 1,5 m de altura). Os resultados obtidos são apresentados graficamente na Figura 4.28, onde foi efectuada uma interpolação linear entre os pontos. Na figura 4.29 é apresentado o resultado de uma das simulações efectuadas, considerando o QGBT a 2,0 m da parede.

Mantendo a distância de 2,0 m entre o QGBT e a sua parede adjacente efectuou-se um conjunto de simulações afastando o transformador na diagonal, dado que está num canto da sala. Na Figura 4.30 está ilustrado o modelo em que o transformador está distanciado de 1,0 m das paredes que lhe estão mais próximas (aproximadamente 1,4 m na diagonal). O valor máximo de campo B obtido (ponto 4 do perfil P2) em função da distância do transformador está representado graficamente na Figura 4.31.

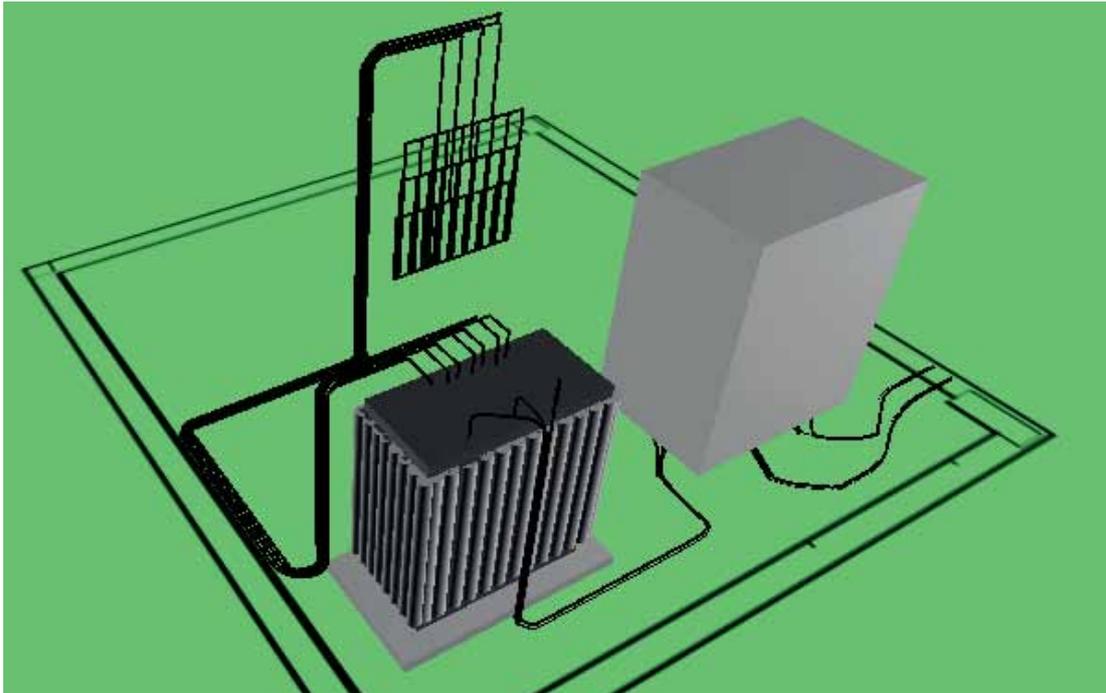


Figura 4.27 - Modelo do PT com os cabos ao nível do solo com nova disposição e QGBT afastado 2,0m

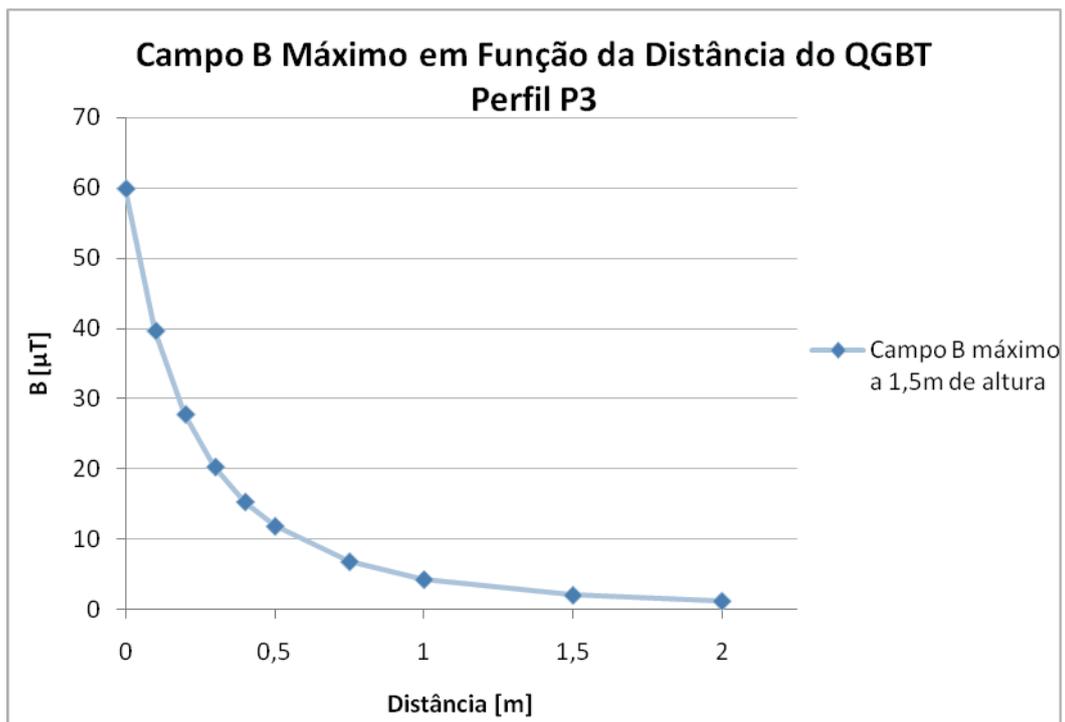


Figura 4.28 - Campo B máximo no perfil P3 a 1,5m de altura em função da distância do QGBT à parede adjacente

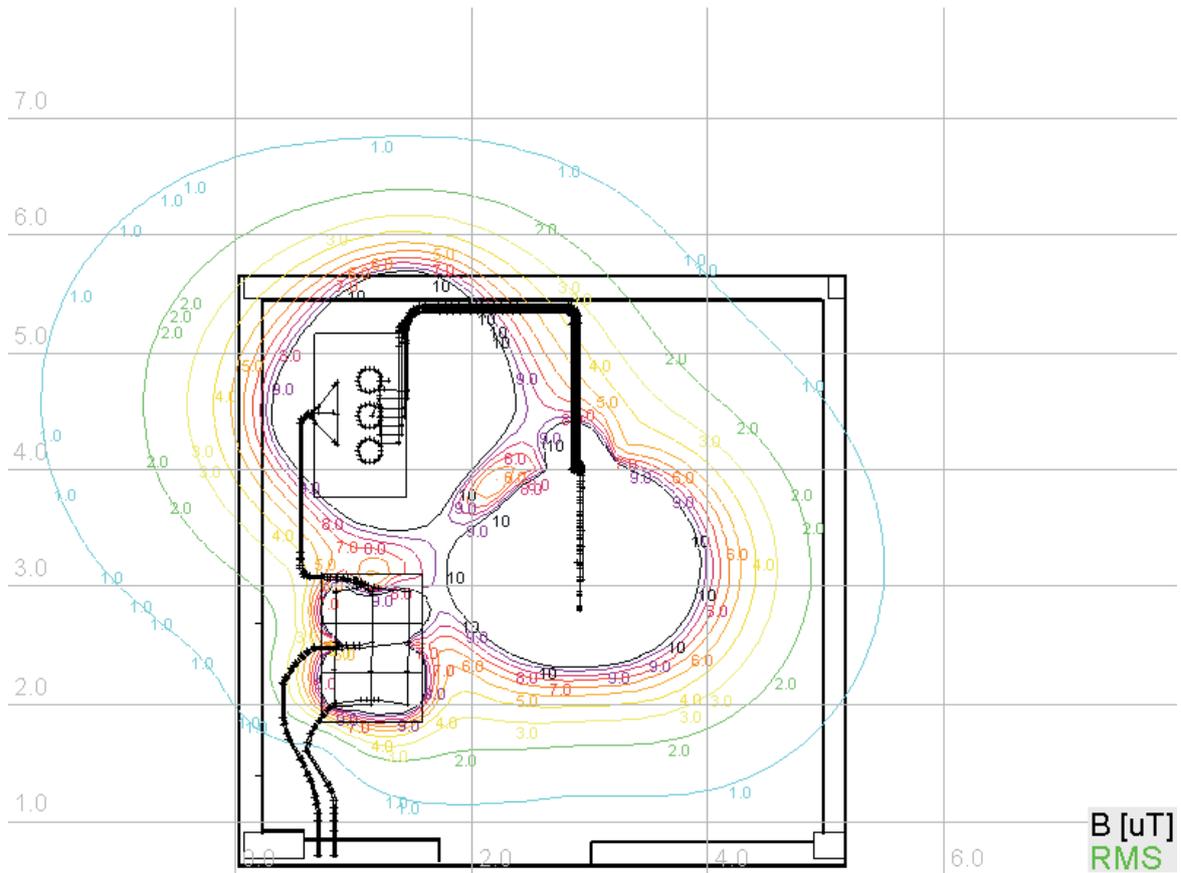


Figura 4.29- Linhas de Campo B em plano $z=1,5m$ com nova disposição dos cabos ao nível do solo e com QGBT afastado 2,0m da parede

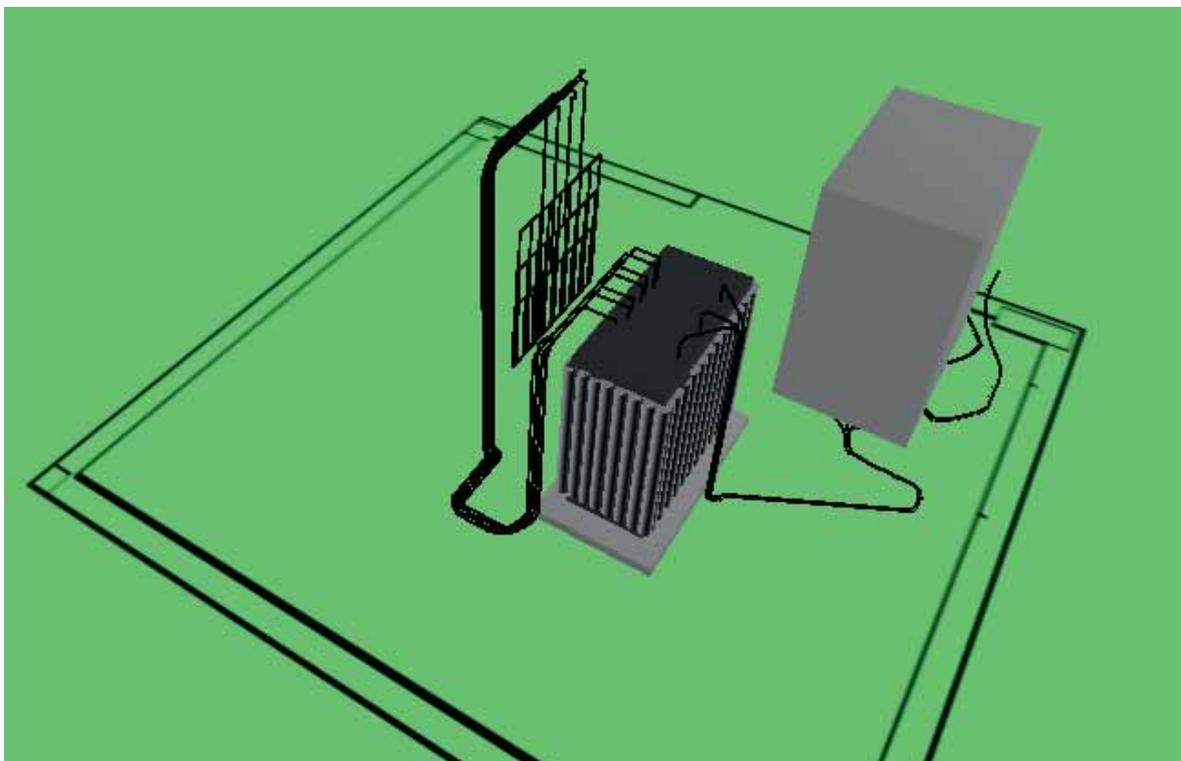


Figura 4.30 - Modelo do PT com os cabos ao nível do solo com nova disposição e QGBT afastado 2,0m da parede que lhe é adjacente e o transformador afastado 1,0m das paredes mais próximas (1,4m na diagonal)

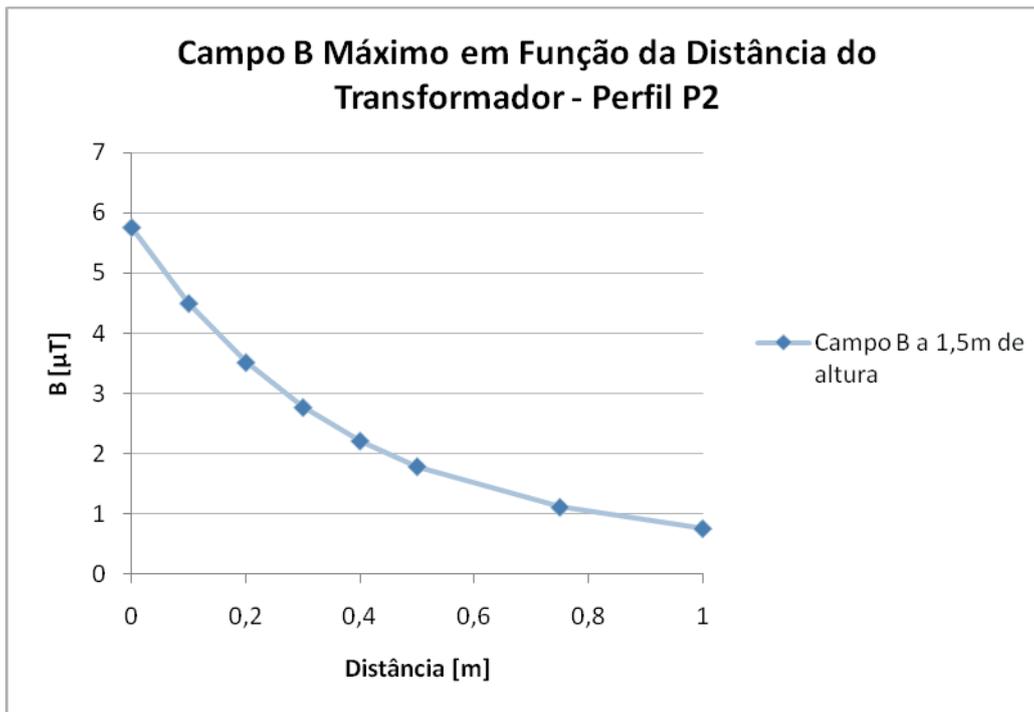


Figura 4.9 - Campo B máximo no perfil P2 a 1,5m de altura em função da distância do transformador à parede adjacente

Com as simulações previamente efectuadas conclui-se que o deslocamento do transformador e do QGBT para o centro da sala leva a uma considerável redução do campo B nas habitações adjacentes.

Na situação inicial, o campo máximo no perfil adjacente ao QGBT (denominado P3) atingia cerca de $59,87 \mu T$ e reduziu-se para apenas $1,15 \mu T$ quando se afastou o QGBT $2,0 m$ da parede. Ambos os valores de pico se situam no mesmo ponto do perfil, mas verificou-se que os restantes pontos sofreram reduções mais modestas.

Com o afastamento do transformador em relação às paredes verificou-se que também existiram reduções significativas no valor do campo B calculado. No entanto, só se afastou o transformador $1,0 m$ de ambas as paredes adjacentes, ficando tal a dever-se às dimensões limitadas da sala onde se encontra o PT. Inicialmente, o campo máximo no perfil P2 era de $5,76 \mu T$ e passou para $0,76 \mu T$, tendo ocorrido uma menor redução no perfil P1, onde inicialmente se tinha calculado $4,25 \mu T$ e, após a modificação, obteve-se $1,45 \mu T$. Esta menor redução fica a dever-se ao facto de não se terem movido as celas de média tensão.

Equiparando os resultados obtidos em ambas as situações descritas, atesta-se que a redução do campo B foi muito superior quando se afastou o QGBT, comparativamente ao deslocamento do transformador. Este resultado acontece devido à posição inicial do transformador, visto este estar afastado da parede, contrariamente ao QGBT.

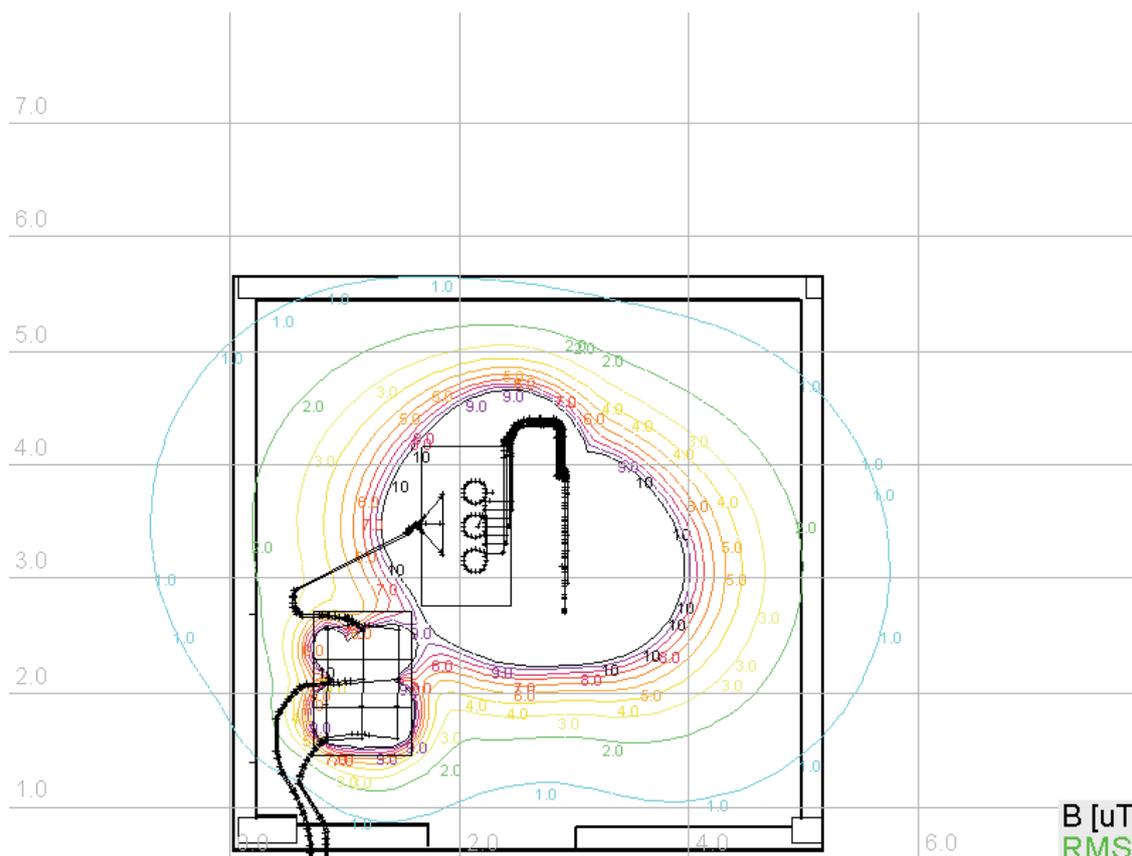


Figura 4.32 - Linhas de campo B em plano $z=1,5m$ com nova disposição dos cabos de BT, QGBT afastado de 2,0m da parede que lhe é adjacente e o transformador afastado 1,0m das paredes mais próximas (1,4m na diagonal)

Conclui-se que o deslocamento dos equipamentos para o centro da sala é uma eficaz medida de mitigação de campo, relativamente económica e de fácil implementação.

4.2.4 CONFIGURAÇÃO BACK TO BACK

Das simulações anteriormente efectuadas conclui-se que a solução ideal converge para a agregação, no centro da sala, do transformador e QGBT (Figura 4.33). No modelo simulado a distância considerada entre os dois elementos foi de 20 cm.

Na Figura 4.34 atesta-se que não foi utilizado o arrumo dos cabos previamente estudado, devido à difícil implementação prática da geometria, dado que a distância (vertical) entre as saídas de BT do transformador e as entradas do QGBT é de, aproximadamente, 50 cm. Modificou-se também a altura, relativamente ao solo, do bloco do QGBT, reduzindo-a de 60 cm para 25 cm.

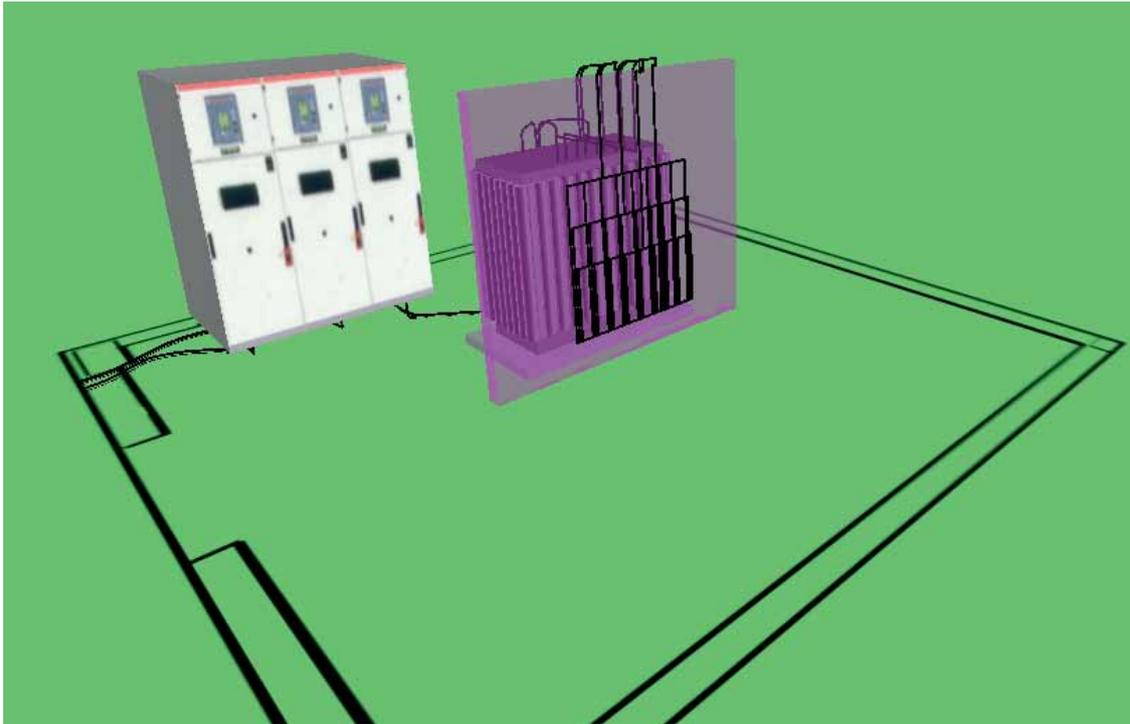


Figura 4.33 - Modelo do PT com a configuração Back to Back

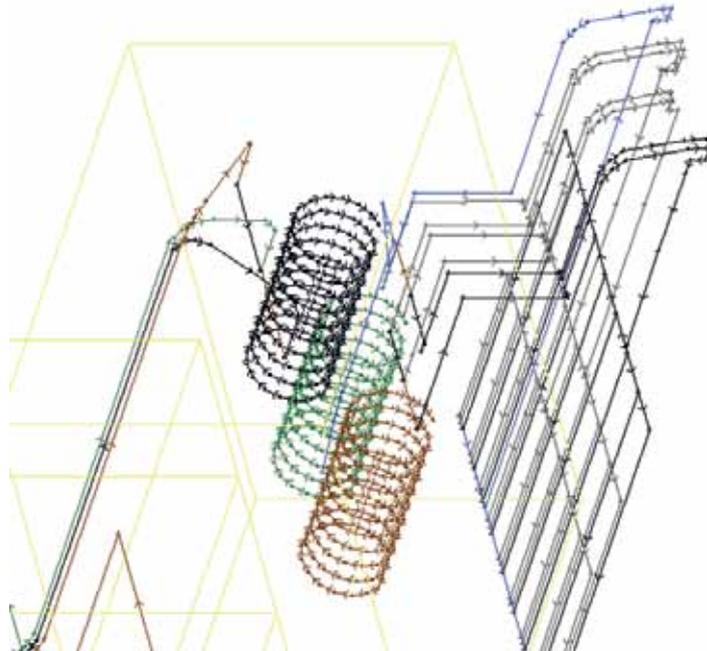


Figura 4.34 - Pormenor do percurso dos cabos de BT no modelo Back to Back

De seguida, são apresentadas comparações entre os valores obtidos de campo B, calculado ao longo dos quatro perfis, utilizando a configuração *Back to Back* e o resultado final do modelo onde se deslocaram o QGBT e o transformador para o centro da sala, descrito no ponto anterior.

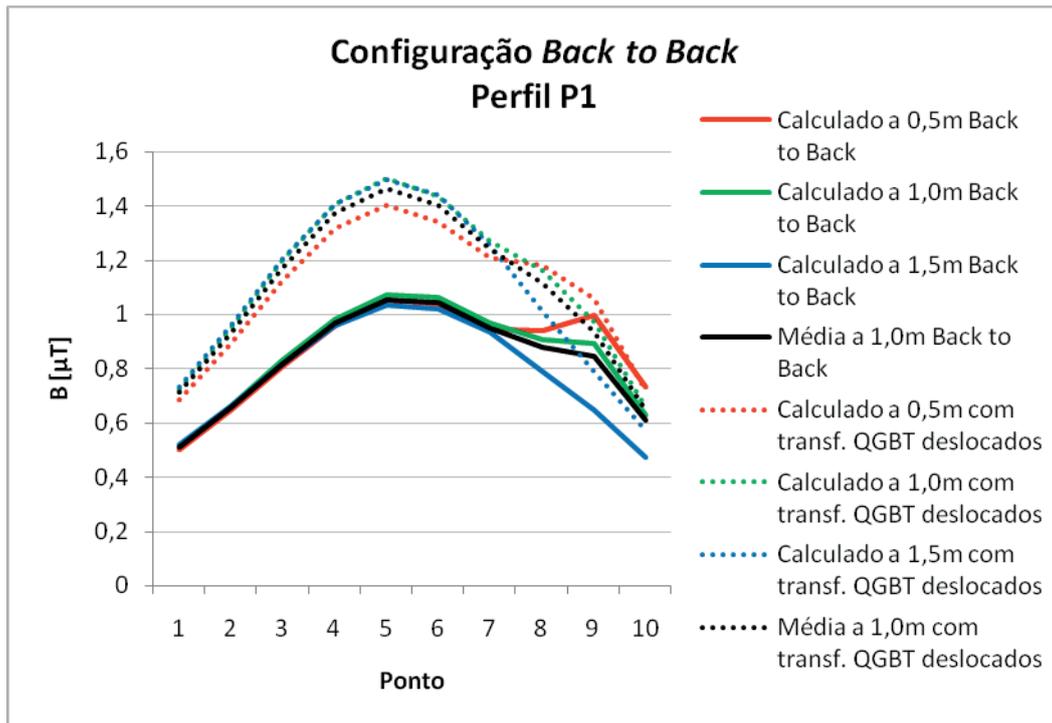


Figura 4.35- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P1 utilizando a configuração Back to Back e modelo em que se modificou a posição do transformador e QGBT

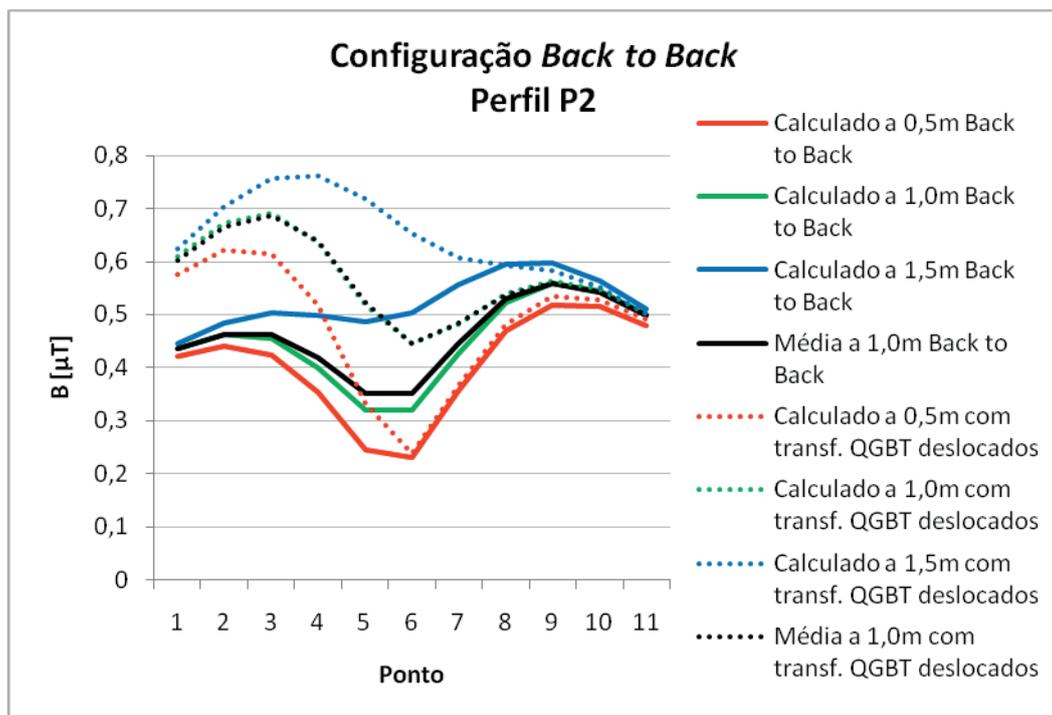


Figura 4.36- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P2 utilizando a configuração Back to Back e modelo em que se modificou a posição do transformador e QGBT

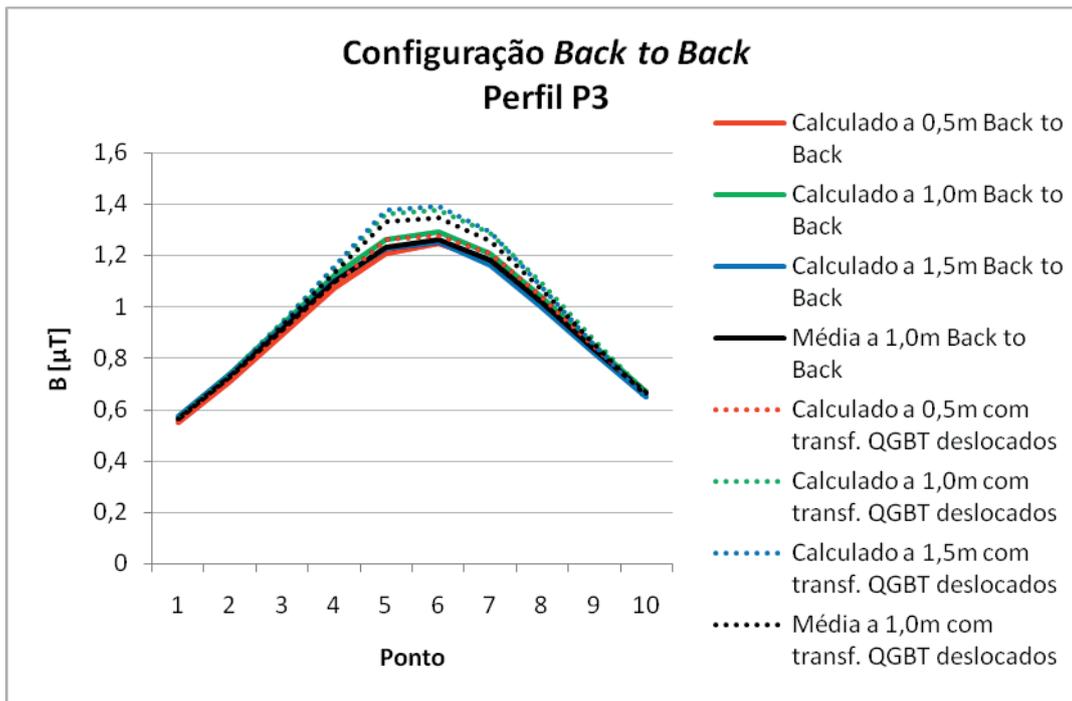


Figura 4.37- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P3 utilizando a configuração Back to Back e modelo em que se modificou a posição do transformador e QGBT

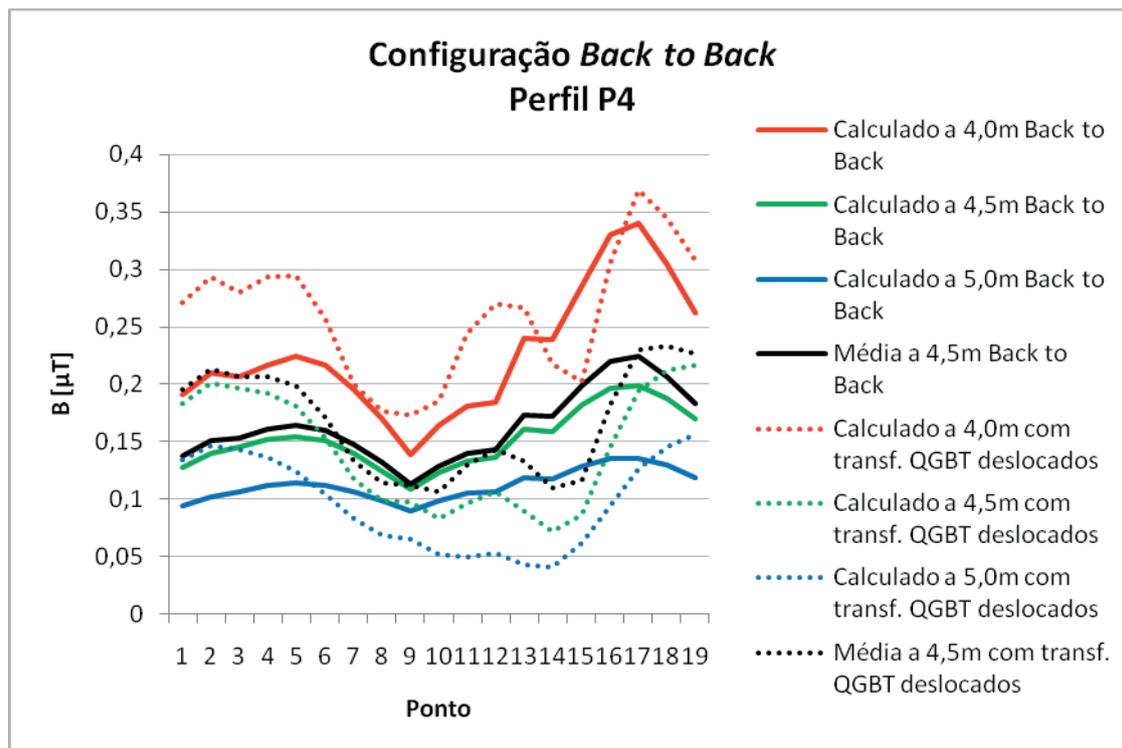


Figura 4.38- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P4 utilizando a configuração Back to Back e modelo em que se modificou a posição do transformador e QGBT

Nas simulações efectuadas constatou-se que a configuração *Back to Back* reduz significativamente o campo nas áreas de interesse, como seria expectável, tendo em conta os resultados obtidos no ponto anterior.

Nas habitações adjacentes verificou-se que o campo atinge o valor médio, em altura,

de $1,26 \mu T$ no perfil P3 e $1,05 \mu T$ no perfil P1. No perfil P2 o campo é bastante inferior a $1 \mu T$.

Nas habitações localizadas por cima do PT também foi verificada uma redução de campo, visto que o valor máximo, calculado a $0,5 m$ de altura, é de apenas $0,34 \mu T$, enquanto o valor médio, em altura, atinge $0,22 \mu T$.

Também foi efectuado um estudo de sensibilidade relativo à distância entre o QGBT e o transformador. Variou-se essa proximidade de modo a averiguar se existe algum efeito de anulação de campo, devido aos barramentos estarem adjacentes aos cabos de baixa tensão que são percorridos por correntes com a mesma fase, mas sentidos opostos. Concluiu-se que esta configuração é pouco sensível a ligeiras variações de distância entre os elementos agregados.

Conclui-se, assim, que esta medida de redução é extremamente eficaz na redução do campo nas áreas de interesse consideradas porque as principais fontes de campo estão concentradas numa área reduzida e no centro da sala, tirando partido do facto do campo decair rapidamente com o aumento da distância relativamente às fontes. Além disto, o facto dos elementos estarem no centro da sala tira partido do maior factor de mitigação proporcionado pelas armaduras das lajes, devido ao facto dos efeitos na periferia das malhas serem minimizados.

4.2.5 VARIAÇÃO DAS DIMENSÕES DOS INTERRUPTORES TETRAPOLARES

Com esta medida de mitigação estuda-se a possibilidade de reduzir o campo emitido pelo QGBT actuando na distância entre os barramentos, visto ser definida pelo tipo de interruptores tetrapolares utilizados. Este estudo tem particular interesse pelo facto dos barramentos do QGBT comportarem as correntes de maior intensidade de todo o PT, pelo que a redução do campo B, nas áreas de interesse, poderá ser assinalável.

O modelo do interruptor tetrapolar utilizado no QGBT é o Sirco 1250A e será substituído pelo Sirco CD 1250A, cuja distância entre barramentos adjacentes é menor. Na figura 4.39 está ilustrado o modelo utilizado para simulação.

Nas figuras 4.40 a 4.43 são apresentados os resultados obtidos com o modelo descrito e são comparados com a situação em que se utiliza o interruptor presente na instalação estudada.

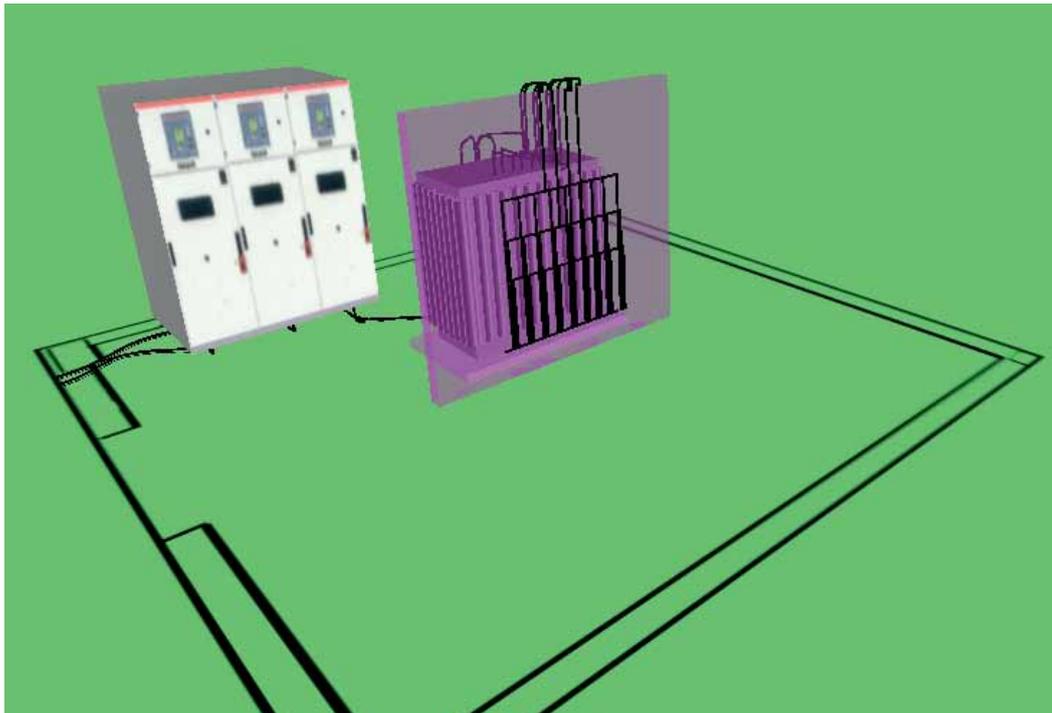


Figura 4.39- Modelo do PT, com a configuração Back to Back, utilizando um interruptor tetrapolar com menor distância entre os barramentos (modelo Sirco CD 1250A)

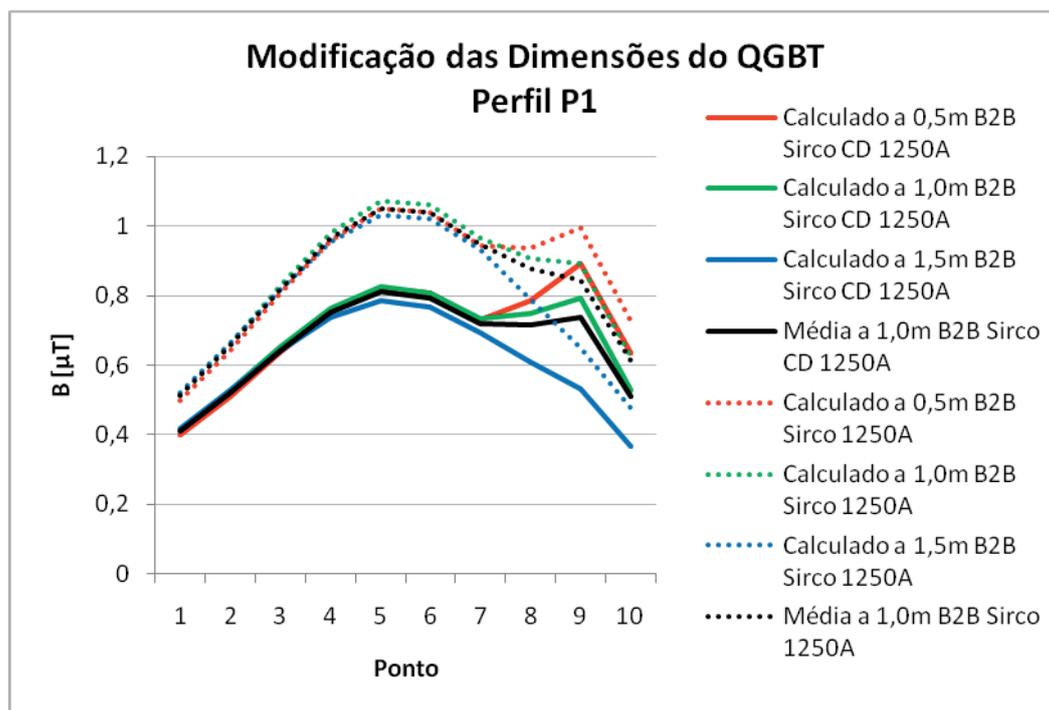


Figura 4.40 - Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P1 utilizando dois tipos de interruptores tetrapolares

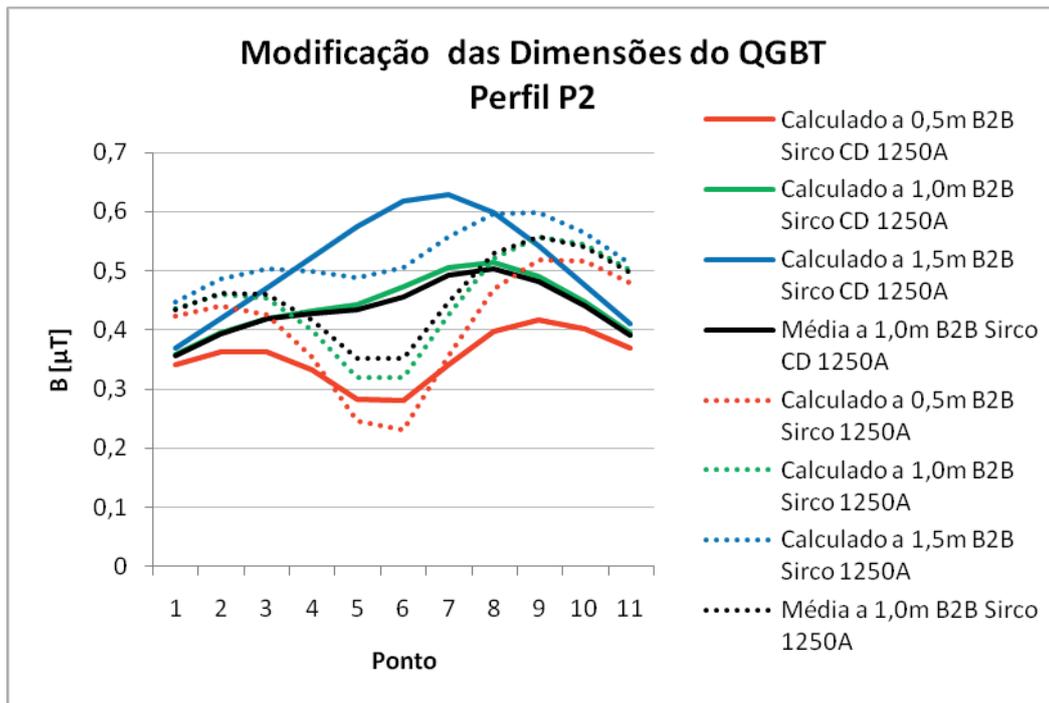


Figura 4.41 - Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P2 utilizando dois tipos de interruptores tetrapolares

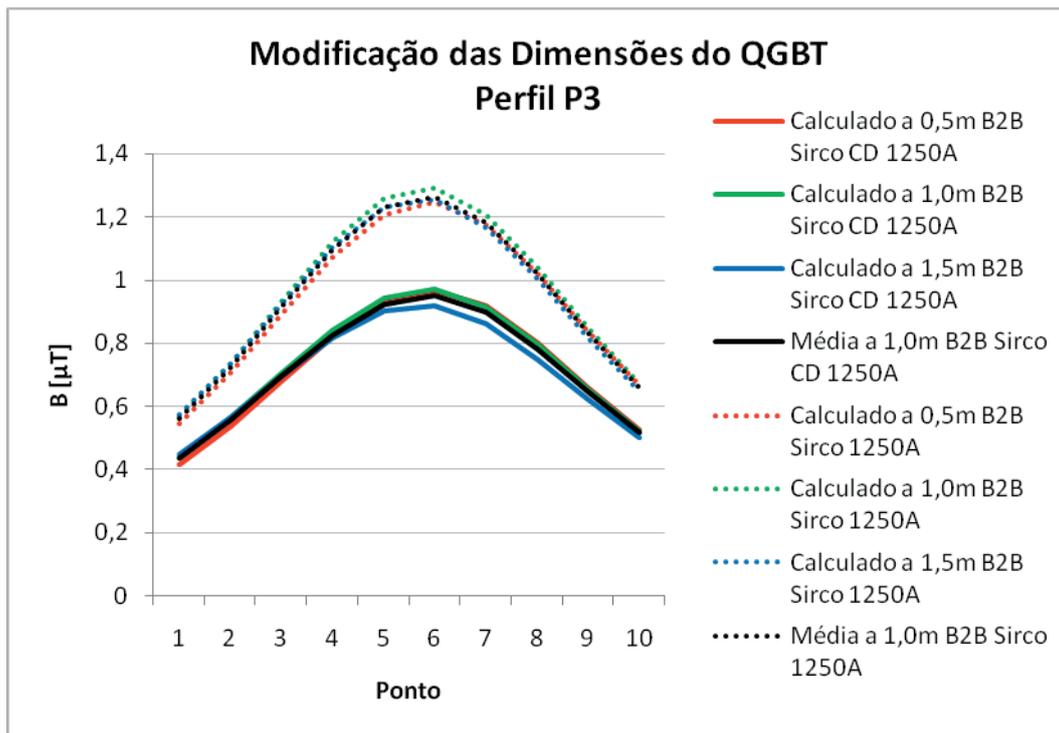


Figura 4.42- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P3 utilizando dois tipos de interruptores tetrapolares

No seguimento ilustra-se a distribuição espacial de campo que se obteve, com o modelo relatado, a 4,0 m, 4,5 m e 5,0 m de altura.

Observando os resultados verifica-se que a redução obtida é ligeira, embora seja suficiente para garantir que o campo calculado é inferior a 1 μ T.

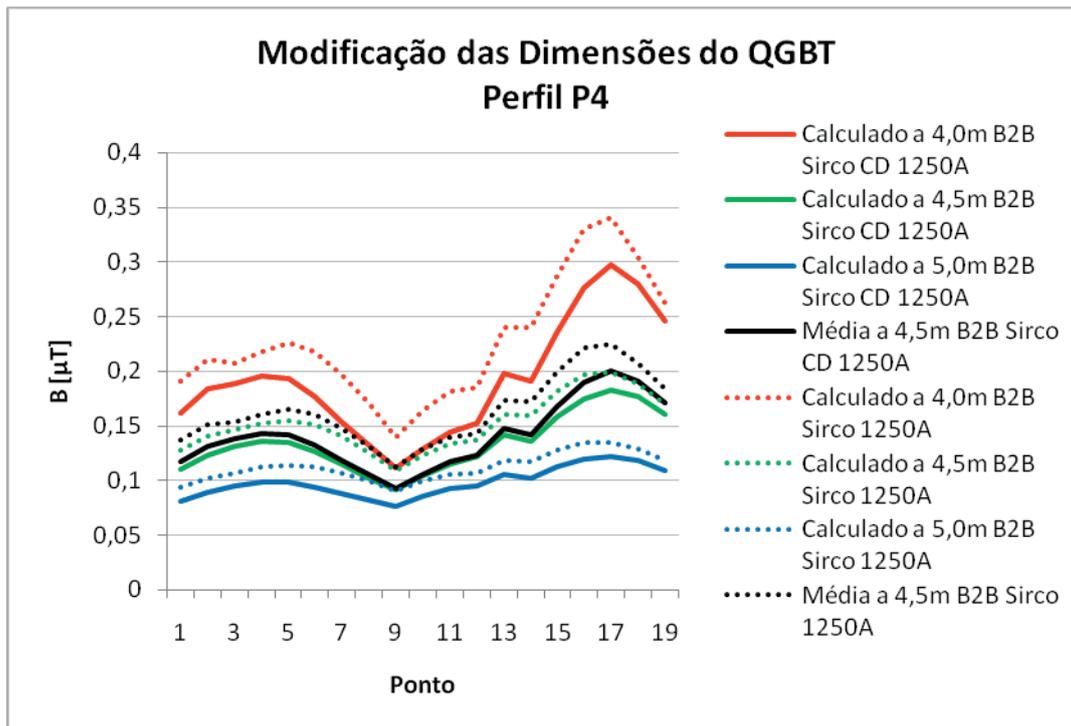


Figura 4.43- Comparação entre o campo B calculado ao longo do perfil P4 utilizando dois tipos de interruptores tetrapolares

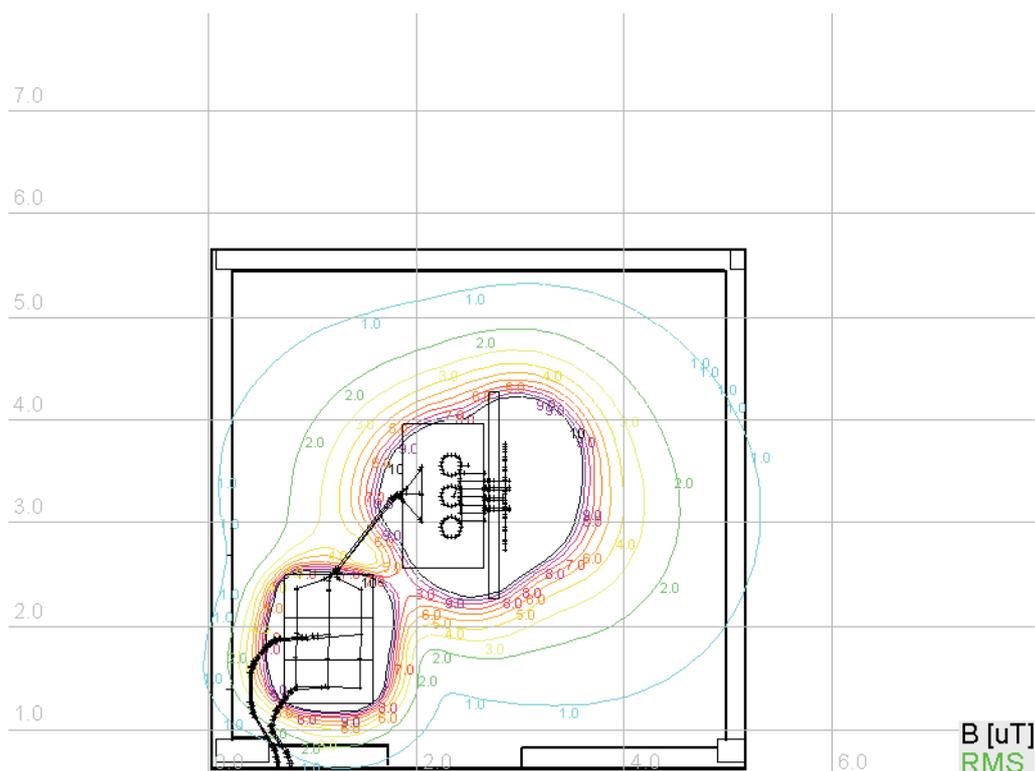


Figura 4.44 - Linhas de campo B em plano $z=1,0m$ com a configuração Back to Back e um interruptor com menores dimensões

Inicialmente, nos perfis P1 e P3, o campo era tenuemente superior a $1 \mu T$ e, com a alteração da distância entre os barramentos contíguos do QGBT, verificou-se que o valor de campo mais elevado atinge, em valor médio, $0,95 \mu T$. Nesses perfis calcu-

lou-se que o campo atinge apenas 80% do seu valor inicial (antes da modificação), nas três alturas de cálculo. No perfil P2 constatou-se que o campo aumentou relativamente à situação inicial, que pode ser explicado com o facto dos cabos de BT deixarem de estar alinhados com os barramentos do QGBT, visto não ser possível alterar a posição das saídas de BT do transformador.

No perfil P4 a redução de campo é tal que garante que o campo máximo, calculado a $0,5\text{ m}$ de altura no apartamento, é inferior a $0,3\ \mu\text{T}$ e que o campo médio, em altura, mais elevado alcance $0,22\ \mu\text{T}$.

A redução proporcionada por esta medida é muito ligeira tendo em conta o investimento necessário para a substituição do equipamento, pelo que deverá ser implementada na fase de projecto do PT.

4.2.6 CONFIGURAÇÃO *BACK TO BACK* COM ELEMENTOS METÁLICOS

Como medida adicional de mitigação estudou-se a inserção de elementos metálicos entre o transformador e o QGBT, utilizando a configuração *Back to Back*, como mostra a Figura 4.45. Com isto, pretendeu-se estudar o efeito que os painéis de rede de alumínio e as malhas de aço têm sobre o campo calculado nas habitações adjacentes, visto que as habitações localizadas directamente por cima do PT não serão afectadas.

Efectuam-se diversas simulações utilizando malhas de aço, com retícula de 10 cm e secções de 80 e 200 mm^2 , e painéis de alumínio com retículas e secções de 3 cm e 7 mm^2 e 4 cm e 16 mm^2 . Para efeitos de comparação, também foram incluídas situações em que se reduziram as dimensões do QGBT, recorrendo para isso à substituição do interruptor tetrapolar original pelo Sirco CD 1250A. Toma-se como referência o modelo *Back to Back*, sem modificações. Todas as malhas têm, aproximadamente, $2,0\text{ m}$ de comprimento e $1,60\text{ m}$ de altura.

Nas Figuras 4.46 a 4.48 estão representados graficamente alguns resultados obtidos para várias situações, onde se apresentam os valores médios, a $1,0\text{ m}$ de altura, do campo B calculado. Uma ilustração das simulações efectuadas é apresentada na Figura 4.49.

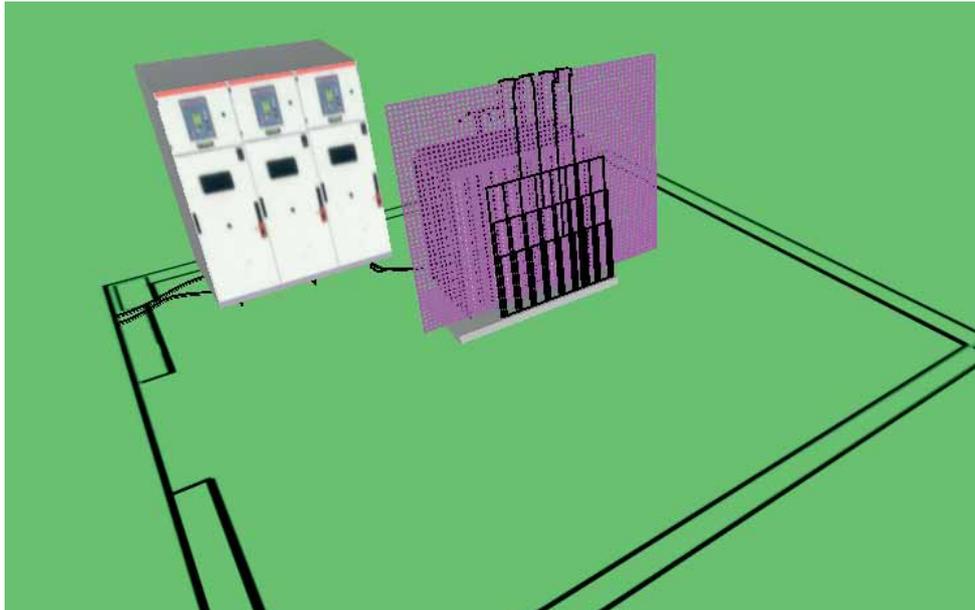


Figura 4.45 - Modelo Back to Back do PT com um painel de rede entre com QGBT e o transformador com retícula de 3cm

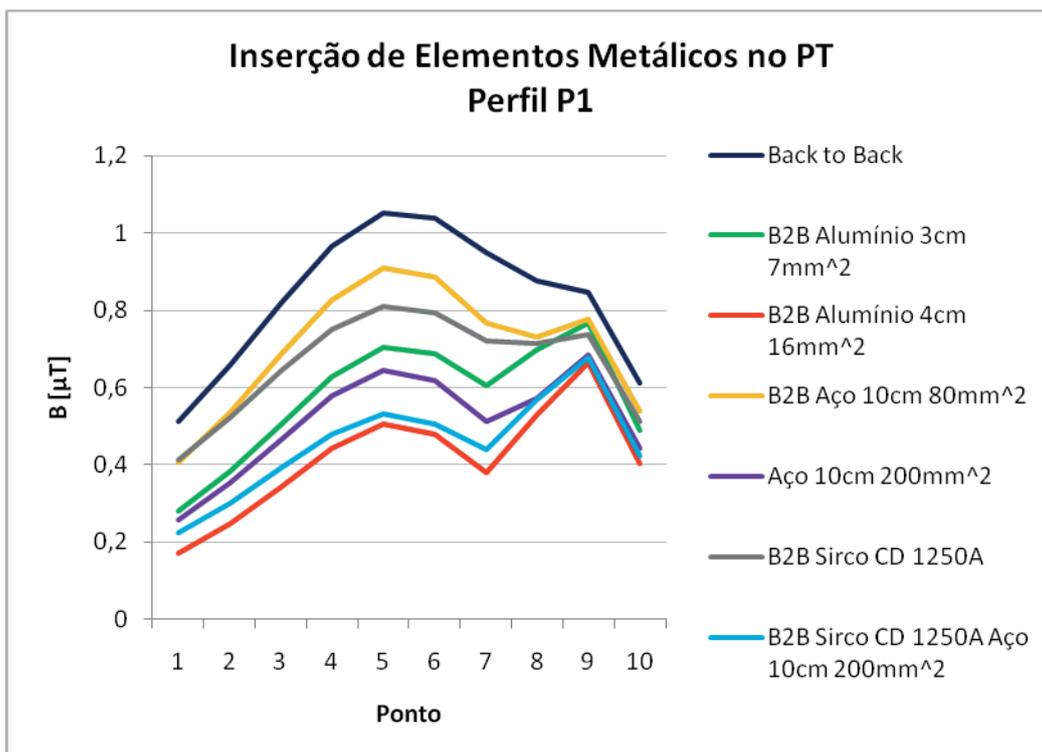


Figura 4.46 - Campo B médio a 1,0m de altura ao longo do perfil P1, adicionando elementos metálicos ao modelo Back to Back

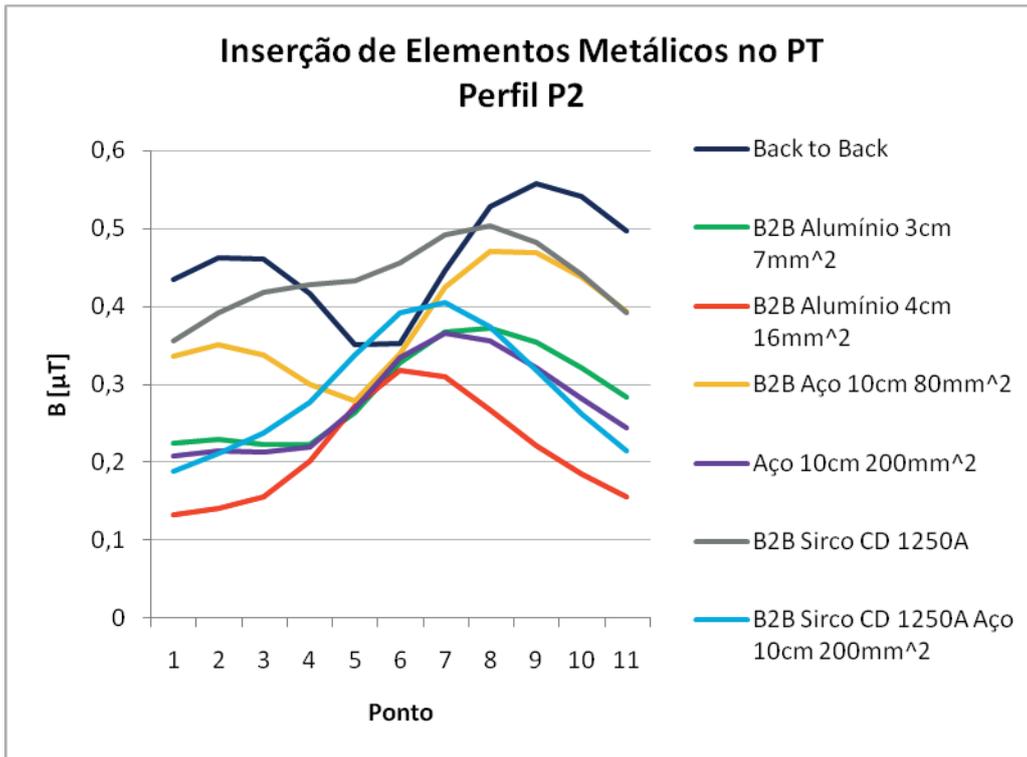


Figura 4.47 - Campo B médio a 1,0m de altura ao longo do perfil P2, adicionando elementos metálicos ao modelo Back to Back

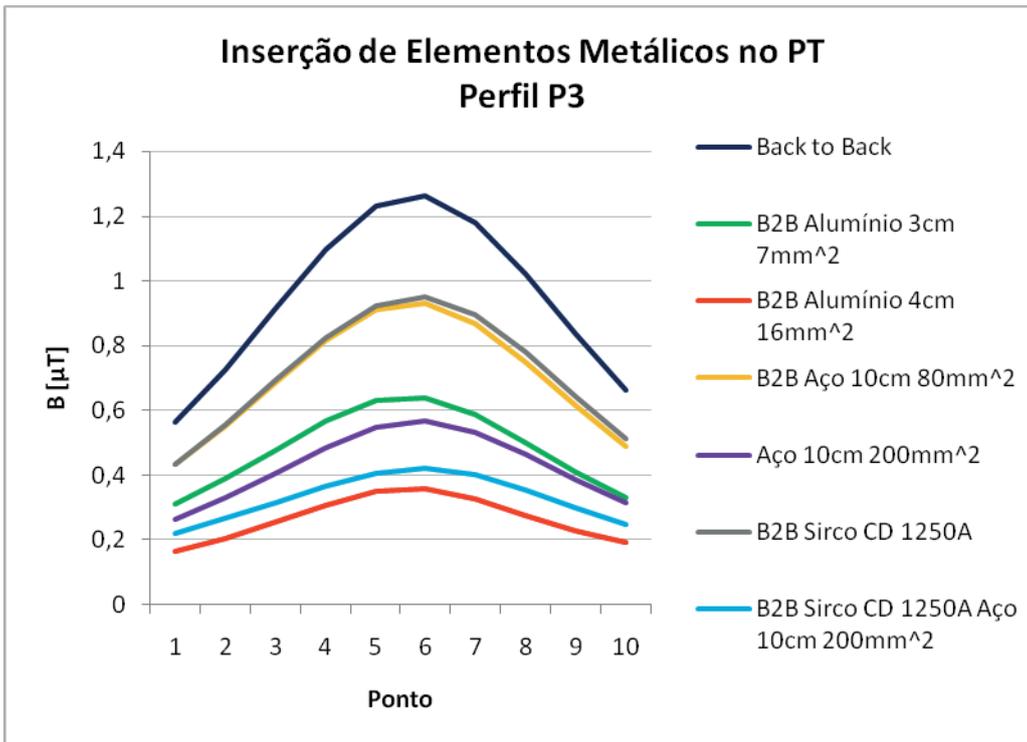


Figura 4.48 Campo B médio a 1,0m de altura ao longo do perfil P3, adicionando elementos metálicos ao modelo Back to Back



Figura 4.10 - Linhas de campo B em plano $z=1,0m$ utilizando o modelo Back to Back com um painel de alumínio com retícula de **4 cm** e secção de **16 mm²**

Observando os resultados obtidos mostra-se que a colocação de malhas e redes metálicas causa uma redução do campo B nas habitações adjacentes. Dada a menor condutividade do aço, é necessário utilizar secções consideráveis, comparativamente ao alumínio, para que se obtenham resultados semelhantes.

Utilizando um painel de rede de alumínio com uma retícula de **4 cm** e secção de **16 mm²** (raio de **2,25 mm**) atesta-se que a redução do campo é considerável, principalmente no perfil P3, visto que atinge apenas **28%**, em média, do valor calculado com recurso à configuração *Back to Back* inicial. Ao longo dos perfis P1 e P2 a redução é mais modesta, dado que o campo calculado se reduz apenas a **50%** da situação de referência.

Embora menos eficazes do ponto de vista de mitigação de campo, os elementos de aço também proporcionam uma mitigação assinalável quando aplicadas no modelo em estudo. Verifica-se que ao reduzir a distância entre as barras do QGBT, recorrendo para isso à utilização do interruptor tetrapolar Sirco CD 1250A, mantendo a malha de aço, que o campo calculado sofre uma atenuação adicional. Com isto, prova-se que estas medidas podem ser adicionadas de modo a reduzir a exposição nas áreas de interesse.

Em ambos os casos descritos o campo atinge valores residuais próximos dos pre-

sentos no interior de habitações devido à utilização de equipamentos eléctricos e electrónicos. Isto prova que é possível reduzir grandemente a exposição a campos B, produzidos por PT localizados no interior de edifícios, utilizando para isso medidas de baixo custo.

4.2.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Com os resultados obtidos verifica-se que a modificação da geometria dos cabos é suficiente para garantir que a exposição média, nas habitações localizadas por cima do PT, seja muito inferior a $1 \mu T$. No entanto, esta modificação surte pouco efeito no campo calculado nos perfis adjacentes ao PT.

O aumento da distância do QGBT e do transformador, relativamente às paredes que delimitam o PT, é a medida com que se obtém os melhores resultados, dado que o valor de pico do campo médio sofre uma redução superior a uma ordem de grandeza. A configuração *Back to Back* vem no seguimento da alteração anterior, porque agrupa, no centro do PT, o transformador e o QGBT.

Utilizando um interruptor tetrapolar mais compacto no QGBT e tendo como base o modelo *Back to Back*, verifica-se que o valor de pico do campo sofreu uma redução, colocando o valor de campo abaixo de $1 \mu T$. No entanto, esta diminuição no valor de campo não justifica a substituição do equipamento, pelo que deverá ser implementada na fase de projecto. Por outro lado, as malhas e redes são uma solução económica que produz excelentes resultados quando aplicadas entre o QGBT e o transformador. É possível reduzir o campo para valores residuais utilizando uma malha de alumínio com retícula de 4 cm e secção de 16 mm^2 .

4.3 RECOMENDAÇÕES PRÁTICAS PARA POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO INSTALADOS EM EDIFÍCIOS

Os Postos de Transformação de MT/BT efectuem a última conversão dos níveis de tensão antes de a electricidade chegar dos clientes domésticos (Figura 4.50). No lado da Baixa Tensão a amplitude da corrente aumenta, levando à criação de campos magnéticos particularmente intensos.



Figura 4.50 - Exemplo do interior de um Posto de Transformação estudado. Note-se a instalação dos QGBT na parede à esquerda

Embora a Lei 30/2010 de 2 de Setembro apenas abranja expressamente a “Alta e Muito Alta Tensão”, o que exclui inequivocamente os circuitos e aparelhos de Baixa Tensão dos PT interiores, é efectivamente nestes que se observam os maiores níveis de eventual exposição humana a campos magnéticos, e é portanto também nestes que será mais relevante a adopção de medidas mitigadoras, estudadas com particular detalhe neste trabalho.

Para mitigar o campo B nos PTs deve-se estudar a contribuição de cada componente, para adequar as medidas de redução de campo e, como foi mostrado, o principal problema está localizado no lado de baixa tensão dessas instalações. As principais contribuições para o campo total são provenientes do quadro geral de baixa tensão (QGBT), dos cabos de baixa tensão e do transformador, porque são os elementos percorridos pelas correntes de maior intensidade. Além disso, a posição dos elementos na sala influencia grandemente o campo calculado nas áreas de interesse, sendo comum caracterizar os PT pela posição dos condutores de BT.

A modelação computacional é uma metodologia adequada porque permite a análise de um grande número de cenários, variando cargas, zonas de interesse e análise de várias medidas de mitigação. Estas medidas foram estudadas de forma cumulativa, sempre que possível, de modo a avaliar se existe uma progressiva redução do campo calculado quanto duas ou mais medidas são adicionadas. Nos pontos seguintes descrevem-se, com detalhe, as medidas de mitigação recomendadas, por ordem crescente de custos.

4.3.1 ALTERAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO

A escolha adequada da disposição dos cabos de baixa tensão tem um impacto significativo sobre o valor do campo B emitido, especialmente no piso superior ao de instalação dos PT, e é de muito baixo custo. Assim, a primeira medida a tomar de modo a reduzir as emissões de campo B será agrupar os condutores o mais próximos possível, já que a distância entre eles tem uma grande influência no campo emitido.

O segundo ponto a ter em conta é a posição relativa entre as três fases, R, S e T e o condutor de neutro.

Dependendo da potência nominal do transformador podem ser utilizados vários condutores paralelos por fase, geralmente variando de 1 a 3 cabos, de forma a facilitar as ligações e a execução do percurso nas instalações, que seria dificultado pelo uso de secções muito elevadas.

Todas as ligações entre o QGBT e Transformador nos PTs estudados são efectuadas com recurso a 2 condutores de fase e 1 de neutro através de 7 cabos, estando dispostos em esteira, sendo que os cabos da mesma fase são adjacentes, como mostra a Figura 4.51.

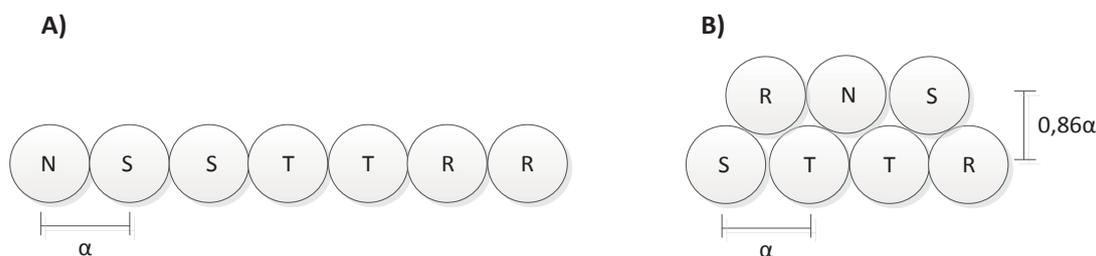


Figura 4.51 - Configurações geométricas alternativas para os cabos de baixa tensão: A) esteira usual; B) esteira com dois níveis recomendada.

Na Figura 4.51 B) é apresentada a configuração proposta. Na Figura 4.52 compara-se o campo emitido utilizando ambas as configurações, com correntes e escala iguais em ambos os casos, onde o factor de mitigação médio foi de 7,7 (calculado com base em oito pontos definidos em torno dos cabos). Foram efectuadas mais simulações, utilizando diferentes relações entre as correntes das fases e neutro, conforme verificado *in loco*, de modo a verificar a consistência dos resultados.

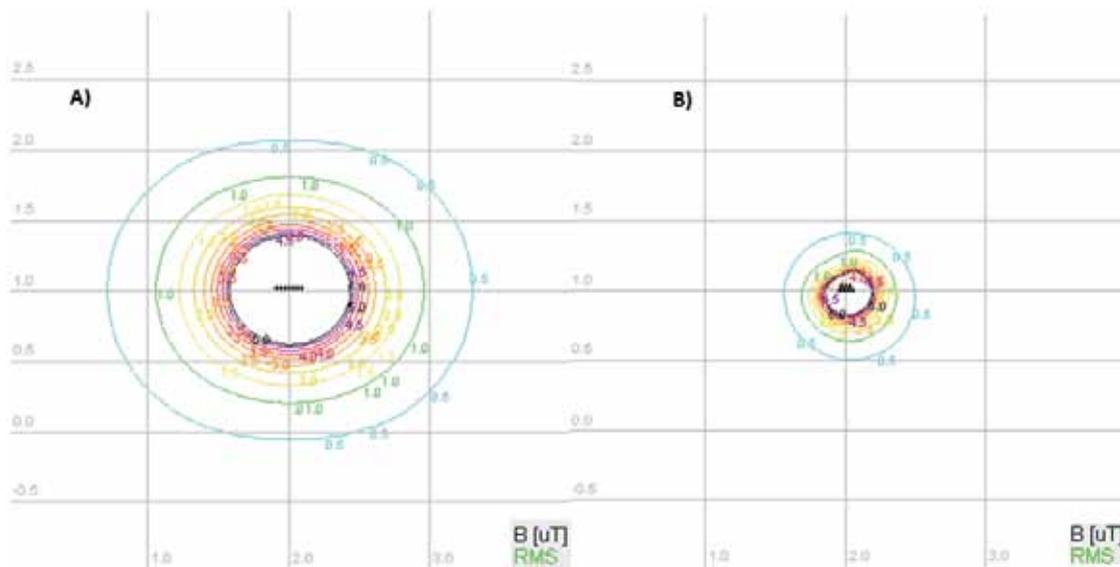


Figura 4.52 - Comparação entre o campo B emitido por cada configuração dos cabos de BT: A) esteira; B) esteira com dois níveis

Esta medida de mitigação produz uma redução de campo considerável, e em regra é suficiente para limitar o campo B a 1 µT nos pisos superiores.

4.3.2 MODIFICAÇÃO DO PERCURSO DOS CABOS DE BAIXA TENSÃO

Esta medida consiste no reencaminhamento dos cabos de baixa tensão, que são uma das principais fontes de campos B, e deve ser aplicada em PTs onde os referidos cabos estejam próximos do tecto. Esta modificação será implementada em conjunto com a alteração da disposição dos cabos descrita no ponto anterior.

Além dos aspectos referidos, esta modificação também permite a modificação da posição de equipamentos que é descrita no ponto seguinte.

4.3.3 AFASTAMENTO DO QGBT E DO TRANSFORMADOR DAS PAREDES QUE DELIMITAM O PT

O campo B, calculado nas áreas de interesse, diminui de intensidade com o aumento da distância, d , relativamente à fonte. No entanto, a taxa de redução depende do tipo de fonte. Para campos B emitidos por transformadores, estes diminuem muito rapidamente com o aumento da distância ($1/d^3$), enquanto o campo radiado por circuitos com vários condutores decai mais lentamente ($1/d^2$).

Sabendo que o QGBT e o Transformador são das mais importantes fontes de campo B, agravado pelo facto de estarem usualmente colocados na proximidade das paredes que delimitam o PT, torna-se necessário reduzir a contribuição destes elementos

nas áreas de interesse (habitações adjacentes ao PT). Trata-se de um campo que pode chegar às dezenas de μT e que será muito mais dispendioso reduzir de outra forma.

O estudo mostra que um afastamento de pelo menos 2m é recomendável. Note-se, aliás, que em Israel existe a proibição de instalação do transformador a menos de 3m de locais habitacionais, mas o estudo realizado aqui mostra que, mais que o transformador, é o QGBT que deve ser afastado.

4.3.4 CONFIGURAÇÃO BACKTOBACK

Como se viu, uma boa medida de redução do campo nas áreas de interesse é o afastamento do transformador e QGBT das paredes que delimitam o PT. A solução ideal converge para a configuração *Back to Back* (B2B), que consiste em agregar o transformador e o QGBT, colocando-os o mais próximos possível no centro da sala onde está o PT, como exemplifica a Figura 4.53. Note-se, de resto, que esta montagem é a solução recomendada pelos estudos realizados na Finlândia.

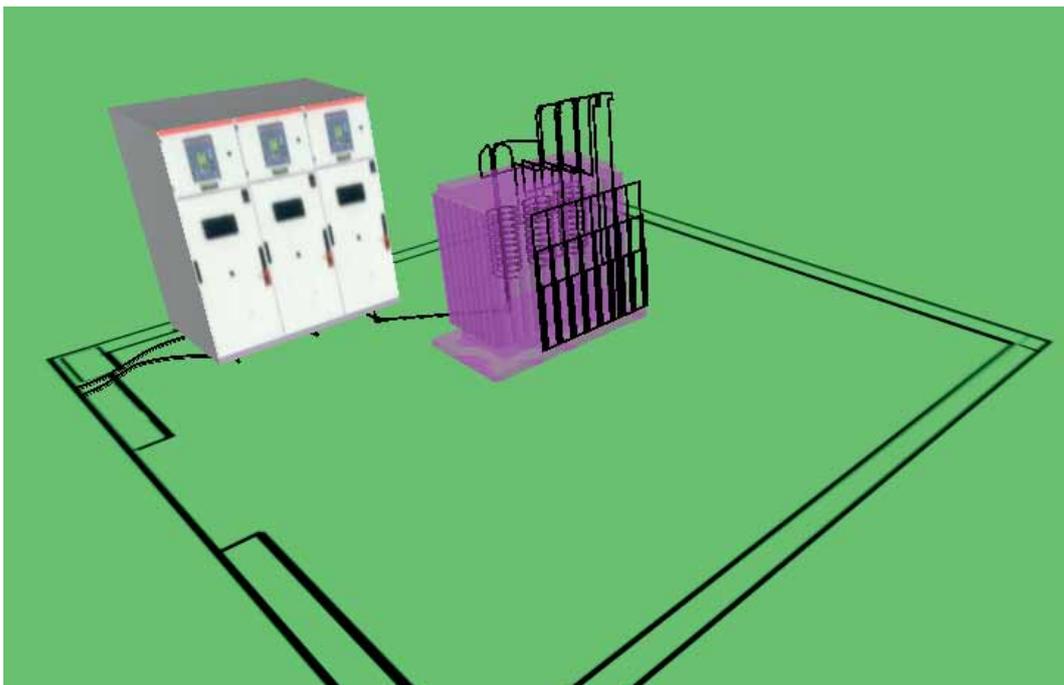


Figura 4.53 - Exemplo de um modelo de um Posto de Transformação com a configuração Back to Back

Com esta medida, diminui-se o tamanho de todo o circuito de BT fazendo com que as principais fontes de campo estejam concentradas numa área reduzida, o que leva a uma menor dispersão de campo, e a que este seja reduzido nas áreas sensíveis. Além da redução do campo B nas habitações adjacentes, devido ao aumento da distância, verifica-se que o campo nas habitações localizadas por cima do PT também é reduzido. Isto deve-se à eliminação dos efeitos na periferia da armadura da laje.

Contudo, esta solução necessita de uma estrutura rígida que suporte o QGBT, o que pode dificultar a implementação desta medida em PTs já construídos.

4.3.5 REDUÇÃO DAS DIMENSÕES DOS INTERRUPTORES TETRAPOLARES

O QGBT é uma das principais fontes de campo B e, devido a esse facto, é eficaz a redução do campo nas áreas de interesse actuando na distância entre os barramentos, utilizando interruptores tetrapolares mais compactos.

Nos PTs mais recentes, verificou-se que os interruptores tetrapolares utilizados são da SOCOMEC e que existem diferenças consideráveis nas dimensões físicas (entre os barramentos) dos modelos mais utilizados, Sirco 1250A e Sirco CD 1250A. Ambos possuem a mesma corrente nominal para uma tensão composta de **400 V**, mas a corrente de curto-circuito que é suportada durante **0,3 s** é de **65 kA** no Sirco CD 1250A mas **100 kA** no Sirco 1250A, e o número de ciclos de funcionamento é de **3000** no Sirco CD 1250A e **4000** no Sirco 1250A.

Na Figura 4.54 são mostrados os dois tipos de interruptores referenciados em instalações da EDP.



Figura 4.54 – Exemplo de dois interruptores tetrapolares em PTs, A) SOCOMEC Sirco 1250A num PT com potência nominal de 400 kVA B) SOCOMEC Sirco CD 1250A num PT com potência nominal de 2×630 kVA

Observando a Figura 4.55 e outros dados verifica-se que a distância entre o centro dos barramentos adjacentes é de **120 mm** para o modelo 1250A e de **80 mm** para o CD 1250A (distância total de $3 \times 80\text{mm} = 24\text{cm}$).

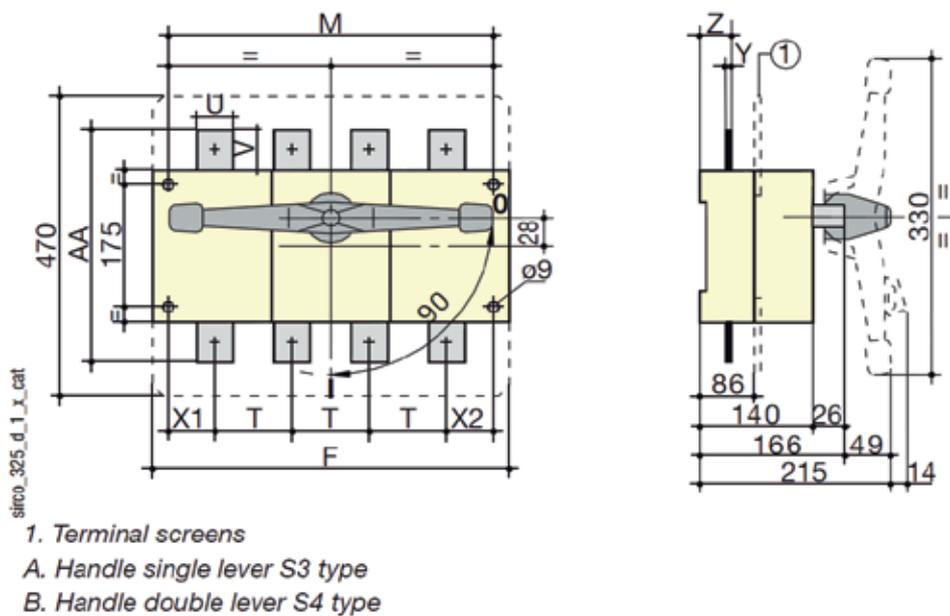


Figura 4.55 - Esquemático de frente e perfil dos interruptores tetrapolares Sirco 800 a 1800A (37)

Como esta medida envolve a substituição de um equipamento, esta deverá ser aplicada na fase inicial do projecto, para evitar custos excedentários.

4.3.6 CONFIGURAÇÃO *BACK TO BACK* COM ELEMENTOS METÁLICOS

Os materiais metálicos são uma forma eficaz de mitigar o campo B. As medidas de mitigação estudadas neste trabalho têm em conta o custo de implementação e, como tal, só se estudaram painéis de rede e malhas metálicas, fáceis de instalar e de baixo custo.

Os painéis de rede são particularmente utilizados em protecções de segurança, coberturas e divisórias, em conjunto com perfis de caixilharia, enquanto as malhas metálicas podem ser construídas usando barras de aço normalmente utilizadas na construção das armaduras de lajes, paredes-mestras, pilares e vigas dos edifícios.

Para a implementação desta medida de mitigação utiliza-se o modelo *Back to Back*, onde o transformador e o QGBT estão agregados no centro do PT. Como se pode atestar na Figura 4.56, os elementos metálicos são colocados entre o transformador e QGBT, havendo várias razões para isso:

- O factor de mitigação aumenta com a proximidade à fonte de campo;
- O local onde estão colocados os elementos metálicos não dificulta a reparação ou substituição de componentes;
- No caso da configuração *Back to Back* estar no projecto inicial do PT, é relativa-

mente económico construir uma parede ou armação, que tem a finalidade de suportar o QGBT, com elementos metálicos embutidos.

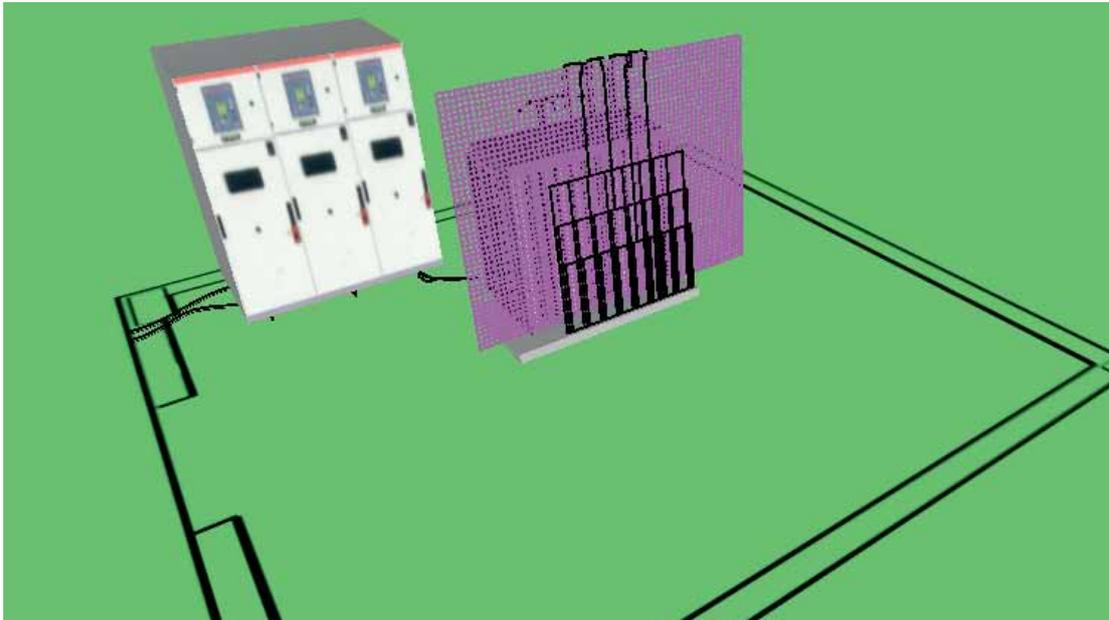


Figura 4.56 – Modelo Back to Back de um PT com um painel de rede entre o QGBT e o Transformador com uma retícula de 3cm

Os metais utilizados na fabricação dos painéis de rede são o alumínio anodizado e o ferro zincado, enquanto as barras, utilizadas na construção civil para construir a armadura da laje, são de aço macio.

Os tratamentos anticorrosão são alterações superficiais, que afectam camadas na ordem de umas dezenas de micrómetros e, devido a esse facto, na modelação não se consideram essas heterogeneidades e utilizam-se valores médios *bulk*. Os parâmetros para o aço são idênticos aos utilizados na armadura da laje.

Com o conjunto das medidas estudadas é sempre possível limitar o campo magnético a $1 \mu\text{T}$, em áreas de eventual exposição pública próximas.



distribuição