

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
BLINDAGENS PARA CAMPOS MAGNÉTICOS DE
BAIXA FREQUÊNCIA CONSIDERANDO FATOR
DE REDUÇÃO E IMPACTO TÉRMICO**

Diogo Sampaio César Souza
Belo Horizonte
2020

TESE DE DOUTORADO Nº 344

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE BLINDAGENS PARA CAMPOS
MAGNÉTICOS EM BAIXA FREQUÊNCIA CONSIDERANDO FATOR DE
REDUÇÃO E IMPACTO TÉRMICO**

Diogo Sampaio Cesar Souza

DATA DA DEFESA: 16/11/2020

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
BLINDAGENS PARA CAMPOS MAGNÉTICOS DE
BAIXA FREQUÊNCIA CONSIDERANDO FATOR
DE REDUÇÃO E IMPACTO TÉRMICO**

Diogo Sampaio Cesar Souza

Tese de Doutorado submetida à banca examinadora designada pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ivan José da Silva Lopes
Coorientador: José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte – MG
Novembro de 2020

S729m

Souza, Diogo Sampaio César.

Modelagem computacional de blindagens para campos magnéticos de baixa frequência considerando fator de redução e impacto térmico [recurso eletrônico] / Diogo Sampaio César Souza. - 2020.

1 recurso online (xv, 163 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Ivan José da Silva Lopes.

Coorientador: José Osvaldo Saldanha Paulino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 159-163.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Blindagem (Eletricidade) - Teses. 3. Campos magnéticos - Teses. 4. Método dos elementos finitos - Teses. 5. Modelagem computacional - Teses. I. Lopes, Ivan José da Silva. I. Paulino, José Osvaldo Saldanha. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

"Modelagem Computacional de Blindagens Para Campos Magnéticos Em Baixa Frequência Considerando Fator de Redução e Impacto Térmico"

Diogo Sampaio Cesar Souza

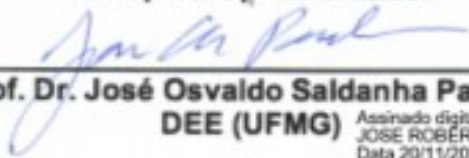
Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 16 de novembro de 2020.

Por:



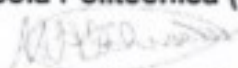
Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG) - Orientador



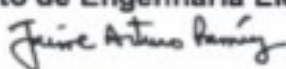
Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
DEE (UFMG)

Assinado digitalmente por
JOSE ROBERTO CARDOSO
Data 20/11/2020 19:01:37 -
03:00
CPF: 52072320867

Prof. Dr. Jose Roberto Cardoso
Escola Politécnica (USP)



Prof. Dr. Marco Aurelio de Oliveira Schroeder
Departamento de Engenharia Elétrica (UFSJ)



Prof. Dr. Jaime Arturo Ramirez
Departamento de Engenharia Elétrica (UFMG)



Prof. Dr. Ricardo Luiz da Silva Adriano
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha mãe, Rosângela, pois sem todos os seus sacrifícios, nunca conseguiria chegar até esse momento. Muito obrigado por tudo mãe, todas as oportunidades que tive foram graças a você.

Agradeço ao meu orientador, Ivan, pelos incentivos, orientações e conversas que auxiliaram muito no desenvolvimento desse trabalho. Agradeço ao meu co-orientador, José Osvaldo, por todos os seus ensinamentos ao longo dos anos de convivência. Sou muito agradecido pelo convívio com ambos e por ter aprendido um pouco com os exemplos que vocês são. Agradeço também aos professores do meu período de graduação, mestrado e doutorado, pois todos possuem papel fundamental na minha formação e na escolha da minha profissão.

Agradeço aos meus familiares por terem me apoiado nesse caminho e tornarem isso tudo possível. Gostaria de agradecer a minha tia Rosana, por ter sido sempre a minha conselheira na vida acadêmica. Agradeço ao meu pai, apesar de ter partido tão cedo, sei que sempre esteve ao meu lado em todos os anos.

Um agradecimento muito especial a minha companheira Jamilla, por ter me apoiado durante esse período e, com muito amor, me ajudado sempre que precisava. Sem dúvida, ter conhecido ela durante esse período foi fundamental para tudo.

O meu muito obrigado a todos os meus colegas dos Laboratórios de Extra e Alta Tensão (LEAT) e de Compatibilidade Eletromagnética (LCE) pela excelente companhia durante todos esses anos. Agradeço pela amizade de todos e um obrigado especial para o Eng. José Luis pelas ótimas conversas do dia a dia. Agradeço pela oportunidade de utilizar o servidor do LEAT na realização das simulações computacionais desse trabalho.

Agradeço especialmente aos meus amigos Carlos e Marco Túlio, por terem me ajudado muito no desenvolvimento desse trabalho. Sem o auxílio de ambos, essa caminhada seria muito mais complicada.

Aos meus colegas do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Ibirité por terem me ajudado e permitido o meu afastamento. Apesar do pouco tempo de IFMG, tenho certeza que estou cercado por ótimos colegas e profissionais.

Agradeço aos meus amigos de colégio e de universidade pela amizade de longa data e pelo apoio durante mais essa jornada. O companheirismo e a risada dos amigos dão sentido à vida.

Agradeço a CAPES pelo amparo a minha pesquisa e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) pelo atendimento e pelo auxílio nesse período.

Enfim, agradeço a todos pelo apoio e pela ajuda. Sou muito grato a todos e tenho certeza de quem eu sou deve-se muito ao apoio e ao convívio com diversas pessoas maravilhosas. Espero poder retribuir tudo isso sendo professor, sempre honrando e me dedicando ao máximo para educação pública de qualidade!

RESUMO

O incremento contínuo do consumo de energia elétrica faz com que a população esteja cada vez mais submetida a campos eletromagnéticos de baixa frequência. Esta realidade contribui para a definição de legislações e normas mais restritivas sobre os limites de exposição da população a estes campos. Dessa forma, faz-se necessária a utilização de blindagens para a mitigação do campo magnético de baixa frequência, principalmente no entorno das principais fontes de campo, tais como: linhas aéreas, cabos subterrâneos e subestações. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo computacional sobre as técnicas de mitigação do campo magnético de baixa frequência. Para a realização desse estudo, foi feita uma revisão bibliográfica a respeito dos principais métodos de blindagem e da aplicabilidade do uso de cada técnica nas principais fontes de campo. Dentre as técnicas de mitigação estudadas, destacam-se: o rearranjo dos condutores, os *loops* de compensação com baixo e com alto acoplamento e as blindagens com materiais metálicos (condutivos ou ferromagnéticos). A partir da revisão teórica, foi definido o uso do *software* COMSOL *Multiphysics*® para o projeto de diferentes tipos de sistema de blindagem. Para a avaliação do desempenho das blindagens, são considerados o nível de atenuação do campo magnético e o impacto térmico provocado. Na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, o projeto da blindagem é feito por meio da modelagem do problema em duas dimensões (2D), não representando as terminações da blindagem e, conseqüentemente, a variação do desempenho ao longo do comprimento. Este trabalho apresenta simulações em duas e em três dimensões, a fim de avaliar o desempenho das técnicas de mitigação e vantagens oriundas do aperfeiçoamento do modelo computacional para três dimensões (3D). Com os resultados obtidos, conclui-se a importância da modelagem 3D no cálculo da eficácia da blindagem ao longo do comprimento de blindagens metálicas. Além de representar os efeitos das terminações das chapas, a modelagem 3D permite simular fontes de campo que tenham variações nos posicionamentos dos condutores ao longo do comprimento. Diante disso, ao final do presente trabalho, foi modelada uma caixa de emendas de um arranjo típico de linha de 138 kV. Para o estudo de caso, propõe-se a utilização de uma chapa plana de alumínio que reduz o campo magnético, sendo comprovado por meio da simulação 3D o desempenho da blindagem em toda a região de interesse e a atenuação do campo até o limite estabelecido.

Palavras-chave: blindagem, cabos subterrâneos, campo magnético, fator de redução, impacto térmico, método de elementos finitos e modelagem 3D.

ABSTRACT

The growing demand for electrical energy means that the population is increasingly subjected to low frequency electromagnetic fields. This reality contributes to the definition of more restrictive laws and norms on the population's exposure limits to these fields. The use of shields is necessary for the mitigation of the low frequency magnetic field, mainly in the vicinity of the main sources of field, such as: overhead lines, underground cables and substations. The present work aimed to develop a computational study on the low frequency magnetic field mitigation techniques. Initially, a bibliographic review was made regarding the main shielding methods and the applicability of using each technique in the main field sources. Among the mitigation techniques studied, the following stand out: conductor rearrangement, compensation loops and shielding with metallic materials (conductive or ferromagnetic). From the theoretical review, the use of COMSOL Multiphysics® software was defined for the design of different types of shielding systems. The evaluation of the shielding performance was made based on the attenuation of the magnetic field and the thermal impact caused. In most of the works found in the literature, the design of the shielding is done by modeling the problem in two dimensions (2D), not representing the terminations of the shielding and, consequently, the variation in performance along the length. This work presents simulations in two and three dimensions, in order to evaluate the performance of the mitigation techniques and advantages of the improvement of the computational model for three dimensions (3D). The analysis of the results showed the importance of 3D modeling in the calculation of the shielding effectiveness along the length of metallic shields. In addition to representing the effects of the plate terminations, 3D modeling allows to simulate field sources that have variations in the positions of the conductors along the length. At the end of the present work, a junction zone of a typical 138 kV line arrangement was modeled. For the case study, it is proposed to use a flat aluminum plate that reduces the magnetic field, with the 3D simulation demonstrating the shielding performance throughout the region of interest and the field attenuation up to the established limit.

Keywords: shielding, underground cables, magnetic field, reduction factor, thermal impact, finite element method and 3D modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Densidade de fluxo magnético (μT) no entorno de condutores espaçados em 10 metros e com corrente de 2000 A: (a) arranjo planar horizontal e (b) arranjo triangular. Retirada de [7].	15
Figura 2.2 - Densidade de fluxo magnético (μT) no entorno de condutores espaçados em 5 metros e com corrente de 2000 A: (a) arranjo planar horizontal e (b) arranjo triangular. Retirada de [7].	16
Figura 2.3 - Loops de compensação: (a) ativos e (b) passivos. Adaptada de [7].	17
Figura 2.4 - Diagrama do sistema de compensação com loops de alto acoplamento. Retirada de [8].	17
Figura 2.5 - Representação ilustrativa das linhas de campo magnético para a blindagem com chapas metálicas: (a) ferromagnético e (b) condutividade elétrica infinita. Adaptada de [7].	18
Figura 2.6 - Circulação das correntes induzidas nas chapas condutivas para a blindagem do campo gerado por cabos. Retirada de [7].	19
Figura 2.7 - Ilustração dos níveis de campo e do posicionamento de uma subestação construída no interior da edificação. Adaptada de [7].	27
Figura 3.1 - Representação das dimensões do domínio considerando a fronteira externa distante (40 metros) e a fronteira “infinita”.	37
Figura 3.2 - Valores calculados da distribuição da densidade de fluxo magnético no entorno de cabos subterrâneos.	38
Figura 3.3 - Valores calculados da distribuição de corrente no sistema trifásico subterrâneo e nos loops de compensação.	38
Figura 3.4 - Fluxograma do acoplamento termo-magnético do problema de blindagem do campo magnético de baixa frequência. Adaptado de [30].	42
Figura 3.5 - Perfil do campo magnético gerado por uma linha subterrânea calculado analiticamente e pelo COMSOL.	44
Figura 3.6 - Distribuição de calor no caso simplificado (sem o acoplamento dos problemas térmico e magnético).	47
Figura 3.7 - Distribuição de calor no caso completo (com o acoplamento dos problemas térmico e magnético).	47
Figura 3.8 - Disposição dos quatro circuitos do arranjo experimental com os respectivos cortes transversais e geometrias. Adaptada de [38].	49
Figura 3.9 - Comparação entre os FR medidos e simulados para a chapa em “H”, loops passivos e canaleta.	50
Figura 3.10 - Perfis de campo calculados para os trechos da referência, da configuração aberta da chapa em “H”, da blindagem com loops passivos de compensação e da canaleta fechada.	51
Figura 4.1 - Visão transversal da disposição dos cabos subterrâneos em um trecho convencional no estudo de caso realizado.	53
Figura 4.2 - Domínio modelado em duas dimensões (2D) para a representação do sistema subterrâneo.	53
Figura 4.3 - Posicionamento dos cabos e distribuição da densidade de campo magnético nos quatro casos: (a) arranjo planar horizontal com cabos espaçados em 30 centímetros, (b) arranjo planar horizontal com os cabos se tocando, (c) arranjo triangular com os cabos espaçados em 30 centímetros e (d) arranjo triangular com os cabos se tocando.	55
Figura 4.4 - Perfis de campo calculados para os arranjos: planar horizontal com cabos espaçados em 30 centímetros, planar horizontal com os cabos se tocando, triangular com os cabos espaçados em 30 centímetros e triangular com os cabos se tocando.	56

Figura 4.5 - Distribuição da temperatura nos quatro casos: (a) arranjo planar horizontal com cabos espaçados em 30 centímetros, (b) arranjo planar horizontal com os cabos se tocando, (c) arranjo triangular com os cabos espaçados em 30 centímetros e (d) arranjo triangular com os cabos se tocando.	57
Figura 4.6 - Posicionamento das fases e distribuição da densidade de fluxo magnético para os circuitos duplos: (a) Caso 1 – disposição convencional das fases e (b) Caso 2 – melhor posicionamento das fases.	58
Figura 4.7 - Perfis de campo calculados para os circuitos duplos: Caso 1 e Caso 2.....	59
Figura 4.8 - Posicionamento das condutores subterrâneos na caixa de emendas: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) distribuição da temperatura.	60
Figura 4.9 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional (espaçamento de 30 centímetros) e para a caixa de emendas (espaçamento de 75 centímetros).....	60
Figura 4.10 - Posicionamento dos loops e distribuição da densidade de fluxo magnético das blindagens com laços de compensação de baixo acoplamento: (a) 1 loop e (b) 4 loops.....	63
Figura 4.11 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para os loops com baixo acoplamento com 1 e 4 loops.	63
Figura 4.12 - Distribuição da densidade de corrente nos arranjos de loops passivos com baixo acoplamento: (a) 1 loop e (b) 4 loops.....	64
Figura 4.13 - Distribuição da temperatura nos arranjos de loops passivos com baixo acoplamento: (a) 1 loop e (b) 4 loops.	65
Figura 4.14 - Diagrama do arranjo com alto acoplamento para a distância “H” dos loops para os cabos de alta tensão. Retirada de [5].	66
Figura 4.15 - Posicionamento dos loops e distribuição da densidade de fluxo magnético das blindagens com laços de compensação de alto acoplamento: (a) Configuração 1 (FA: 90%) e (b) Configuração 2 (FA: 70%).....	67
Figura 4.16 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para os loops com alto acoplamento: Configuração 1 (FA: 90%) e Configuração 2 (FA: 70%).67	67
Figura 4.17 - Distribuição da temperatura nos arranjos de loops passivos com alto acoplamento: (a) Configuração 1 (FA: 90%) e (b) Configuração 2 (FA: 70%).	68
Figura 4.18 - High Magnetic Coupling Passive Loop: (a) posicionamento dos loops no entorno da fase e (b) fotografia da montagem. Adaptada de [18].	69
Figura 4.19 - Fotografia da montagem da blindagem HMCPL realizada no LEAT da UFMG. 70	70
Figura 4.20 - Disposição dos loops na montagem da blindagem do HMCPL realizada no LEAT.	70
Figura 4.21 - Posicionamento dos loops e distribuição da densidade de fluxo magnético das blindagens HMCPL.....	71
Figura 4.22 - Comparação dos perfil de campo do HMCPL com os perfis de campo calculados para as outros blindagens de loops com alto acoplamento.....	72
Figura 4.23 - Distribuição da temperatura no arranjo HMCPL.	72
Figura 4.24 - Fatores de redução calculados para os loops de compensação com baixo e alto acoplamento.	73
Figura 4.25 - Perda na capacidade de transmissão de potência calculada para os loops de compensação com baixo e alto acoplamento.	74
Figura 4.26 - Curva B x H do aço SAE 1018. Dados fornecidos pelo COMSOL.	76
Figura 4.27 - Dimensões das blindagens abertas estudadas: (a) chapa plana, (b) chapa em “U” invertido e (c) chapa em “H”.....	77
Figura 4.28 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para o uso da chapa plana de cobre e de alumínio.	78
Figura 4.29 - Blindagem com chapa plana de alumínio: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.....	78

Figura 4.30 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem com chapa plana: (a) alumínio e (b) cobre.	79
Figura 4.31 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para o uso da chapa de cobre e de alumínio em “U” invertido.	80
Figura 4.32 - Blindagem com chapa de cobre em “U” invertido: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.	80
Figura 4.33 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem com chapa em “U” invertido: (a) alumínio e (b) cobre.	81
Figura 4.34 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para o uso da chapa de cobre e de alumínio em “H”.	82
Figura 4.35 - Blindagem com chapa de alumínio em “H”: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.	83
Figura 4.36 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem com chapa em “H”: (a) alumínio e (b) cobre.	84
Figura 4.37 - Dimensão das blindagens fechadas estudadas: (a) canaleta e (b) tubo.	85
Figura 4.38 - Distribuição da densidade do fluxo magnético na presença das blindagens fechadas: (a) canaleta e (b) tubo.	86
Figura 4.39 - Perfis de campo magnético calculado para o sistema subterrâneo no arranjo triangular sem blindagem e para o uso da canaleta e do tubo.	86
Figura 4.40 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem fechada de aço SAE 1018: (a) canaleta e (b) tubo.	88
Figura 4.41 - Fatores de redução calculados para as blindagens metálicas com configurações aberta e fechada.	88
Figura 4.42 - Perda na capacidade de transmissão de potência para as blindagens metálicas com configurações aberta e fechada.	90
Figura 4.43 - Posicionamento do sistema de blindagem composto por loops com baixo acoplamento e por chapa plana: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.	91
Figura 4.44 - Posicionamento do sistema de blindagem composto por loops com alto acoplamento e por chapa plana: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.	92
Figura 4.45 - Perfis de campo magnético calculados para o sistema subterrâneo no arranjo triangular sem blindagem e para as combinações das técnicas de mitigação de loops de compensação e chapa plana.	92
Figura 4.46 - Distribuição da temperatura na presença do sistema de blindagem formado por combinações das técnicas: (a) loops de baixo acoplamento e chapa plana e (b) loops de alto acoplamento e chapa plana.	93
Figura 4.47 - Distribuição da densidade do fluxo magnético no entorno do sistema de blindagem: (a) chapa em “H” e (b) loops de alto acoplamento e chapa plana.	95
Figura 4.48 - Perfis de campo calculados para a blindagem com a chapa “H”, considerando a faixa de interesse ao nível do solo.	96
Figura 4.49 - Perfis de campo calculados para a blindagem com chapa “H”, considerando a faixa de interesse com altura de 1 metro.	97
Figura 4.50 - Perfis de campo calculados para o sistema de blindagem composto pelos loops de alto acoplamento e pela chapa plana, considerando a faixa de interesse ao nível do solo.	97
Figura 4.51 - Perfis de campo calculados para o sistema de blindagem composto pelos loops de alto acoplamento e pela chapa plana, considerando a faixa de interesse com altura de 1 metro.	98
Figura 4.52 - Distribuição das linhas de campo magnético nas proximidades da blindagem com a chapa “H”: (a) sequência de fase positiva e (b) sequência de fase negativa.	98
Figura 4.53 - Distribuição das linhas de campo magnético nas proximidades da blindagem composta pelos loops de compensação e chapa plana: (a) sequência de fase positiva e (b) sequência de fase negativa.	99

Figura 5.1 - Circulação da corrente no condutor com o retorno pela extremidade do domínio 3D. Retirado de [48].	104
Figura 5.2 - Domínio do problema modelado em três dimensões para o sistema subterrâneo no arranjo planar horizontal.	105
Figura 5.3 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema sem blindagem considerando a modelagem em duas (2D) e três (3D) dimensões.	106
Figura 5.4 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético na região de interesse ao longo do comprimento da linha subterrânea no arranjo planar horizontal.	107
Figura 5.5 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema sem blindagem considerando a modelagem em duas (2D) e três (3D) dimensões.	108
Figura 5.6 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético na região de interesse ao longo do comprimento da linha subterrânea no arranjo triangular.	108
Figura 5.7 - Domínio do problema modelado em três dimensões para o sistema subterrâneo com a blindagem infinita da chapa "H".	110
Figura 5.8 - Visão transversal das dimensões das chapas: (a) plana e (b) em "H".	110
Figura 5.9 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema com blindagem da chapa plana e em "H" considerando a modelagem em duas (2D) e três (3D) dimensões.	111
Figura 5.10 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento do trecho subterrâneo na blindagem com chapa plana infinita.	111
Figura 5.11 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento do trecho subterrâneo na blindagem com chapa plana infinita.	112
Figura 5.12 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa plana infinita.	113
Figura 5.13 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa em "H" infinita.	113
Figura 5.14 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}C$) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa plana infinita.	114
Figura 5.15 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}C$) dos condutores o longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa em "H" infinita.	115
Figura 5.16 - Trechos ao longo do comprimento da linha onde foram calculados os perfis de campo para a chapa plana e em "H" com comprimento de 4 metros.	116
Figura 5.17 - Perfis de campo calculados para os três trechos da chapa plana com 4 metros e para a chapa plana infinita.	117
Figura 5.18 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa plana com 4 metros.	117
Figura 5.19 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa plana de 4 metros de comprimento.	118
Figura 5.20 - Perfis de campo calculados para os três trechos da chapa em "H" com 4 metros e para a chapa em "H" infinita.	119
Figura 5.21 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa em "H" com 4 metros.	119
Figura 5.22 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa em "H" de 4 metros de comprimento.	120
Figura 5.23 - Trechos ao longo do comprimento da linha onde foram calculados os perfis de campo para a chapa plana e em "H" com comprimento de 6 metros.	121
Figura 5.24 - Perfis de campo calculados para os quatro trechos da chapa plana com 6 metros e para a chapa plana infinita.	121
Figura 5.25 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa plana com 6 metros.	122
Figura 5.26 - Perfis de campo calculados para os quatro trechos da chapa em "H" com 6 metros e para a chapa plana infinita.	122

Figura 5.27 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa em “H” com 6 metros.	123
Figura 5.28 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa plana de 6 metros de comprimento.	124
Figura 5.29 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa em “H” de 6 metros de comprimento.	124
Figura 5.30 - Vista superior da chapa plana de comprimento “L” e da faixa de interesse na qual foi calculada a densidade de fluxo magnético.	125
Figura 5.31 - Densidade de fluxo magnético calculada na faixa de interesse para as chapas plana com comprimentos de 4, 6, 10, 12 e 15 metros e comprimento infinito.	126
Figura 5.32 - Detalhamento da densidade de fluxo magnético calculada na faixa de interesse para as chapas plana com comprimentos de 4, 6, 10, 12 e 15 metros e comprimento infinito.	126
Figura 5.33 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa plana de 15 metros de comprimento.	128
Figura 5.34 - Perfis de campo calculado no centro das chapas plana com os comprimentos de 4, 6, 10, 12, 15 metros e infinito.	129
Figura 5.35 - Região de interesse junto com a fonte de campo magnético para análise do projeto de blindagem em 3D: (a) vista lateral e (b) vista superior.	130
Figura 5.36 - Distribuição da densidade de fluxo magnético sem a presença do sistema de blindagem.	131
Figura 5.37 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para a blindagem com a chapa plana de 6 metros de comprimento.	131
Figura 5.38 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para a blindagem com a chapa plana de 10 metros de comprimento.	132
Figura 5.39 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para a blindagem com a chapa plana de 12 metros de comprimento.	132
Figura 5.40 - Distribuição da temperatura dos condutores ($^{\circ}C$) ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa plana com 4 metros.	134
Figura 5.41 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}C$) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa plana com 6 metros.	134
Figura 5.42 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}C$) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa em ”H” com 4 metros.	134
Figura 5.43 - Distribuição da temperatura ao longo dos condutores do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa em “H” com 6 metros.	135
Figura 6.1 - Dimensões do sistema de transmissão subterrâneo com a caixa de emendas que foi modelado para o estudo de caso.	139
Figura 6.2 - Domínio modelado em 3D do sistema subterrâneo com a caixa de emendas.	139
Figura 6.3 - Sistema subterrâneo com a caixa de emendas modelado para o estudo de caso. ..	140
Figura 6.4 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo (vista frontal).	140
Figura 6.5 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo (vista lateral).	141
Figura 6.6 - Comparação dos perfis de campo calculados para os problemas 2D e 3D da caixa de emenda do sistema subterrâneo sem a presença de blindagem.	142
Figura 6.7 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}C$) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo com a caixa de emendas e sem a presença da blindagem.	143
Figura 6.8 - Dimensões da blindagem com a chapa plana de alumínio: espessura, largura e distância para o sistema subterrâneo.	144
Figura 6.9 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema 2D da caixa de emendas sem blindagem e com a chapa plana.	145

Figura 6.10 - Vista superior da disposição da chapa plana de alumínio sobre o trecho da caixa de emendas do sistema subterrâneo.	145
Figura 6.11 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo com a presença da chapa plana (vista frontal).	146
Figura 6.12 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo com a presença da chapa plana (vista lateral).	146
Figura 6.13 - Distribuição da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo sem a blindagem.	147
Figura 6.14 - Distribuição da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo com a chapa plana.	147
Figura 6.15 - Distribuição da densidade de corrente (A/m ²) na blindagem da chapa plana de 14 metros de comprimento utilizada no sistema subterrâneo com a caixa de emendas.	148
Figura 6.16 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema 3D da caixa de emendas sem a blindagem e com a chapa plana.	149
Figura 6.17 - Comparação dos perfis de campo calculados para os problemas 3D e 2D da caixa de emendas com a blindagem da chapa plana.	149
Figura 6.18 - Distribuição da temperatura (°C) dos condutores ao longo do comprimento do sistema subterrâneo com a caixa de emendas na presença da blindagem com a chapa plana...	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Limites de exposição à indução magnética para o Brasil e para alguns países que não adotam os parâmetros definidos pela Comissão Internacional de Radiação Não-Ionizante. Retirada de [5].	2
Tabela 3.1 - Comparação dos valores do campo magnético gerado por uma linha subterrânea calculado analiticamente e pelo COMSOL.	44
Tabela 3.2 - Parâmetros construtivos do cabo subterrâneo de alta tensão analisado.	45
Tabela 4.1 - Parâmetros construtivos do cabo de 500 mm ² modelado para representar os loops.	61
Tabela 4.2 - Parâmetros dos materiais utilizados nas blindagens metálicas.	76
Tabela 4.3 - Resumo dos projetos de blindagem em duas dimensões considerando o fator de redução e perda na capacidade de transmissão de potência.	100
Tabela 5.1 - Comparação dos valores da temperatura calculados nos condutores das três fases do sistema subterrâneo (arranjos planar horizontal e triangular) para os problemas em duas e três dimensões.	109
Tabela 5.2 - Comparação dos valores da temperatura calculados nos condutores das três fases do sistema subterrâneo e na blindagem infinita para os problemas em duas e três dimensões.	114
Tabela 5.3 - Comparação dos valores de temperatura calculados nas três fases do sistema subterrâneo e na blindagem considerando as chapas plana e em “H” com 4 e 6 metros de comprimento.	133

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidade	Significado
B	T	Densidade de fluxo magnético
H	A/m	Intensidade de campo magnético
E	V/m	Intensidade de campo elétrico
S	dB	Efetividade da blindagem
A _s	dB	Perda por absorção
R _s	dB	Perda por reflexão
B _s	dB	Fator de correção
μ ₀	H/m	Permeabilidade magnética do vácuo
μ _r	-	Permeabilidade magnética relativa
δ	m	Profundidade de penetração
ω	rad/s	Frequência angular
σ	S/m	Condutividade elétrica do material
t	m	Espessura da blindagem
Z	Ω	Impedância característica
B ₀	T	Densidade de fluxo magnético na ausência do sistema de blindagem
B _m	T	Densidade de fluxo magnético na presença do sistema de blindagem
A	Wb/m	Potencial vetor magnético
J	A/m ²	Densidade de corrente

Símbolo	Unidade	Significado
q	W/m ³	Taxa de calor gerado por unidade de volume
k	W/(m.K)	Condutividade térmica
θ	°C	Temperatura
α	-	Coefficiente de temperatura do material a 20°C
R	Ω/m	Resistência AC do condutor
W _d	W/m	Perda no dielétrico
T ₁	K.m/W	Resistência térmica entre o condutor e a blindagem
T ₂	K.m/W	Resistência térmica entre a blindagem e a armação
T ₃	K.m/W	Resistência térmica da cobertura externa
T ₄	K.m/W	Resistência térmica da região exterior ao cabo
n	-	Número de condutores em cada cabo
λ ₁	-	Fator de perdas da blindagem
λ ₂	-	Fator de perdas da armação metálica
ρ	K.m/W	Resistividade térmica
h	m	Distância da fonte para o sistema de compensação (<i>loop</i>)
I	A	Corrente elétrica
ABC	-	Sequência de fase positiva
ACB	-	Sequência de fase negativa

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviatura	Nome
2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	<i>Boundary Element Method</i> (Método dos Elemento de Fronteira)
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
FA	Fator de acoplamento
FEM	<i>Finite Element Method</i> (Método dos Elementos Finitos)
FDM	<i>Finite Difference Method</i> (Método das Diferenças Finitas)
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i> (Método das Diferenças Finitas no Tempo)
FR	Fator de Redução
GIS	<i>Gas-insulated Substation</i> (Subestação Isolada a Gás)
HMCPL	<i>High Magnetic Coupling Passive Loop</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i> (Comissão Internacional para a Proteção contra as Radiações Não Ionizantes)
IE	<i>Integral Equation</i> (Equações Integrais)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IM	<i>Impedance Method</i> (Método de Impedância)
LEAT	Laboratório de Extra Alta Tensão

Abreviatura **Nome**

MoM *Method of Moment* (Método dos Momentos)

PPGEE Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

UFMG Universidade Federal de Minas Gerais

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivos.....	6
1.3. Organização do Texto.....	7
2. TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE BAIXA FREQUÊNCIA	9
2.1. Introdução	9
2.2. Fundamentos Conceituais de Blindagem.....	9
2.3. Principais Técnicas de Mitigação	13
2.3.1. Rearranjo das Geometrias	15
2.3.2. <i>Loops</i> de Compensação	16
2.3.3. Materiais Metálicos.....	18
2.4. Utilização das Blindagens para as Diferentes Fontes de Campo Magnético de Baixa Frequência	21
2.4.1. Linhas Aéreas	21
2.4.2. Cabos Subterrâneos.....	23
2.4.3. Subestações	26
2.5. Projeto de Blindagem.....	29
2.6. Considerações Finais	32
3. MODELAGEM	33
3.1. Introdução	33
3.2. Modelagem do Problema	33
3.2.1. Problema Magnético	36
3.2.2. Problema Térmico.....	39
3.2.3. Acoplamento Termo-eletromagnético	40
3.3. Validação da Metodologia	43
3.3.1. Comparação entre Soluções Analíticas e Numéricas.....	43
3.3.2. Comparação com Resultados Experimentais.....	48
3.4. Considerações Finais	51
4. PROJETO DE SISTEMAS DE BLINDAGENS: ANÁLISE EM DUAS DIMENSÕES	52
4.1. Introdução	52
4.2. Estudo de Técnicas de Blindagem em 2D	52

4.2.1.	Rearranjo dos Condutores.....	54
4.2.2.	<i>Loops</i> de Compensação	61
4.2.2.1.	<i>Loops</i> com baixo acoplamento	62
4.2.2.2.	<i>Loops</i> com alto acoplamento	65
4.2.2.3.	Fatores de redução e impactos na capacidade de transmissão de potência da linha.....	73
4.2.3.	Blindagem com Materiais Metálicos	75
4.2.3.1.	Configuração aberta	77
4.2.3.2.	Configuração fechada	84
4.2.3.3.	Fatores de redução e impactos na capacidade de transmissão de potência da linha.....	88
4.2.4.	Combinação de Técnicas de Blindagem	90
4.2.5.	Assimetria do Campo Magnético	94
4.3.	Considerações Finais	100
5.	PROJETO DE SISTEMAS DE BLINDAGEM: ANÁLISE EM TRÊS DIMENSÕES	103
5.1.	Introdução	103
5.2.	Validação do Cálculo em 3D	103
5.2.1.	Sem Blindagem.....	105
5.2.2.	Blindagem Infinita	109
5.3.	Estudo de Técnicas de Blindagem em 3D	115
5.3.1.	Chapas de Quatro Metros de Comprimento	116
5.3.2.	Chapas de Seis Metros de Comprimento	120
5.3.3.	Variação do Comprimento da Blindagem.....	124
5.3.4.	Projeto da Blindagem.....	130
5.3.5.	Cálculo Térmico	133
5.4.	Considerações Finais	135
6.	ESTUDO DE CASO.....	138
6.1.	Introdução	138
6.2.	Caixa de Emendas.....	138
6.3.	Projeto do Sistema de Blindagem	143
6.4.	Considerações Finais	151
7.	CONCLUSÕES	153
7.1.	Propostas de Continuidade.....	156
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Os campos elétrico e magnético relacionados ao fornecimento de energia elétrica nas frequências de 50 ou 60 Hz são classificados como de baixa frequência. É cada vez mais comum, principalmente nos grandes centros urbanos, a exposição da população a esses campos. Dessa maneira, observa-se a necessidade dos estudos dos possíveis impactos dessa exposição contínua, sobretudo na saúde de seres vivos ([1], [2], [3] e [4]). Embora estes estudos ainda não tenham chegado a conclusões definitivas, o que dificulta consenso e padronizações, as instituições reguladoras adotam uma postura preventiva, determinando os valores máximos permitidos de exposição.

Muitos países, incluindo o Brasil, adotam como referências os níveis sugeridos pela Comissão Internacional para a Proteção contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) [1]. Cabe ressaltar que alguns países adotam limites mais rigorosos para regiões próximas a áreas consideradas de maior risco (escolas, parques, asilos, hospitais e zonas residenciais), restringindo os limites definidos nas recomendações do ICNIRP.

A Tabela 1.1, retirada de [5], apresenta os valores dos limites de campo adotados atualmente no Brasil e em países que não acompanham as sugestões do ICNIRP. Outros valores dos limites de campo magnético adotados em diferentes países podem ser encontrados em [6].

Analisando os valores listados na Tabela 1.1, observa-se diferenças significativas entre os limites de exposição adotados por cada país. Essas diferenças se devem principalmente à prevenção de possíveis efeitos danosos à saúde humana que ainda não são totalmente conhecidos. Isso faz com que, dentro de um mesmo país, limites distintos de exposição ao campo magnético sejam adotados. Uma revisão acerca dos principais estudos realizados sobre os efeitos à saúde da exposição ao campo magnético de baixa frequência pode ser encontrada em [2].

A não uniformização de critérios e limites poderá levar a alterações futuras nos valores máximos permitidos, o que exigirá o monitoramento dos valores de campo magnético de baixa frequência, principalmente nas proximidades de regiões sensíveis.

Tabela 1.1 - Limites de exposição à indução magnética para o Brasil e para alguns países que não adotam os parâmetros definidos pela Comissão Internacional de Radiação Não-Ionizante. Retirada de [5].

País	Local	Campo Magnético¹ (μT)
Brasil	População em geral ²	200
	População ocupacional ³	1000
Rússia	População em geral	10
	População ocupacional	100
Itália	Para instalações já existentes próximas as áreas de risco	10
	Novas instalações próximas as áreas de risco	3
Suíça	Novas instalações próximas as áreas de risco	1
Holanda	Novas instalações próximas a escolas, parques e zonas frequentadas por crianças	0,4

É importante destacar que, além dos possíveis efeitos danosos à saúde humana, a exposição contínua a esses campos pode ocasionar interferências eletromagnéticas em equipamentos eletrônicos. Essa situação torna-se mais crítica em edificações, tais como hospitais ou consultórios médicos, que possuem equipamentos sensíveis a campos de baixa frequência. Logo, a presença cada vez mais comum desse tipo de equipamento exige que disponibilizem evidências e informações mais assertivas sobre os níveis de campo de baixa frequência no interior das edificações.

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica apresentam-se como uma das principais fontes de campo magnético de baixa frequência. Dessa forma, algumas regiões nas proximidades de linhas de distribuição e transmissão aéreas, de sistemas de

¹ A maioria dos trabalhos que tratam de campos magnéticos fornece os valores dos campos em Tesla (T). Na realidade, a unidade de intensidade de campo magnético, geralmente representado pela letra “H”, é ampere/metro (A/m). A unidade de densidade de fluxo magnético, geralmente representada pela letra “B”, é Tesla no sistema internacional de unidades. Apesar de intensidade de campo e densidade de fluxo serem grandezas diferentes, a literatura em geral, utiliza indistintamente as duas grandezas referindo-se a elas como “valores de campo magnético”. Neste trabalho, a terminologia “campo magnético” está se referindo aos valores de densidade de fluxo magnético (\vec{B}).

² O grupo denominado população em geral consiste nas pessoas que compõem a população de um dado local, região ou cidade, independentemente da faixa etária, que podem ou não estar expostas aos campos elétrico e magnético [1].

³ A população submetida à exposição ocupacional consiste em profissionais treinados, que no exercício de suas atividades laborais relacionadas à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, estão expostos a condições conhecidas [1].

edificações prediais, de cabos subterrâneos e de subestações podem apresentar maiores níveis de campo magnético.

Neste contexto, justifica-se tanto o estudo das fontes de campo magnético de baixa frequência como das técnicas de mitigação que possam ser aplicadas a essas fontes, dentre as quais destacam-se o rearranjo das geometrias, a utilização de *loops* de compensação (ativos ou passivos) e de chapas metálicas (abertas ou fechadas) [7]. No entanto, o uso de cada blindagem dependerá de alguns fatores, dentre eles: as características e a geometria da fonte do campo, a necessidade de atenuação do campo e os possíveis impactos que a instalação desses equipamentos poderá causar no sistema de energia.

Portanto, para definir corretamente a técnica de mitigação a ser utilizada, é necessária uma modelagem capaz de representar as fontes de campo e o sistema de blindagem com grau de fidelidade, ou seja, com as assimetrias que possam existir ao longo do comprimento e as terminações das blindagens.

Este trabalho apresenta a continuidade dos estudos desenvolvidos pelo autor a respeito do tema de técnicas de blindagem do campo magnético de baixa frequência. Dentre esses estudos, destacam-se alguns trabalhos publicados acerca de estudos experimentais das técnicas de mitigação de campo magnético gerado por linhas subterrâneas e a dissertação de mestrado no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFMG cujo o título foi “Projeto Otimizado de *Loops* para a Mitigação do Campo Magnético Gerado por Linhas e Redes Subterrâneas”.

A seguir, são listados em ordem cronológica os trabalhos publicados pelo autor sobre o tema de blindagem do campo magnético de baixa frequência

[2014]

- **D. S. C. Souza;** H. de Paula; I. J. S. Lopes; M. T. A. Êvo; J. O. S. Paulino; C. E. F. Caetano; G. E. Vieira; A. S. Miranda. “Estudo Experimental de Técnicas de Blindagem de Campo Magnético Produzidos por Linhas de Distribuição Subterrâneas de 138 kV”. *In: V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2014, Foz do Iguaçu. Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2014, 2014.

[2015]

- R. O. C. Moreira; **D. S. C. Souza**; M. T. A. Êvo; C. E. F. Caetano; H. de Paula; I. J. S. Lopes. “Avaliação Teórico-Experimental de Sistemas de Blindagem de Campos Magnéticos nas Proximidades de Linhas Subterrâneas”. *In: 16o Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré*, 2015, Puerto Iguazú, Argentina. Anais do 16o Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, 2015.

[2016]

- **D. S. C. Souza**; H. de Paula; I. J. S. Lopes; M. T. A. Êvo. “Modelagem e análise de loops para a mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas”. *In: XII Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2016, Porto Alegre. Anais do XII Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2016.
- **D. S. C. Souza**; H. de Paula; I. J. S. Lopes; M. T. A. Êvo. “Otimização de loops para a mitigação do campo magnético gerado por linhas e redes subterrâneas”. *In: XII Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo*, 2016, Porto Alegre. Anais do XII Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2016.
- R. O. C. Moreira; **D. S. C. Souza**; H. de Paula; V. C. Costa; I. J. S. Lopes; W. C. Boaventura; J. O. S. Paulino; G. C. Miranda. “Avaliação experimental do impacto térmico de técnicas de mitigação do campo magnético produzido por linhas de distribuição subterrâneas”. *O Setor Elétrico*, v. 1, p. 68-75, 2016. *Trabalho publicado no XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (2015) e selecionado para publicação no periódico.*

[2018]

- **D. S. C. Souza**; C. E. F. Caetano; H. de Paula; I. J. S. Lopes; W. C. Boaventura; J. O. S. Paulino; M. T. A. Êvo. “Experimental Investigation of Magnetic Field Shielding Techniques and Resulting Current Derating of Underground Power Cables”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 54, p. 1146-1154, 2018. *Trabalho publicado no IEEE Industry Applications Society Meeting (IAS) em 2017 e selecionado para publicação no periódico IEEE Transactions on Industry Applications.*
- R. O. C. Moreira; M. T. A. Êvo; **D. S. C. Souza**; C. E. F. Caetano; H. de Paula; I. J. S. Lopes; W. C. Boaventura; J. O. S. Paulino. “Comparative Study between Underground Lines Magnetic Field Shielding Techniques on the Field Reduction

Factor, Line Ampacity and Implementation Costs”. In: *2018 CIGRE Biennial Session*, 2018, Paris. Proceedings of CIGRE Biennial Session 47, 2018. *Trabalho publicado no XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (2017) com o título: “Comparativo entre técnicas de blindagem de campo magnético de linhas subterrâneas quanto ao fator de redução, a perda na ampacidade da linha e os custos financeiros” que foi selecionado para apresentação na Biennial do Cigrè.*

O presente autor iniciou as pesquisas referentes ao tema de blindagem de campo magnético de baixa frequência na participação como estagiário em um Projeto de P&D CEMIG D – ANEEL N° 318, cujo título é “Linhas de Distribuição Subterrânea: Soluções para Mitigação de Interferências Eletromagnéticas e Monitoramento da Integridade do Isolamento, sem Comprometimento da Capacidade de Transmissão de Energia”, fruto de parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O Projeto P&D foi criado para estudar as diferentes configurações de blindagem e a viabilidade dessas alternativas, uma vez que a CEMIG poderia necessitar de aplicar essas técnicas de mitigação para atenuar o campo magnético. Nesse contexto, foram estudadas por meio de simulações e experimentos diferentes técnicas de blindagem para campos originados por linhas subterrâneas.

Durante o Projeto de P&D, o presente autor desenvolveu a pesquisa com a técnica de *loops* de compensação, resultando no ingresso no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGGE) da UFMG para a realização do Mestrado em Engenharia Elétrica. O título da dissertação é “Estudo de técnicas de blindagem do campo magnético gerado por linhas subterrâneas, com o objetivo de otimizar o sistema de blindagem para atenuar o campo sem limitar a corrente de operação da linha”.

Diante do exposto, o presente trabalho busca a partir de uma ferramenta computacional baseada no método de elementos finitos dar prosseguimento aos estudos de projetos de sistemas de blindagem para campos magnéticos de baixa frequência.

1.2. Objetivos

Com base no exposto acima, o objetivo geral desse trabalho foi, a partir de uma modelagem computacional e da realização de estudos experimentais, delinear e avaliar o desempenho de técnicas de mitigação de campo magnético de baixa frequência e, assim, projetar o sistema de blindagem.

Diante do exposto, pode-se definir os seguintes objetivos específicos:

- Utilizar a ferramenta computacional para projetar configurações de blindagem de campo magnético de baixa frequência em modelos simplificados de duas dimensões.
- Validar por experimentação a metodologia de cálculo de campo utilizada para o projeto preliminar das blindagens.
- Aperfeiçoar o modelo computacional para modelar o problema em três dimensões, permitindo representar diferentes fontes de campo e as extremidades do sistema de blindagem a ser projetado.
- Projetar o sistema de blindagem com base nas análises em duas e em três dimensões, considerando o desempenho na atenuação do campo magnético e as alterações no fluxo de calor.

Alcançados os objetivos específicos, torna-se possível a elaboração de projetos de diferentes blindagens de campo de baixa frequência, considerando: a configuração do sistema de mitigação, o tipo de material, as dimensões, o posicionamento, o impacto provocado pela presença da blindagem e outras características importantes. A teoria apresentada no decorrer do presente trabalho será avaliada na elaboração do projeto de blindagem para o trecho de uma caixa de emendas de um sistema de transmissão subterrâneo.

Por tudo isso, o presente trabalho contribui para o estudo das blindagens de campos magnéticos de baixa frequência, na medida em que parte da análise em três dimensões do problema. O estudo em 3D permite a modelagem fidedigna das características construtivas da fonte de campo e do sistema de blindagem, reduzindo as simplificações do problema estudado. Além disso, os resultados obtidos correspondem ao desempenho da blindagem em toda a região de interesse, assemelhando-se assim a realidade.

Em vários estudos de blindagem, a análise do problema é feita a partir da modelagem em duas dimensões. As simplificações existentes na representação do problema 2D, fazem com que o desempenho da blindagem não possa ser analisado em toda região de interesse. Apesar de alguns problemas apresentarem simetria ao longo da extensão longitudinal, necessita-se da modelagem 3D para representar as terminações das blindagens e, conseqüentemente, a variação do desempenho por todo o comprimento.

Além disso, o estudo realizado avalia o impacto térmico da presença da blindagem ao longo dos condutores da fonte de campo. A análise em três dimensões possibilita a determinação dos pontos de aquecimento críticos, permitindo, assim, a avaliação do fluxo de calor no entorno da blindagem e, conseqüentemente, do desempenho térmico.

Logo, a partir da modelagem 3D é possível determinar todos parâmetros construtivos da blindagem e avaliar o desempenho da mesma ao longo de toda a região de interesse, sendo analisado no desempenho o nível de atenuação do campo magnético e o impacto térmico provocado pela presença da blindagem.

Vale ser destacado que o projeto computacional de blindagens para campos magnéticos de baixa frequência apresenta algumas incertezas referentes às propriedades magnéticas dos materiais e às modelagens das características construtivas das fontes de campo e da blindagem. Diante disso, o estudo em três dimensões tem como intuito diminuir essas incertezas e simplificações, que são inerentes da modelagem computacional, possibilitando, assim, o projeto mais assertivo do desempenho da blindagem.

1.3. Organização do Texto

De forma a contemplar os objetivos propostos, o presente documento encontra-se estruturado em sete capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica a respeito das principais técnicas de mitigação de campo magnético de baixa frequência. Além disso, é discutido o emprego de cada uma das blindagens em diferentes instalações de energia, ou seja, fontes de campo, tais como: linhas de distribuição e transmissão aéreas, cabos subterrâneos e subestações.

No Capítulo 3, é apresentada a ferramenta de cálculo computacional utilizada para o projeto de sistemas de blindagem de campo de baixa frequência. Para isto, são detalhadas as metodologias: do cálculo do campo magnético na ausência e na presença da técnica de mitigação e da determinação da distribuição da temperatura na região da fonte de campo e do sistema de blindagem. Além disso, por meio da avaliação do problema da blindagem de cabos de transmissão subterrâneos, são realizadas comparações com resultados experimentais e com valores conhecidos na literatura.

No Capítulo 4, a metodologia proposta é aplicada para o projeto em modelagem 2D de diferentes técnicas de mitigação do campo gerado por cabos subterrâneos. Além da avaliação da eficácia de cada técnica, avalia-se o impacto térmico da utilização dessas blindagens. Os resultados preliminares foram obtidos com o intuito de comparar as diferentes técnicas de redução de campo e embasar os próximos projetos de blindagem modelados em três dimensões.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com a modelagem dos sistemas de blindagens em três dimensões. Com o aprimoramento do modelo computacional foi possível a representação das terminações das blindagens, possibilitando o projeto completo de todas as dimensões do sistema de blindagem, inclusive do comprimento. Para a avaliação do desempenho da técnica de mitigação, foi avaliada a atenuação do campo magnético em toda a região de interesse e o impacto térmico provocado pela utilização da blindagem.

O Capítulo 6 apresenta um estudo de caso do trecho da caixa de emendas de um sistema trifásico de transmissão subterrâneo. O trecho foi modelado com dimensões de um projeto real da região de junção dos cabos subterrâneos, permitindo a aplicação da metodologia de projeto do sistema de blindagem para a análise de um problema prático.

No último capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas a partir do trabalho desenvolvido e as propostas de continuidade da pesquisa.

2. TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE BAIXA FREQUÊNCIA

2.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada inicialmente uma breve revisão a respeito dos fundamentos conceituais da teoria de blindagem de campos eletromagnéticos. A partir disso, são descritas as principais técnicas de mitigação para campos magnéticos de baixa frequência. Além da apresentação dos métodos de blindagem, são discutidas as aplicações de cada uma das técnicas na atenuação da densidade de fluxo magnético gerado pelas principais fontes de campo, a saber: linhas aéreas, cabos subterrâneos e subestações.

2.2. Fundamentos Conceituais de Blindagem

O sistema de blindagem na maioria das vezes é composto por um material metálico posicionado entre duas regiões do espaço [8]. Em termos gerais, a blindagem pode ser posicionada de duas formas: no entorno da fonte de campo eletromagnético, mitigando a interferência da fonte de ruído, ou onde se deseja atenuar o campo, protegendo uma região específica. A maneira de se projetar o sistema de blindagem dependerá das particularidades da situação em que será utilizado e das propriedades do campo eletromagnético.

O campo eletromagnético é determinado pela fonte, pelo meio no entorno da fonte e pela distância entre a fonte e o ponto de interesse. Nas regiões suficientemente próximas à fonte de campo, as propriedades do campo são definidas pelas características da fonte. Essa região é denominada de região de campo próximo. Para regiões afastadas da fonte, denominada de região de campo distante, as propriedades do campo dependem principalmente do meio no qual o campo está sendo propagado. Dessa maneira, a impedância característica da onda eletromagnética é igual à impedância do meio de propagação.

Dependendo das características da fonte, a região de campo próximo é considerada até uma distância de aproximadamente três comprimentos de onda. Para os estudos de blindagem em baixa frequência (50/60 Hz), a região de interesse é sempre uma região de campo próximo, uma vez que, para essa frequência, o comprimento de onda é superior a 5000 quilômetros.

A determinação da efetividade da blindagem é feita a partir da razão do campo na ausência (originado pela fonte) e na presença do sistema de blindagem. Esse parâmetro pode ser determinado a partir de vários métodos de análise da blindagem de campos eletromagnéticos. No presente trabalho é utilizado o método de elementos finitos para o cálculo da densidade de fluxo magnético, permitindo, assim, a avaliação das técnicas de mitigação do campo magnético de baixa frequência. Maiores informações a respeito desse método e da metodologia utilizada são descritas no Capítulo 3.

Dentre os métodos de análise de blindagem, é importante destacar a análise clássica proposta por Schelkunoff [9]. Essa formulação é citada em diversos livros de compatibilidade eletromagnética, [8] e [10], e é utilizada por diversos especialistas. Nesse método, a análise da atenuação do campo é realizada a partir dos fenômenos de reflexão e de absorção do campo eletromagnético pela blindagem.

Ao incidir na superfície de uma blindagem metálica a onda eletromagnética é parcialmente refletida, e a parcela transmitida é atenuada ao atravessar o meio. A soma dessas perdas por reflexão e absorção (ou penetração) resultam na atenuação da onda eletromagnética. Dessa forma, a efetividade da blindagem (S), segundo Schelkunoff, é calculada pela soma em decibéis (dB^4) da perda por absorção (A_s) mais a perda por reflexão (R_s) mais o fator de correção (B_s), que contempla as múltiplas reflexões em blindagens finas. A equação (2.1) descreve o cálculo da efetividade de blindagem [8]:

$$S = A_s + R_s + B_s \text{ dB} \quad (2.1)$$

O fator de absorção representa o decaimento que uma onda eletromagnética tem ao penetrar um determinado material. O campo induz nos materiais correntes parasitas

⁴ O decibel (dB) é uma unidade que indica a proporção da quantidade de uma grandeza física em relação a um nível de referência especificado. No caso de estudos de blindagem, a relação em decibéis é igual a 20 vezes o logaritmo de base 10 da razão entre a intensidade do campo magnético (\vec{H}), ou elétrico (\vec{E}), na ausência e na presença do sistema de blindagem.

que provocam perdas ôhmicas, promovendo assim, a atenuação. A distância requerida para o campo decair em aproximadamente 37% do seu valor inicial é a profundidade de penetração (δ), dada pela equação (2.2):

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}} \quad (2.2)$$

onde ω é a frequência angular de excitação do campo, σ é a condutividade do material e μ_r e μ_0 são as permeabilidades magnéticas relativas e do vácuo, respectivamente. A perda por absorção pode ser dada a partir da seguinte equação [8]:

$$A_s = 8,69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \text{ dB} \quad (2.3)$$

onde t é a espessura da blindagem.

Analisando a equação apresentada para a perda por absorção, pode-se inferir que quanto maior a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica do material maior será a eficiência da blindagem em absorver o campo.

Para a blindagem do campo magnético de baixa frequência, a perda por absorção pode ser considerada desprezível para materiais paramagnéticos e diamagnéticos de pequenas espessuras, como o cobre e o alumínio. No caso de materiais ferromagnéticos com altos valores de permeabilidade magnética, as perdas por absorção podem ocasionar reduções de mais de 50 vezes no valor do campo magnético incidente [11].

A perda por reflexão está relacionada pela diferença entre as impedâncias características dos meios. Uma onda eletromagnética, plana ou não, ao se propagar em um meio com impedância Z_1 e penetrar em outro meio com impedância Z_2 , sofrerá uma reflexão. Para a situação nas quais a espessura da blindagem é suficientemente maior que a profundidade de penetração e a impedância do meio circundante é muito superior ao da blindagem metálica ($Z_1 \gg Z_2$), a perda por reflexão pode ser dada pela equação (2.4) [8]. É importante destacar que as reflexões múltiplas foram desconsideradas na determinação da equação (2.4).

$$R_s = 20 \log \left(\frac{|Z_1|}{4|Z_2|} \right) \text{ dB} \quad (2.4)$$

Os termos Z_1 e Z_2 na equação (2.4) são referentes as impedâncias características do meio circundante e da blindagem metálica, respectivamente.

Vale enfatizar que no estudo de blindagem de campos eletromagnéticos de 50/60 Hz, a região considerada é a de campo próximo. Nessa região, como discutido anteriormente, a impedância do meio não é mais determinante na definição das propriedades do campo, sendo assim, definida pelas características da fonte de campo. Como a perda por reflexão é dada pela razão entre as impedâncias, o conhecimento da natureza da fonte de campo é determinante para o cálculo do coeficiente de reflexão proposto por Schelkunoff [11]. Se a fonte do campo tem alta tensão e baixa corrente, o campo terá alta impedância e, conseqüentemente, maior perda por reflexão. No caso da fonte do campo com baixa tensão e alta corrente, o campo terá baixa impedância e, conseqüentemente, menor perda por reflexão.

O termo B_s na equação (2.1) é referente às perdas por múltiplas reflexões. Em materiais onde a perda por absorção é pequena, uma parcela considerável do campo penetra a blindagem e sofre múltiplas reflexões no interior da mesma. Esse fenômeno deve ser considerado na análise de campos magnéticos. Além disso, o efeito das múltiplas reflexões pode ser ainda mais significativo em blindagens com menor espessura [11].

O fator de correção para a reflexão múltipla de campos magnéticos é dado pela seguinte equação [8]:

$$B_s = 20 \log \left(1 - e^{-2t/\delta} \right) \text{ dB} \quad (2.5)$$

onde t é a espessura da blindagem e δ é a profundidade de penetração.

É interessante destacar que o fator de correção B_s é um número negativo, evidenciando que a menor efetividade acontece em uma blindagem fina devido as múltiplas reflexões.

Maiores informações a respeito do método proposto por Schelkunoff podem ser encontradas em [8] e [10]. No entanto, devido à natureza do problema estudado no presente trabalho ser referente a blindagem de campos magnéticos de baixa frequência, a abordagem utilizada para a análise da efetividade das blindagens não será de Schelkunoff. Logo, no decorrer do presente capítulo, serão descritas e apresentadas com maior

detalhamento as técnicas de mitigação e as fontes de campo magnético de baixa frequência.

2.3. Principais Técnicas de Mitigação

As principais fontes de campo magnético de baixa frequência podem ser divididas em dois grandes grupos: em fontes de baixa tensão, geralmente determinadas por rede de distribuição interna de edifícios, e fontes de média/alta tensão, caracterizadas por linhas de transmissão de energia (aéreas ou subterrâneas) e subestações [12].

Nos sistemas de distribuição prediais, os cabos dispostos em bandejas e canaletas ficam relativamente próximos da região onde pode-se encontrar equipamentos eletrônicos. Dessa maneira, a exposição a esses campos pode causar interferências eletromagnéticas nos equipamentos mais sensíveis e comprometer a sua funcionalidade. Com relação às fontes de campo de alta tensão, podem ser obtidos valores substancialmente elevados de densidade de fluxo magnético no entorno dessas instalações, uma vez que as correntes que circulam nos condutores são de maior intensidade. Logo, além da interferência causada em equipamentos eletrônicos, a exposição contínua a níveis de campo elevados pode ocasionar efeitos danosos à saúde humana. Dessa maneira, faz-se necessário estudos que disponibilizem evidências a respeito das diferentes alternativas de blindagem para atenuação dos campos magnéticos de baixa frequência.

Um dos principais fatores a ser considerado na escolha da técnica de mitigação é o ponto no qual a blindagem será instalada, ou seja, a blindagem será disposta no entorno da fonte de campo ou na região de interesse. Geralmente, para a situação na qual a fonte de campo é bem localizada ou existe uma extensa área de interesse, utiliza-se a blindagem localizada na fonte de campo, como por exemplo, trecho de emendas de cabos subterrâneos. Já para regiões com múltiplas fontes de campo, no caso subestações de energia ou apenas uma região de interesse definida, como uma sala com equipamentos sensíveis, a melhor escolha é a blindagem da região específica. A determinação desse fator afetará a definição de qual técnica de atenuação de campo deverá ser utilizada, sendo então, o tipo de blindagem definido com base na melhor relação custo/benefício para a situação em questão.

Comumente, os principais parâmetros avaliados no desempenho de uma blindagem são a eficácia na atenuação do campo e o custo financeiro. Todavia, outros fatores como a durabilidade e, principalmente, os impactos térmicos que a blindagem pode causar no sistema devem ser avaliados na escolha da técnica de mitigação a ser projetada.

Como apresentado anteriormente, a efetividade ou eficácia da blindagem pode ser quantificada pelo método de Schelkunoff por meio da equação (2.1). Contudo, em virtude do problema de blindagem estudado no presente trabalho ser referente à campos magnéticos de baixa frequência e a região de interesse ser de campo próximo, a efetividade da blindagem será avaliada pela razão do campo magnético na ausência (B_o) e na presença de um sistema de blindagem (B_m).

No presente trabalho, esse parâmetro é denominado de fator de redução (FR) e calculado a partir dos valores das densidades de fluxo magnético. O FR pode ser calculado em um ponto específico (x_o, y_o, z_o), como descrito pela equação (2.6):

$$FR = \frac{B_o(x_o, y_o, z_o)}{B_m(x_o, y_o, z_o)} \quad (2.6)$$

ou em uma faixa ou região de interesse determinada:

$$FR = \frac{\text{máximo}(B_o)}{\text{máximo}(B_m)} \quad (2.7)$$

onde o termo “*máximo*” indica o maior valor do campo magnético obtido na faixa ou região para a situação com e sem o uso de blindagem.

A partir do cálculo ou da medição dos valores de campo, é possível a determinação do fator de redução e, assim, comparar a eficácia proporcionada por diferentes técnicas de mitigação. Dessa forma, o estudo das melhores alternativas de blindagem do campo magnético de baixa frequência pode ser quantificado e, conseqüentemente, melhor avaliado.

Dentre os principais métodos de mitigação do campo podem ser citados: (i) o rearranjo das geometrias (ou reposicionamento) das fontes de campo, (ii) os *loops* de compensação (passivos e ativos) e (iii) a blindagem com materiais metálicos (condutivos e ferromagnéticos).

2.3.1. Rearranjo das Geometrias

O rearranjo das geometrias é uma alternativa que, a partir da reconfiguração do posicionamento das fontes de campo, resulta na diminuição do campo magnético sem a necessidade da inserção de elementos externos. Essa alternativa geralmente é considerada apenas nas etapas iniciais de projeto, sendo mais comumente utilizada no caso do rearranjo dos condutores de uma linha aérea ou subterrânea.

Em [7], são apresentadas as vantagens da alteração do tipo de configuração, espaçamento, posição e da divisão de fases (“*phase splitting*”) na atenuação do campo magnético gerado por linhas de transmissão aéreas e subterrâneas. Para exemplificar os efeitos do rearranjo das geometrias, são apresentados nas Figuras 2.1 e 2.2 os valores da densidade de fluxo magnético no entorno de condutores posicionados no arranjo planar horizontal e no arranjo triangular para os cabos espaçados em 10 e 5 metros, respectivamente.

Vale destacar que, apesar de, na prática, ser mais utilizado o rearranjo de condutores de uma linha ou cabos de energia, a filosofia de reposicionamento das fontes também pode ser empregada na disposição de outras fontes de campo, como em transformadores e equipamentos de alta potência no interior de subestações.

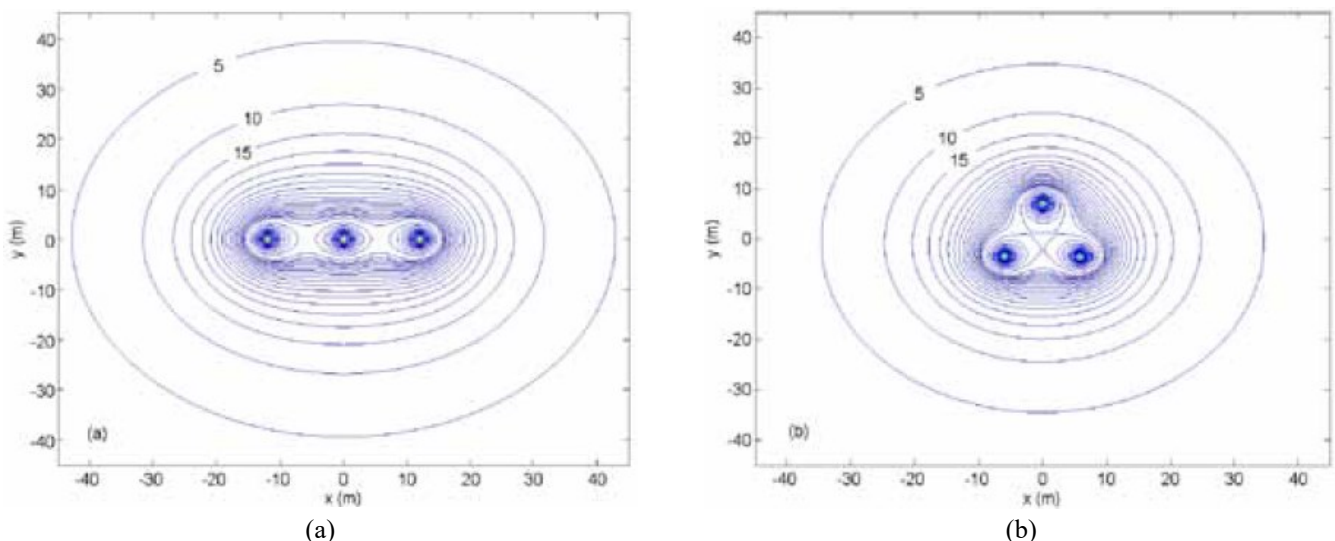


Figura 2.1 - Densidade de fluxo magnético (μT) no entorno de condutores espaçados em 10 metros e com corrente de 2000 A: (a) arranjo planar horizontal e (b) arranjo triangular. Retirada de [7].

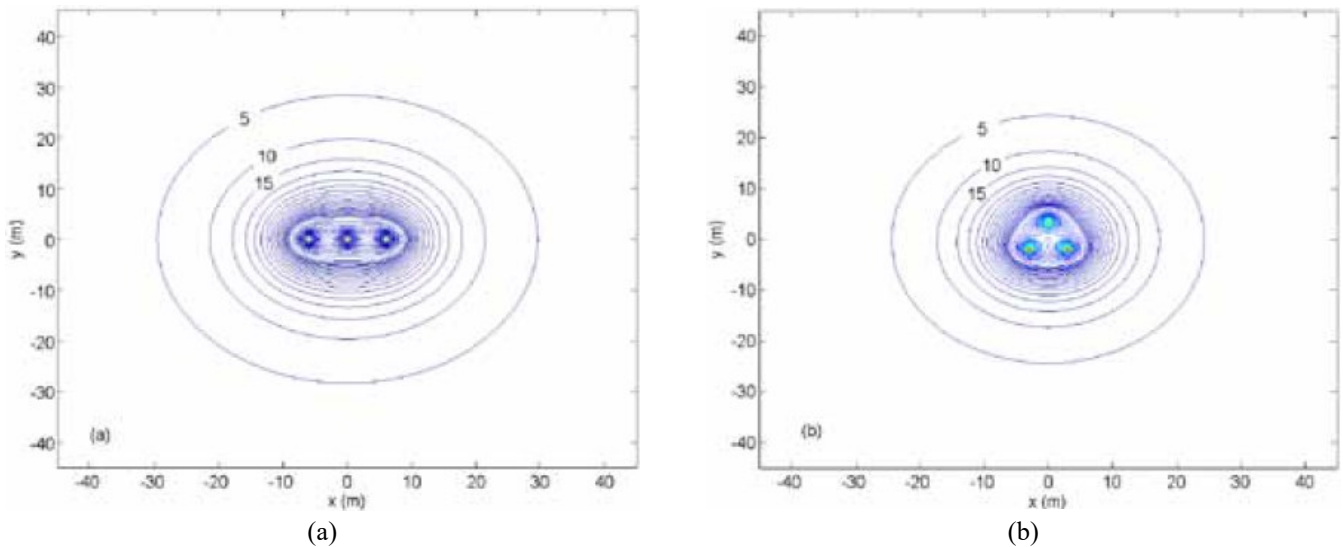


Figura 2.2 - Densidade de fluxo magnético (μT) no entorno de condutores espaçados em 5 metros e com corrente de 2000 A: (a) arranjo planar horizontal e (b) arranjo triangular. Retirada de [7].

2.3.2. *Loops* de Compensação

Nesses sistemas são utilizados condutores curto-circuitados, denominados laços ou *loops*, para formar o circuito de compensação. A circulação da corrente no circuito de compensação irá gerar um campo magnético contrário ao originado pela fonte, reduzindo assim o campo resultante. Os sistemas de compensação por *loops* podem ser definidos como ativos ou passivos.

Na compensação ativa é utilizada uma fonte de potência externa para injeção de corrente nos condutores dos *loops*, como mostrado na Figura 2.3(a). Além disso, é necessário um sistema de controle e monitoramento dos valores da corrente de compensação, possibilitando, assim, níveis elevados de atenuação do campo magnético. No entanto, a utilização da fonte de potência externa e do sistema de controle torna o arranjo mais oneroso e complexo, sendo recomendado para situações específicas com múltiplas fontes de campo, como no caso de blindagem de subestações [13].

Na tentativa de facilitar a utilização dessa técnica, foi apresentado em [14] um protótipo de um *loop* ativo simplificado. No entanto, em virtude do alto custo, a compensação ativa ainda é menos utilizada que os sistemas com *loops* passivos.

Nos sistemas passivos, a corrente de compensação é induzida nos *loops* pela própria fonte de campo magnético, como apresentado na Figura 2.3(b). Dessa forma, a intensidade da corrente e, conseqüentemente, o nível de atenuação são definidos pelos

parâmetros geométricos (configuração e posicionamento) e elétricos dos condutores dos *loops*. Todavia, a redução do campo pela disposição puramente de *loops* passivos apresenta tradicionalmente baixa eficácia no nível de redução de campo.

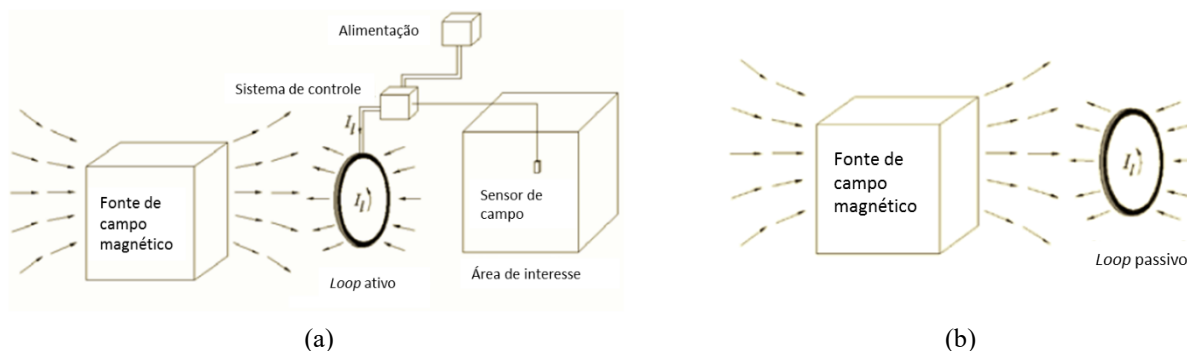


Figura 2.3 - *Loops* de compensação: (a) ativos e (b) passivos. Adaptada de [7].

Em [15] e [16] são apresentados estudos de otimização da configuração dos parâmetros dos *loops* com o intuito de se elevar a eficácia da blindagem em trechos de linha subterrânea e aérea, respectivamente. Nessas situações, podem ser utilizados capacitores para reduzir a reatância indutiva dos circuitos com os *loops*, elevando a corrente no circuito de compensação e, por consequência, a efetividade na mitigação do campo.

Uma outra alternativa, proposta inicialmente em [17], para elevar a eficácia da blindagem com *loops* é a inclusão de um núcleo magnético (transformador de corrente) no circuito. Assim, consegue-se elevar o acoplamento e, conseqüentemente, a corrente de compensação e o nível de atenuação do campo. Mais detalhes a respeito dessa técnica de blindagem de *loops* com alto acoplamento podem ser encontrados em [12]. A Figura 2.4 apresenta um diagrama do sistema de compensação com *loops* de alto acoplamento.

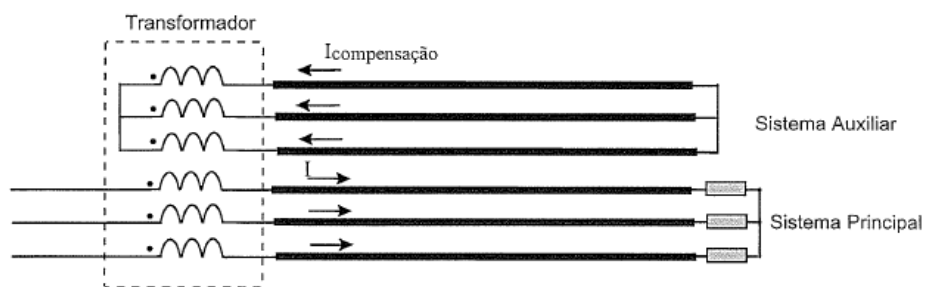


Figura 2.4 - Diagrama do sistema de compensação com *loops* de alto acoplamento. Retirada de [12].

Vale destacar que a técnica de *loops* com alto acoplamento apresenta bons resultados experimentais, com atenuação do campo em aproximadamente 10 vezes, na utilização em trechos de uma caixa de emendas de uma linha subterrânea [18] e [19]. O elevado fator de redução obtido nessa alternativa possibilita a aplicação dos *loops* com os núcleos magnéticos em outras situações críticas de blindagem.

2.3.3. Materiais Metálicos

A utilização de materiais metálicos é uma das técnicas de mitigação mais comumente empregada para a blindagem de campo magnético de baixa frequência, como discutido em diversos trabalhos [20], [21], [22] e [23]. A eficácia dessa técnica está diretamente relacionada às propriedades da condutividade elétrica e permeabilidade magnética do material utilizado. A atenuação do campo é proveniente tanto da circulação de correntes induzidas nas chapas dos materiais condutivos quanto na alteração da distribuição espacial do fluxo magnético entre a fonte geradora e a área de interesse em materiais ferromagnéticos. A Figura 2.5 ilustra a distribuição das linhas de campo nas blindagens com placas ferromagnéticas e placas com condutividade elétrica infinita (condutor elétrico perfeito). Na chapa ferromagnética, as linhas de campo são “atraídas” e chegam perpendiculares à placa, enquanto que na chapa com condutividade elétrica infinita, as linhas são “repelidas” e são tangenciais a placa.

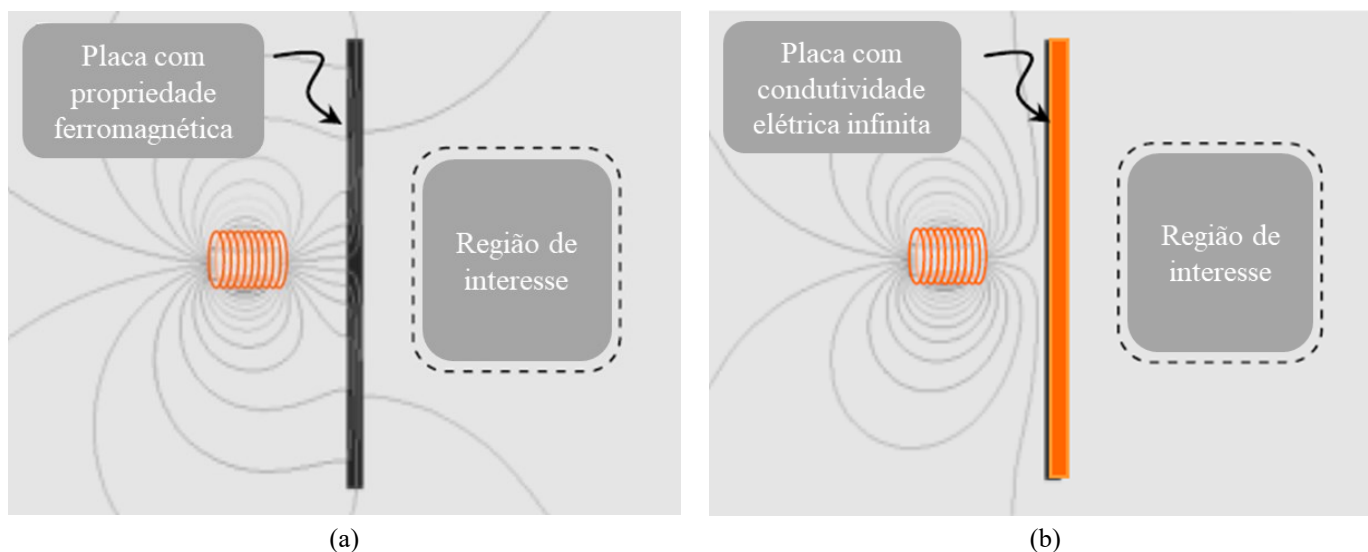


Figura 2.5 - Representação ilustrativa das linhas de campo magnético para a blindagem com chapas metálicas: (a) ferromagnético e (b) condutividade elétrica infinita. Adaptada de [7].

O uso de chapas metálicas possibilita que os materiais condutivos e/ou ferromagnéticos possam ser dispostos no entorno da fonte de campo e na região que necessita ser blindada. Do ponto de vista do uso de material, a blindagem na fonte geralmente apresenta maior conveniência do que na área de interesse. Contudo, para situações nas quais o campo é originado por múltiplas fontes, a blindagem na área de interesse pode se tornar mais viável [23].

Nas blindagens condutivas, são geralmente utilizados materiais com elevada condutividade elétrica, maior que 10 MS/m, sendo o cobre e o alumínio os mais comumente utilizados. A circulação de correntes parasitas no material condutor produz um campo magnético que se opõe ao campo gerado pela fonte original, atenuando, assim o campo resultante. A Figura 2.6 ilustra as correntes induzidas na blindagem com placas condutivas.

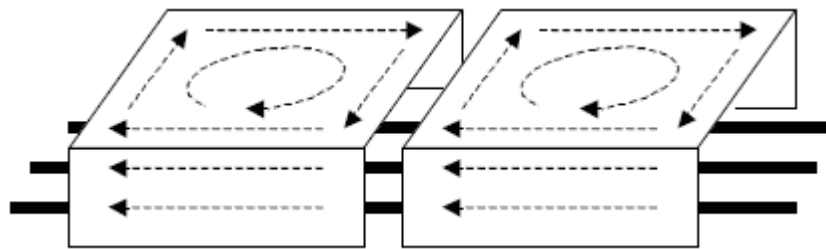


Figura 2.6 - Circulação das correntes induzidas nas chapas condutivas para a blindagem do campo gerado por cabos. Retirada de [7].

As blindagens condutivas podem ter a configuração aberta ou fechada. No entanto, devido às dificuldades de um excelente contato elétrico entre as conexões das chapas, a configuração condutiva fechada é pouco utilizada na prática [7]. A configuração aberta é formada por placas finas que podem ser dispostas em diferentes formatos. Vale ressaltar que, além da condutividade do material, outros parâmetros também influenciam na eficácia dessas blindagens, tais como: o tipo de geometria da configuração das placas, a distância da blindagem até a fonte geradora de campo e as dimensões e a espessura das placas.

A eficácia das blindagens com materiais ferromagnéticos está diretamente relacionada à permeabilidade magnética do material e às dimensões da blindagem. É importante destacar que os materiais ferromagnéticos apresentam o comportamento não

linear na sua curva de magnetização. Dessa forma, torna-se necessário conhecer essa curva do material utilizado para a determinação correta da eficiência da blindagem ainda na etapa de projeto. Esse parâmetro depende da intensidade do campo magnético no ponto analisado, geralmente na ordem de “mT” para os estudos de blindagem de campo de baixa frequência. Normalmente, os fabricantes fornecem informações apenas para valores de densidade de fluxo na ordem de Tesla, não descrevendo, assim, os níveis de campo nas proximidades das intensidades de interesse.

De forma similar às blindagens com materiais condutivos, as blindagens ferromagnéticas podem ser do tipo aberta ou fechada. Na configuração fechada, devido ao fluxo magnético estar “confinado” em um caminho fechado, pode ser obtido um maior nível de atenuação do campo magnético. Já as configurações abertas, em muitas situações apresentam uma menor eficácia na comparação com as blindagens condutivas abertas. Isso pode ser explicado pelo fato dos materiais ferromagnéticos apresentarem condutividade elétrica inferior aos materiais condutivos e, conseqüentemente, as correntes induzidas contribuem menos na atenuação do campo magnético.

É importante ressaltar que estudos de blindagem de campos gerados por linhas áreas e subterrâneas geralmente consideram o sistema operando com correntes balanceadas. Todavia, em decorrência de cargas desbalanceadas, faltas e outros fatores, o sistema de transmissão pode operar com correntes desequilibradas. Neste caso, a eficácia da blindagem pode ser alterada, reduzindo a capacidade de mitigação das blindagens, como descrito em [7], [24] e [25]. Resumidamente, a queda de rendimento pode ser creditada ao campo gerado pela corrente de sequência zero que não é mitigado, afetando, assim, tanto as blindagens metálicas com configurações abertas e fechadas como os *loops* de compensação passivos.

Por fim, vale ser destacado que a presença de um sistema de blindagem (*loops* de compensação ou chapas metálicas) e o reposicionamento das fontes de campo podem afetar a distribuição de calor na região. Dessa forma, é importante a avaliação do impacto térmico na escolha da técnica de mitigação a ser utilizada. Essa análise é de fundamental importância no projeto das blindagens utilizadas para atenuar o campo magnético gerado por cabos subterrâneos, uma vez que a presença da blindagem no entorno desses circuitos pode proporcionar uma elevação adicional de temperatura nos cabos, reduzindo, assim, a sua capacidade de transmissão de corrente. Os trabalhos [20] e [26] analisam as relações de compromisso das eficácias das blindagens e seus respectivos impactos térmicos nos

cabos subterrâneos. Por mais que as pesquisas mais recentes apresentem esse estudo do impacto térmico das blindagens utilizadas em cabos subterrâneos, análises similares da distribuição do calor devem ser realizadas para as diferentes fontes de campo magnético, uma vez que a elevação de temperatura pode impactar a capacidade de transmissão de corrente do condutor ou causar uma redução no tempo de vida útil de um determinado equipamento.

2.4. Utilização das Blindagens para as Diferentes Fontes de Campo Magnético de Baixa Frequência

Nessa seção, são discutidas as principais aplicações das técnicas de mitigação nas principais fontes de campo magnético de baixa frequência. Na maior parte das situações analisadas, foi adotada a estratégia de blindagem da fonte do campo e não da área de interesse. No entanto, vale lembrar que, para algumas aplicações da blindagem, a atenuação do campo na área de interesse pode apresentar melhor custo benefício.

As instalações de energia geradoras de campo consideradas foram:

- linhas aéreas;
- cabos subterrâneos e
- subestações.

2.4.1. Linhas Aéreas

O campo magnético gerado por linhas aéreas guarda relação com as correntes que circulam nas fases, a distância até a linha, o espaçamento entre os condutores e a geometria dos cabos aéreos. Na tentativa de reduzir o campo magnético, a diminuição da corrente geralmente acarreta a redução da potência transmitida, a menos que ocorra um aumento na tensão da linha, inviabilizando esse tipo de alternativa.

Similarmente, é muitas vezes complicado ou até mesmo inviável, aumentar a distância até a linha por meio de modificações no trecho da linha. Dessa forma, devem ser investigadas técnicas de mitigação que possibilitem obter o resultado de atenuação desejado sem o comprometimento da confiabilidade e da segurança do sistema elétrico

[7]. As técnicas mais recomendadas para a redução do campo gerado por linhas aéreas são o rearranjo dos condutores, incluindo a divisão dos condutores das fases, e o uso de circuitos de compensação passivos ou ativos.

No rearranjo dos condutores, pode-se alterar tanto o espaçamento entre as fases como modificar o tipo de geometria do circuito. A redução do espaçamento, ou seja, a compactação do circuito, reduz o campo magnético resultante. No entanto, a mudança na disposição dos condutores pode ocasionar alterações em outros parâmetros utilizados para definir a largura da faixa de servidão de uma linha de transmissão. Dessa forma, para a escolha do rearranjo dos condutores, deve-se analisar o efeito esperado no campo magnético e nos parâmetros que determinam a faixa de servidão, sendo eles: campo elétrico, ruído audível, radio interferência e balanço dos condutores.

Para mitigação do campo gerado por linhas aéreas com múltiplos circuitos, é possível uma disposição ótima entre as fases dos diferentes circuitos. No caso de linhas de circuito duplo, com a mesma amplitude e direção da corrente em ambos os circuitos, a inversão das fases é a maneira mais eficaz de reduzir o campo [7]. Todavia, a melhor disposição dependerá do número de circuitos e do posicionamento dos condutores, sendo necessária análise específica para cada situação.

Uma outra possibilidade para a redução do campo gerado por linhas aéreas é a divisão de fases. A fundamentação dessa técnica é a divisão das fases em múltiplos condutores, o que possibilita uma reorganização ótima desse novo circuito. Por exemplo, para o circuito trifásico, geralmente são divididas duas fases em um número maior de condutores, dispostos de maneira simétrica no entorno da terceira fase [7]. O pressuposto é semelhante ao apresentado no reposicionamento das fases em circuitos múltiplos. No entanto, o custo elevado e a dificuldade de manutenção tornam essa alternativa raramente utilizada [27].

É importante destacar que a alternativa de rearranjo dos condutores geralmente é considerada nas etapas iniciais do projeto de uma linha de transmissão e distribuição aérea. Nesta etapa, o custo adicional do posicionamento dos condutores ou da alteração na geometria da torre não são tão expressivos comparados às situações em que toda estrutura da linha já está construída. Para o caso de redução do campo magnético de uma linha em operação, é recomendada a utilização de sistemas de compensação com *loops* passivos ou ativos.

A blindagem por *loops* de compensação é mais recomendada para a atenuação do campo magnéticos em trechos específicos da linha aérea, pois a utilização em todo comprimento da linha pode elevar muito o custo do sistema de blindagem. Para aumentar a eficácia dessa técnica, são otimizados alguns parâmetros do sistema de compensação: posicionamento dos *loops*, geometria do arranjo e os equipamentos utilizados para elevar a corrente de compensação.

Em [16], é apresentado um estudo de otimização para elevar a atenuação proporcionada por este método, sendo definidos nesse estudo o posicionamento dos *loops* e os capacitores de compensação. Outra alternativa é a utilização de transformadores de corrente (núcleos magnéticos) para acoplar os *loops* com a linha aérea, como detalhado em [12]. De modo semelhante aos capacitores, o fator de acoplamento (razão entre as intensidades das correntes de compensação e do sistema trifásico) proporcionado pelo transformador de corrente (TC) também pode ser otimizado para a determinação de uma configuração ótima de *loops* passivos. Em [28], devido a uma parcela da corrente do raio fluir pelos condutores dos *loops*, discutiu-se a vantagem da redução do número de eventos de “*backflashover*” nos condutores principais da linha aérea.

Na blindagem de linhas de transmissão aéreas, devido à faixa de servidão, a região de interesse geralmente está afastada lateralmente da fonte do campo. Dessa forma, a técnica a ser utilizada tem que resultar em uma atenuação do campo nesse ponto distante e não apenas nas proximidades da fonte de campo. No caso das redes de distribuição internas em edifícios e, até mesmo de linhas de distribuição de tensões mais baixas, a fonte de campo se encontra relativamente bem mais próxima de seres humanos ou de equipamentos eletrônicos. Assim, nessas situações, a blindagem a ser utilizada deverá atenuar o campo no entorno da fonte ou então ser disposta de forma a blindar a região de interesse.

2.4.2. Cabos Subterrâneos

Os cabos subterrâneos, por estarem mais próximos da superfície do solo, produzem maiores níveis de campo em comparação com as linhas aéreas de mesmo porte. Além disso, os cabos subterrâneos encontram-se enterrados nas cidades, resultando, em exposição constante e imperceptível da população aos campos magnéticos de baixa frequência. Para agravar o problema da exposição, a utilização de cabos subterrâneos tem

se tornado cada vez mais presente com o adensamento de carga dos grandes centros urbanos [29].

Tendo em conta estas questões, vêm sendo realizados diversos estudos sobre técnicas de blindagem para campos magnéticos gerados por cabos subterrâneos, destacando-se o Projeto de P&D CEMIG D – ANEEL N° 318, “Linhas de Distribuição Subterrânea: Soluções para Mitigação de Interferências Eletromagnéticas e Monitoramento da Integridade do Isolamento, sem Comprometimento da Capacidade de Transmissão de Energia”, fruto de parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG).

Durante o desenvolvimento do referido projeto, foram desenvolvidas duas dissertações de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFMG com o tema de blindagem de cabos subterrâneos. Em [30] foi apresentado um estudo de diferentes técnicas de mitigação, analisando os efeitos na eficiência da blindagem e no impacto na capacidade de transmissão da corrente da linha subterrânea.

Outro estudo com a temática de otimização para o projeto de *loops* de compensação foi desenvolvido em [5] e corresponde à dissertação de mestrado do autor. Nesse estudo, foram projetados os sistemas de blindagem avaliados nos seguintes aspectos: eficácia na atenuação do campo, impacto na ampacidade da linha e custo financeiro do material utilizado. Composto esse trabalho, foi apresentada uma revisão bibliográfica das principais técnicas de mitigação de linhas subterrâneas. É importante ser destacado que, como descrito no Capítulo 1, o presente trabalho corresponde à continuidade dos estudos das técnicas blindagem do campo magnético de baixa frequência, sendo analisadas de forma mais completa as características das fontes de campo e dos sistemas de blindagem.

No sistema de transmissão subterrâneo, uma das regiões consideradas mais críticas do ponto de vista eletromagnético é a região de conexão dos cabos, denominada de caixa de emendas [18]. Nesse trecho, em decorrência do tamanho das emendas realizadas e da necessidade de se garantir o isolamento entre os condutores, o espaçamento entre os cabos é maior, resultando em um campo magnético mais elevado comparado a um trecho típico de linha. Logo, faz-se necessária a utilização de técnicas de redução específicas, como os *loops* de compensação. A blindagem pode ser realizada

tanto pela disposição de vários laços de condutores no entorno dos cabos subterrâneos como no acoplamento dos *loops* com a fase a partir de um núcleo magnético [19].

Além da técnica dos *loops* de compensação, as blindagens de materiais metálicos e, até mesmo, o rearranjo dos condutores, podem ser alternativas para a atenuação do campo magnético gerado por cabos e redes subterrâneas. No que tange a técnica do rearranjo dos condutores, pode-se inferir que os princípios de aplicação, além das vantagens e desvantagens, são semelhantes às análises feitas para a blindagem de linhas aéreas.

A utilização de materiais metálicos é uma das principais alternativas para a redução do campo magnético de baixa frequência, sendo empregadas configurações do tipo aberta ou fechada. Para a blindagem com configurações abertas, é mais recomendada a utilização de materiais condutivos, sendo cobre e alumínio os mais comumente utilizados. A partir da disposição das chapas condutivas, são formadas diferentes configurações para as blindagens (plana, “U” invertido e em “H”). Normalmente, as placas são enterradas acima dos cabos subterrâneos para promover a atenuação do campo na superfície do solo.

O formato do arranjo, o material utilizado, a espessura e a dimensão de cada chapa e a distância para a fase, são os principais parâmetros que influenciam diretamente na eficiência da blindagem e devem ser avaliados na fase de projeto de blindagem com chapas condutivas. Mais detalhes acerca da influência desses fatores podem ser encontrados no estudo apresentado em [30].

Nas configurações fechadas, é mais efetiva a utilização de materiais com propriedades ferromagnéticas. Esse tipo de técnica de blindagem é recomendado para situações onde é necessária uma mitigação elevada do campo magnético. Para isso, os cabos subterrâneos são confinados no interior de tubos ou canaletas fechadas no formato de “U”, possibilitando, assim, atenuações do campo de aproximadamente 20 vezes [30].

Por fim, é interessante ressaltar que, para as blindagens metálicas de características condutiva ou ferromagnética, o bom contato elétrico entre as chapas é de fundamental importância para o nível de atenuação do campo, principalmente com relação à melhora na circulação das correntes induzidas no material metálico.

2.4.3. Subestações

O crescimento da demanda de energia elétrica também acarreta no aumento do número de subestações, tanto de grande porte quanto de menor capacidade, localizadas no interior de edificações. Nessas instalações, são encontradas diferentes fontes de campo de baixa frequência, como transformadores de potência e barramentos, além das entradas/saídas de cabos que conectam aos sistemas de transmissão e distribuição. Dessa forma, torna-se mandatório o estudo dos níveis de campo magnético no interior e no entorno das subestações, uma vez que estas instalações podem estar construídas nas proximidades de áreas residenciais ou no entorno de áreas com circulação frequente de pessoas. Ainda nesse âmbito, para se otimizar os espaços ocupados por subestações, prédios com instalações compactas têm compartilhado, com frequência, a área comercial e residencial, com possível aumento dos níveis de campo nessas regiões.

Alguns trabalhos [22], [31], [32], [33] e [34] apresentam medições de campo eletromagnético nas proximidades de diferentes tipos de subestações. Os resultados evidenciam que os valores comumente encontrados são inferiores aos estabelecidos pelo ICNIRP. Para ancorar esta afirmação, [34] apresentou um estudo da medição e cálculo do campo elétrico e magnético na subestação Betim 5 da CEMIG, mais especificamente no pátio de 138 kV. O máximo do campo magnético medido em um dia normal de operação foi de 9 μT para um ponto a altura de 1,5 metros do nível do solo e nas proximidades dos barramentos de 138 kV.

Para avaliação da capacidade máxima de carga (potência máxima que a linha pode fornecer), o valor do campo magnético foi calculado em aproximadamente 56 μT e, mesmo nessa condição, o valor foi inferior ao limite estabelecido pelo ICNIRP. Todavia, dependendo do tipo de região no entorno da subestação e, conseqüentemente, de uma redução dos valores limites regulamentados pelas normas, torna-se necessária a blindagem do campo nas proximidades desses ambientes, como apresentado nos trabalhos de blindagem de subestações [7], [13], [22] e [23].

O estudo do campo magnético no interior de subestações apresenta algumas diferenças com relação às fontes de campo descritas anteriormente nessa seção (linhas aéreas e cabos subterrâneos), implicando em modificações nas técnicas de blindagem utilizadas. Essas diferenças se devem ao fato do campo magnético no interior de uma subestação ser gerado por múltiplas fontes com diferentes amplitudes e fases. Além disso,

a complexidade da disposição das fontes e, em alguns casos, a proximidade de regiões com a presença de pessoas ou de equipamentos eletrônicos sensíveis, pode dificultar a blindagem de subestações.

Em virtude da maior proximidade, as subestações de distribuição são consideradas mais críticas com relação a intensidade de campo [7], na comparação com subestações elevadoras ou abaixadoras de alta tensão que se encontram mais afastadas de áreas com intensa circulação de pessoas. Do mesmo modo, as subestações localizadas no interior de construções podem apresentar situações ainda mais críticas em decorrência da proximidade de áreas onde pessoas vivem ou permanecem por longos períodos de tempo. A Figura 2.7 ilustra os níveis de campo e o posicionamento de uma subestação instalada no interior da construção.

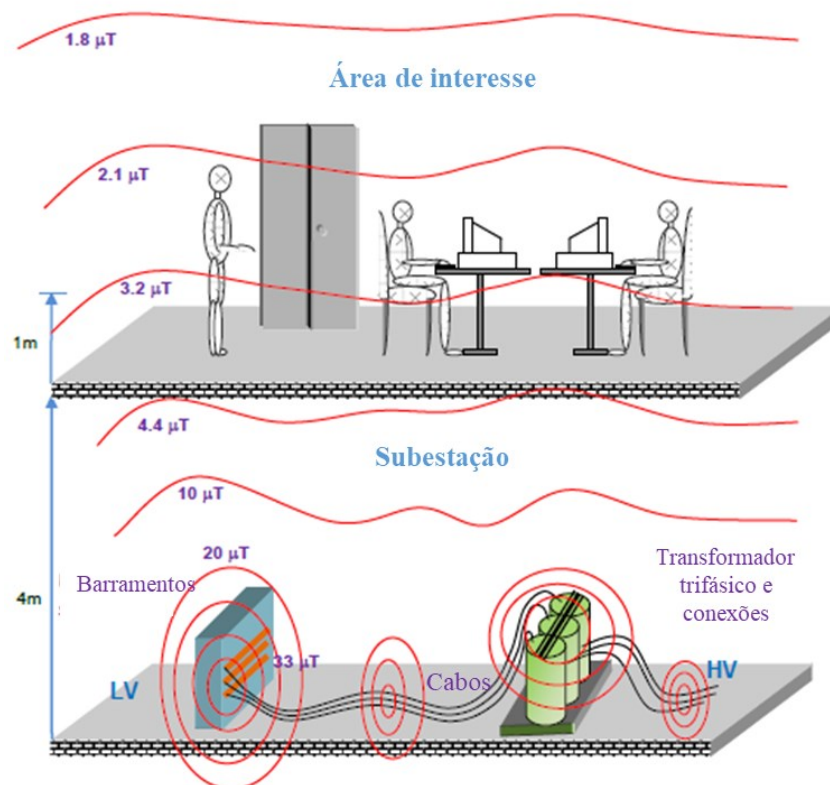


Figura 2.7 - Ilustração dos níveis de campo e do posicionamento de uma subestação construída no interior da edificação. Adaptada de [7].

Com relação às diferentes fontes de campo encontradas no interior de uma subestação, destacam-se: barramentos, transformadores, cabos e conexões dos lados da baixa e da alta tensão. As técnicas de mitigação podem ser utilizadas individualmente em

cada uma dessas fontes ou de maneira global, ou seja, atenuando o campo resultante pela superposição de todas as fontes ou apenas das fontes mais relevantes. Para algumas situações, a blindagem de uma dada região de interesse no entorno da subestação pode se mostrar mais viável que a blindagem de toda uma instalação.

Em [22] é apresentado um caso real de blindagem de um apartamento próximo à subestação, sendo avaliado qual a melhor alternativa: blindagem na fonte (subestação) ou na região de interesse (apartamento). Para a situação analisada, a blindagem nas fontes apresentou os melhores resultados de atenuação do campo.

Os barramentos não isolados são as principais fontes de campo magnético, sendo os localizados no lado de baixa tensão os mais críticos na análise do campo magnético. Isso se deve ao fato desses dispositivos carregarem as correntes de maior intensidade, podendo transmitir correntes na ordem de centenas de ampères [7]. Para a blindagem do campo gerado pelos barramentos, podem ser utilizadas chapas metálicas, *loops* de compensação e, até mesmo uma combinação dessas técnicas para obter maiores níveis de atenuação do campo.

Em [35] é apresentada uma técnica mais elaborada de blindagem na qual foram utilizados uma chapa de aço SAE 1010, uma chapa de alumínio e um sistema ativo de compensação por *loops*. Com essa configuração, foi possível obter uma atenuação aproximada de 20 vezes, consideravelmente superior aos fatores de redução obtidos pela blindagem apenas com *loops* (2 vezes), chapa de aço (4 vezes) e chapa de alumínio (6 vezes).

A intensidade do campo magnético nas proximidades de transformadores pode alcançar valores superiores a 1 mT, especialmente para o caso de transformadores não encapsulados como os transformadores secos [7]. No caso de o transformador estar em um invólucro ferromagnético, por exemplo imerso em óleo, o campo originado será menor devido às bobinas estarem confinadas [7]. Todavia, em virtude das conexões externas no lado de baixa tensão, o campo gerado pelo transformador ainda é significativo, tornando uma das fontes que mais contribuem para o campo no interior da subestação. Sendo assim, graças à efetividade e ao baixo custo, o rearranjo das fases é uma das técnicas de mitigação recomendadas para os transformadores, sendo sugerido o melhor posicionamento no ponto em que os cabos saem do transformador. Além disso, o afastamento das conexões e dos cabos da área de interesse resultam na redução do campo.

Outra alternativa para a blindagem do campo originado por transformadores de potência é a utilização de chapas metálicas: condutivas ou ferromagnéticas. Em [22] são propostas técnicas de mitigação para o campo gerado por equipamentos elétricos de uma subestação de 110/35 kV que fica próxima à área residencial de Belgrado. Nesse trabalho, o campo foi medido no interior dos apartamentos próximos à subestação e discutiu-se a melhor alternativa de blindagem para a situação analisada. A melhor solução proposta foi a blindagem da subestação com chapas metálicas, com resultados alcançando fatores de redução de até 10 vezes.

Além dos transformadores e dos barramentos, os cabos e as conexões que ligam aos sistemas de distribuição e transmissão são fontes de campo magnético de baixa frequência. Dessa forma, as mesmas análises das técnicas de mitigação apresentadas nas seções da linha aérea e dos cabos subterrâneos podem ser feitas para estas fontes presentes nas subestações.

Devido à compactação, as subestações isoladas a gás (GIS) localizam-se perto de locais urbanos e residenciais. Todavia, a natureza compacta das GIS resulta em menores intensidades de campo na comparação com outras subestações. Apesar disso, a proximidade das GIS de áreas públicas exige que os níveis de campo magnético de baixa frequência ainda sejam investigados. Vale destacar que várias características das GIS (altura dos barramentos, distância do condutor, dentre outras) podem ser otimizadas para proporcionar uma redução do campo originado.

2.5. Projeto de Blindagem

A partir do exposto, pode-se analisar quais os critérios utilizados no projeto de blindagem para o campo magnético de baixa frequência. O sistema de blindagem deverá ser dimensionado para reduzir o campo magnético em uma região específica de interesse até o valor limite estabelecido. As características da região de interesse e os limites de exposição à densidade de fluxo magnético determinam quais técnicas ou combinações de blindagens são recomendadas para cada situação específica.

A definição da técnica de mitigação a ser aplicada também dependerá das propriedades da fonte de campo. Além disso, outro ponto fundamental no projeto é a

escolha do posicionamento da blindagem, podendo ser disposta no entorno da fonte ou na região de interesse.

Na necessidade da atenuação de campos magnéticos originados por linhas aéreas, o uso de *loops* de compensação no entorno das fases apresenta-se como uma solução mais viável que a disposição de materiais metálicos. O uso de chapas poderá ser mais vantajoso para a blindagem de uma região específica que é exposta ao campo originado na rede aérea.

Para a redução do campo no entorno de sistemas de transmissão subterrâneos, a instalação de configurações fechadas como tubos e canaletas pode ser inviável para trechos em operação. Nessa situação, o uso de chapas e *loops* de compensação podem se tornar as soluções com maior facilidade de instalação, uma vez que essas técnicas são colocadas a certa distância dos cabos subterrâneos.

Nas proximidades de uma subestação, em decorrência da presença de múltiplas fontes de campo, pode ser necessária a utilização da combinação de mais de uma técnica de mitigação para conseguir atenuar o campo ao valor desejado. Logo, as características da fonte e da situação específica determinam as melhores alternativas de blindagem, levando em consideração a capacidade de atenuação do campo e a viabilidade da instalação do sistema de blindagem.

A fonte de campo e a blindagem podem ser modeladas em duas e em três dimensões para a análise do problema. A partir das análises dos resultados obtidos nas simulações computacionais, é possível a determinação do projeto do sistema de blindagem para a situação específica.

Diante dos fatores que influenciam no projeto do sistema de blindagem, a modelagem 2D possibilita uma análise preliminar da atenuação do campo magnético e do impacto térmico provocado. O fator de redução calculado no problema 2D apresenta uma estimativa do desempenho da efetividade da blindagem com relação à redução do campo. No entanto, como será discutido no decorrer do presente trabalho, o comprimento da blindagem afeta a o nível de mitigação. Dessa forma, os resultados obtidos a partir da modelagem em duas dimensões devem ser utilizados para estimar alguns parâmetros construtivos da blindagem.

De maneira similar, as simulações do problema 2D possibilitam a análise preliminar da alteração na distribuição de calor provocadas pela presença do sistema de blindagem. Com esse cálculo, determina-se o impacto térmico provocado e os possíveis efeitos na capacidade de transmissão de corrente de linhas aéreas e de cabos subterrâneos. Dependendo do impacto térmico simulado, pode-se inviabilizar a técnica de mitigação.

Logo, apesar das simplificações na representação do problema em duas dimensões, o projeto de sistemas de blindagens permite a definição de alguns parâmetros, como: largura e espessura da chapa, tipo de material utilizado, número de condutores dos *loops* de compensação, fator de acoplamento, dentre outros. As análises preliminares do problema simplificado em 2D são úteis para a definição de características e de alguns parâmetros da blindagem.

Todavia, a análise mais completa do desempenho do sistema de blindagem é obtida apenas por meio da modelagem 3D do problema. A partir da configuração projetada em 2D, o modelo computacional é aprimorado para a representação do problema em três dimensões. Dessa forma, o sistema de blindagem pode ser completamente representado, inclusive com as terminações que afetam a eficiência na atenuação do campo magnético.

Com a modelagem 3D, é possível quantificar o desempenho ao longo de toda a região de interesse, possibilitando a definição de todas as dimensões do sistema de blindagem. Além disso, a simulação 3D permite a avaliação da presença de pontos termicamente críticos que possam impactar a capacidade de corrente e, conseqüentemente, o funcionamento do sistema elétrico de potência.

Em algumas situações específicas nas quais não existe simetria ao longo do comprimento da fonte de campo, como na caixa de emendas ou em trechos com cabos se cruzando, a modelagem 3D é fundamental para a representação das características construtivas da fonte de campo.

Portanto, a partir da modelagem 3D é possível determinar todos os parâmetros construtivos da blindagem e o seu desempenho em toda a região de interesse. Vale ser destacado que a solução a ser adotada para a situação específica dependerá de vários fatores, a saber: nível de atenuação, impacto térmico permitido, restrições construtivas, custos de implementação, dentre outros. Logo, não existe uma solução única e ideal, mas

um conjunto de soluções que poderá ser definido a partir das particularidades do problema em questão.

2.6. Considerações Finais

Esse capítulo apresentou uma descrição dos principais métodos de atenuação do campo magnético de baixa frequência. Foram discutidas as alternativas de mitigação recomendadas para as principais fontes de campo, a saber: linhas aéreas, cabos subterrâneos e subestações. Dessa maneira, pode-se analisar a aplicabilidade de cada uma das técnicas de mitigação às diferentes fontes de campo, avaliando suas vantagens e desvantagens, além de alguns trabalhos disponíveis na literatura referentes à blindagem de campo de baixa frequência.

O foco do presente trabalho é utilizar uma ferramenta computacional para projetar diferentes soluções de mitigação do campo magnético em 50/60 Hz. Com auxílio dessa ferramenta, será possível a modelagem de diferentes tipos de fontes de campo magnético, considerando as características e particularidades. Além disso, o uso da ferramenta possibilita a investigação das técnicas de mitigação do campo magnético, possibilitando a avaliação do desempenho da blindagem a partir da atenuação do campo magnético, e do impacto térmico causado.

Após a revisão sobre as principais técnicas de mitigação, foi realizado um estudo preliminar do desempenho de diferentes blindagens para o campo gerado por cabos subterrâneos. Em virtude dos trabalhos experimentais desenvolvidos nos últimos anos pelo autor ([36], [37], [38] e [39]), inicialmente foi analisado em duas dimensões o problema mitigação do campo magnético gerado por cabos subterrâneos.

No próximo capítulo são detalhadas as metodologias de cálculo do problema magnético e do problema térmico da blindagem de cabos subterrâneos. A partir dessa modelagem, foram determinados os fatores de redução e as perdas na capacidade de transmissão dos cabos, possibilitando, assim, a comparação do desempenho das diferentes técnicas de mitigação.

3. MODELAGEM

3.1. Introdução

Nesse capítulo é apresentada a modelagem utilizada para o estudo de diferentes configurações de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência, com a abordagem dos campos gerados por cabos de transmissão subterrâneos.

Inicialmente, são apresentadas as metodologias baseadas no Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM) para o cálculo do campo magnético e da distribuição da temperatura no entorno da fonte de campo e do sistema de blindagem. Por fim, a validação das metodologias é realizada por meio de comparações com resultados experimentais e com resultados publicados na literatura. A metodologia apresentada nesse capítulo é referente à solução do problema de blindagem em duas dimensões.

3.2. Modelagem do Problema

O nível de atenuação do campo magnético proporcionado pelo uso de uma técnica de mitigação pode ser determinado por meio de medições ou simulações computacionais. Contudo, a dificuldade de se reproduzir arranjos complexos em experimentos faz com que as simulações computacionais se tornem uma ferramenta importante no estudo da blindagem do campo magnético.

Para simulações computacionais representativas de arranjos menos complexos, é possível realizar o cálculo do campo usando expressões analíticas obtidas a partir da equação de Biot-Savart ou em uma solução fechada das equações de Maxwell. Apesar das simplificações realizadas no cálculo com Biot-Savart [7], é viável a determinação do campo magnético para múltiplos circuitos trifásicos em arranjos planares e triangulares. O cálculo do campo resultante é realizado por meio da superposição linear do campo originado pela corrente de cada condutor, sendo desprezados os efeitos das correntes induzidas no solo e na blindagem metálica dos cabos fase [39]. Além do cálculo do campo originado por linhas de transmissão, pode-se utilizar esse equacionamento analítico de Biot-Savart para projetar sistemas de blindagem com *loops* passivos e ativos, como

utilizado nos trabalhos [15] e [40]. Mais detalhes acerca do projeto de blindagens com *loops* utilizando equacionamento analítico podem ser encontrados na dissertação de mestrado do autor [5].

Para situações nas quais a corrente de Foucault está presente, como no caso de blindagem com chapas metálicas [7], a abordagem a partir de equações analíticas pode ser inviável. Para alguns casos com geometrias simples, é possível a utilização de expressões analíticas provenientes de soluções fechadas das equações de Maxwell. Todavia, para uso dessas soluções, o projeto do sistema de blindagem fica consideravelmente simplificado em decorrência de algumas considerações, tais como o uso de placas de largura infinita [41] ou de materiais de propriedades elétricas e magnéticas perfeitas [42]. Na maioria das situações, a geometria do problema não permite a realização desse tipo de abordagem, sendo empregada a metodologia de cálculo numérico para a resolução das equações de Maxwell [20], [43] e [44].

Dentre as principais metodologias numéricas aplicadas para a resolução de problemas do eletromagnetismo, podem ser citadas [7]:

- Métodos de elemento de volume:
 - Método dos Elementos Finitos (FEM);
 - Método das Diferenças Finitas (FDM) e Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD).
- Métodos integrais:
 - Equações Integrais (IE);
 - Métodos do Elemento de Fronteira (BEM);
 - Método dos Momentos (MoM);
 - Método de Impedância (IM).
- Métodos híbridos:
 - Métodos dos Elementos Finitos – Elementos de Fronteira (FEM-BEM);
 - Métodos dos Elementos Finitos – Elementos de Fronteira – Analítico (para estruturas finas).

O Método de Elementos Finitos (FEM) é um dos mais empregados na resolução de problemas do eletromagnetismo. Trata-se de uma técnica aproximada para a resolução de problemas descritos por equações diferenciais parciais com determinadas condições

de contorno. Para isso, a geometria do problema é dividida em partes menores, denominadas elementos finitos, discretizando o problema.

No presente trabalho, foi realizada a modelagem do problema de mitigação do campo magnético gerado por cabos subterrâneos utilizando o *software* COMSOL *Multiphysics*[®]. O COMSOL é um *software* de simulação em elementos finitos para a modelagem de projetos, dispositivos e processos em todas as áreas da engenharia. O *software* utiliza a modelagem multifísica para simular problemas do eletromagnetismo, mecânica estrutural, acústica, mecânica dos fluidos, transferência de calor e engenharia química [45].

A partir do cálculo com o *software* de elementos finitos, a densidade de fluxo magnético foi determinada na ausência e na presença do sistema de blindagem, avaliando, assim, a eficácia das configurações estudadas. Além disso, o COMSOL permite a resolução dos problemas de transferência de calor, possibilitando quantificar o impacto térmico da presença da blindagem na temperatura de operação dos condutores de um sistema subterrâneo. A determinação da temperatura é de fundamental importância, pois a temperatura é responsável pela determinação da capacidade máxima de condução de corrente da linha, denominada ampacidade.

Diante do exposto, são apresentadas a seguir as metodologias baseadas no Método de Elementos Finitos para o cálculo do campo magnético gerado por cabos subterrâneos (problema magnético) e da distribuição da temperatura na área no entorno dos cabos (problema térmico). Nesse estudo, os cabos foram considerados infinitamente longos na direção longitudinal, representando um problema em duas dimensões (2D).

A simplificação para o modelo 2D despreza os efeitos magnéticos e térmicos das extremidades. Para o estudo de longos trechos de cabos subterrâneos, pode-se desconsiderar as influências das terminações dos condutores. Contudo, em outras situações, como em trechos da caixa de emendas ou que possuem cabos se cruzando, e para a consideração das extremidades das blindagens é de fundamental importância a modelagem completa de todo o problema, necessitando, assim, da representação mais precisa do sistema elétrico e da blindagem em três dimensões. O estudo com a análise em três dimensões do problema de blindagem do campo magnético será apresentado no capítulo 5.

3.2.1. Problema Magnético

O campo magnético gerado pelos cabos subterrâneos é de baixa frequência (60 Hz), de maneira que o problema pode estar considerado no regime de “quase estática”. A equação diferencial que descreve a distribuição do potencial vetor magnético (A) ao longo de uma dada região no eixo “xy” é determinada por (3.1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) - j\omega\sigma A_z + J_s = 0 \quad (3.1)$$

onde: J_s é a densidade de corrente imposta pela fonte, ω é a frequência angular, μ é a permeabilidade magnética e σ é a condutividade elétrica do material. A densidade de fluxo magnético (\vec{B}) pode ser determinada pela relação com potencial vetor magnético, dada por:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.2)$$

Com a solução do potencial vetor magnético obtida em (3.1) é calculada a densidade de corrente em toda região de interesse pela equação (3.3):

$$\vec{J} = \vec{J}_s - j\omega\sigma\vec{A} \quad (3.3)$$

A partir dessas soluções, as perdas nos materiais podem ser calculadas, determinando-se assim as fontes de calor da equação que define o problema térmico. As fontes de calor serão provenientes das perdas ôhmicas em todos os materiais.

As perdas são calculadas em todos os elementos condutores do cabo subterrâneo (núcleo, blindagem e cobertura externa) e do sistema de blindagem (chapas, tubos, *loops*). Esse valor da perda por Efeito Joule é determinado pela distribuição de corrente nos elementos condutores, dada por:

$$q_j = \frac{|\vec{J}|^2}{\sigma} \quad (3.4)$$

onde q é a taxa de calor gerado por unidade de volume e o índice ‘ j ’ indica que a perda é por Efeito Joule.

Além da determinação da equação diferencial, é necessária a definição das condições de fronteira para a determinação da solução de interesse. Para o problema

analisado, o domínio deve ser considerado aberto, representando uma região idealmente infinita. No presente trabalho foi utilizado o método de truncamento do limite externo, sendo a fronteira considerada distante da região de interesse. Em [46] é sugerido o posicionamento da fronteira externa em pelo menos 5 vezes a distância da região de interesse mais interna, sendo em torno de 40 metros para a situação analisada. Todavia, esse tamanho do domínio iria resultar em elevado esforço computacional devido ao número de elementos. Sendo assim, foi utilizada uma função do COMSOL que modela uma região na fronteira como se fosse “infinita”. Dessa forma, foi utilizada essa funcionalidade para reduzir o tamanho do domínio, consequentemente, o esforço computacional.

A Figura 3.1 ilustra a representação das dimensões do domínio considerando a fronteira externa (40 metros) e a fronteira “infinita”, utilizada nesse estudo. Logo, pode-se representar na fronteira externa (“infinita”) tanto o potencial A como a sua derivada normal como nulos (condição homogênea de Dirichlet e Neumann, respectivamente). No presente estudo, foi considerada a condição homogênea de Dirichlet ($A = 0$).

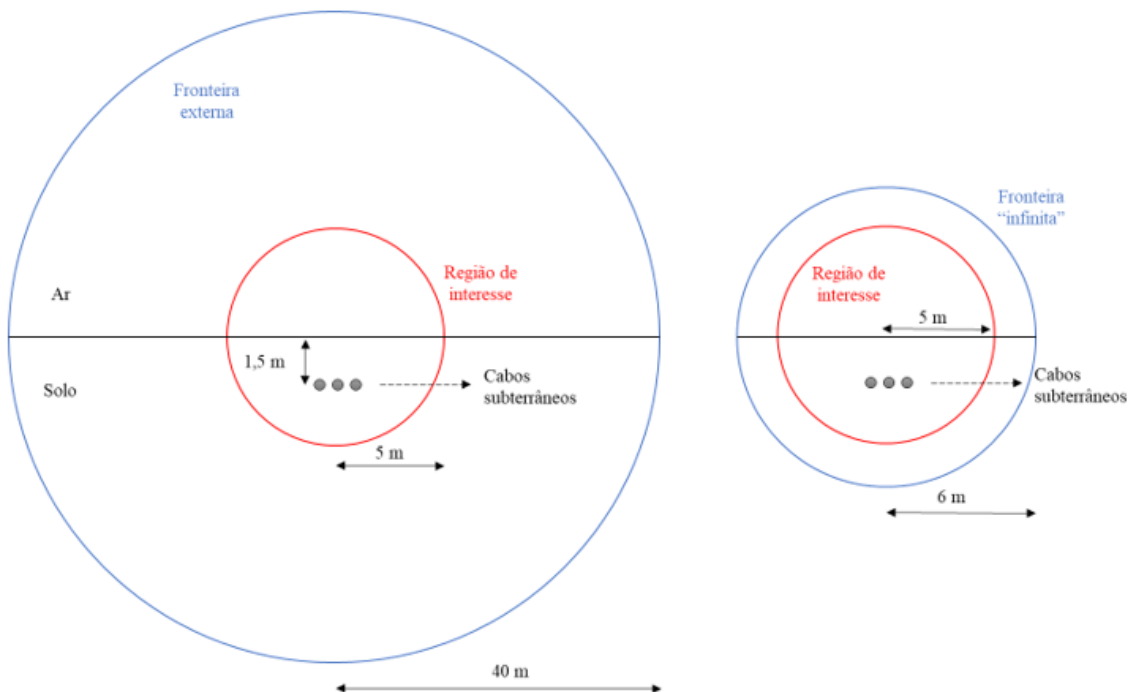


Figura 3.1 - Representação das dimensões do domínio considerando a fronteira externa distante (40 metros) e a fronteira “infinita”.

A seguir, são apresentados alguns exemplos de cálculos feitos pelo programa de elementos finitos. Na Figura 3.2 é detalhada a distribuição da densidade de fluxo magnético no entorno de um sistema trifásico subterrâneo disposto na configuração planar horizontal. No sistema de transmissão modelado foi considerada a corrente de 827 A, que aplicada nos cabos de 138 kV resulta na potência de 200 MVA. Os valores RMS das densidades de fluxo magnético calculados no entorno das fases (0,5 metro) e na altura de 1 metro do nível do solo foram de 267,50 e 13,58 μT , respectivamente. Além desses resultados, é possível a visualização da distribuição da corrente nos condutores do circuito, sendo exemplificada na Figura 3.3 essa distribuição no estudo da blindagem de cabos subterrâneos com *loops* de compensação.

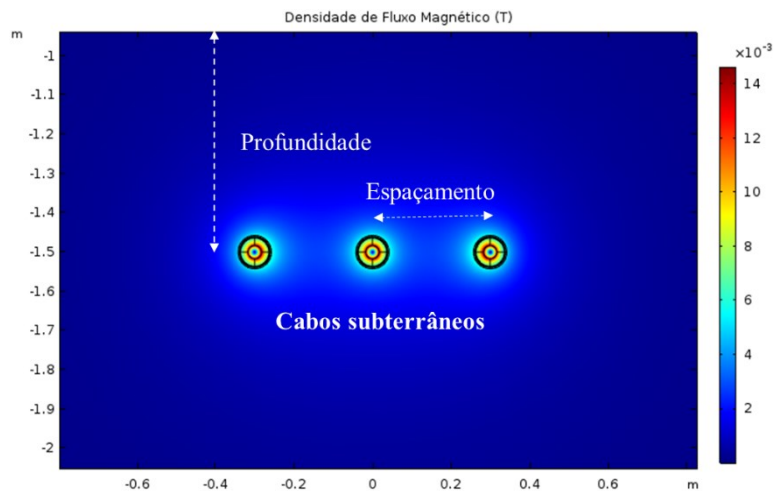


Figura 3.2 - Valores calculados da distribuição da densidade de fluxo magnético no entorno de cabos subterrâneos.

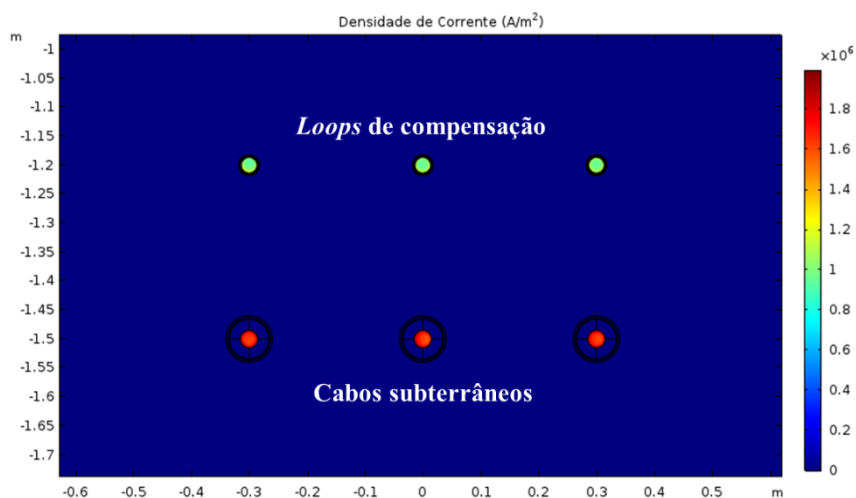


Figura 3.3 - Valores calculados da distribuição de corrente no sistema trifásico subterrâneo e nos *loops* de compensação.

3.2.2. Problema Térmico

No estudo térmico são calculadas as temperaturas finais alcançadas nas diferentes partes do cabo subterrâneo, isto é, é determinada a temperatura em regime permanente. A seguir são apresentadas algumas considerações adotadas para a resolução do problema térmico [20] :

- os cabos subterrâneos são considerados retos e infinitamente longos, os efeitos das extremidades podem ser desconsiderados;
- a linha é considerada estando enterrada diretamente em solo homogêneo e, portanto, o calor é transferido por condução a partir dos cabos, da blindagem e do solo;
- todos os materiais possuem propriedades térmicas constantes, incluindo a resistividade térmica do solo, não sendo considerado o fenômeno de migração de umidade;
- a superfície do solo, assim como estabelecido na norma IEC 60287 ([47] e [48]), é considerada uma isoterma à temperatura ambiente (hipótese de Kennelly);
- o efeito da transmissão de calor por radiação e convecção não é considerado.

Na maioria dos trabalhos que realizam a modelagem térmica, a transferência por radiação na superfície do solo é ignorada [20] e [49]. Em [49] é apresentado que o efeito da troca de calor por convecção na superfície do solo pouco influencia na determinação das temperaturas dos condutores.

Vale ser destacado que os efeitos de convecção e radiação no entorno do sistema de transmissão podem ser consideráveis para situações nas quais os cabos subterrâneos são dispostos em dutos preenchidos por ar. Todavia, caso os dutos sejam completamente preenchidos por algum material termicamente estável, os cabos podem ser considerados como diretamente enterrados, tornando a transferência de calor fundamentalmente por condução [48].

Diante dessas considerações, para sistemas subterrâneos, o calor é transferido para o ambiente externo por condução, sendo calculada a distribuição de temperatura em estado estacionário pela equação (3.5):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) = -q \quad (3.5)$$

onde: θ é a temperatura desconhecida, k é condutividade térmica do material e q é a mesma taxa de calor (perdas) calculada na equação (3.4).

De modo similar ao problema magnético, é necessário definir as condições de contorno do problema térmico. Para a superfície do solo, é adotada a condição de Dirichlet na qual é assumida uma isoterma de temperatura igual à temperatura do solo, como apresentado em [20]. Assim como na superfície do solo, deve-se adotar as condições de fronteira nas regiões externas do domínio para que estes limites sejam considerados satisfatoriamente distantes das fontes de calor. Nesse trabalho é adotada uma temperatura constante e igual à do solo nessas fronteiras, como sugerido em [49].

É importante ser destacado que, para os cabos enterrados, o principal responsável pela transferência do calor gerado para o meio externo é o solo de aterro, o qual corresponde ao próprio solo do local com *backfill*⁵. Caso o solo não consiga dissipar o calor na taxa necessária, a temperatura no condutor poderá ultrapassar seu valor crítico, danificando o isolamento do cabo. Para situações nas quais o solo possui elevada resistividade térmica, o *backfill* pode ser utilizado para melhorar as trocas de calor e, conseqüentemente, aumentar de maneira substancial a capacidade de transmissão de corrente da linha [50].

3.2.3. Acoplamento Termo-eletromagnético

No estudo de blindagem, o acoplamento do problema termo-eletromagnético é de fundamental importância, uma vez que a presença do sistema de blindagem afeta na distribuição da temperatura na região. Dessa forma, as blindagens utilizadas para mitigar o campo magnético podem resultar em um acréscimo de temperatura nos condutores, diminuindo a ampacidade da linha. Além disso, a temperatura influencia diretamente grandezas como a condutividade elétrica dos materiais. Essa variação pode ser descrita para materiais condutores de forma linear, conforme a equação (3.5):

⁵ O *backfill* é um material utilizado na obra civil das linhas subterrâneas para evitar a secagem do solo e facilitar as trocas de calor do cabo com o ambiente externo. Isso ocorre devido às características térmicas e hidrológicas do material, possibilitando valores de resistividade térmica relativamente baixos, mesmo quando secos.

$$\sigma(\theta) = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(\theta - 20)} \quad (3.5)$$

onde: θ é a temperatura atual em graus Celsius, σ_0 e α são a condutividade elétrica e coeficiente de temperatura do material a 20°C, respectivamente. Logo, deve-se considerar a variação da condutividade nesses tipos de materiais, uma vez que esse comportamento irá afetar tanto a eficácia da blindagem quanto o impacto térmico provocado pela blindagem.

Nas simulações realizadas no presente estudo, os valores da condutividade elétrica do núcleo, da blindagem do cabo e do material do sistema de blindagem foram considerados dependentes da temperatura.

O acoplamento entre os cálculos térmico e magnético foi realizado de “forma fraca”, ou seja, de maneira independente e iterativa para a determinação dos resultados finais. Essa rotina iterativa é indispensável para a representação do problema analisado, pois as perdas por Efeito Joule dependem do valor da condutividade elétrica e, conseqüentemente, da temperatura de operação do material condutor. Do mesmo modo, as perdas ôhmicas calculadas no problema magnético são as fontes do problema térmico, tornando, assim, a solução de um problema dependente do outro.

Para resolver esta interdependência, os fenômenos elétricos são mais rápidos que os fenômenos térmicos, possibilitando as resoluções dos problemas térmico e magnético de modo independente. Essa consideração pode ser assumida devido as constantes de tempo dos fenômenos elétricos serem, na maioria das situações, muito inferiores as constantes de tempo dos fenômenos térmicos [51]. Sendo assim, o problema magnético pode ser representado por seu regime permanente a cada iteração no cálculo da distribuição de temperatura. Desta maneira, utiliza-se os resultados de uma iteração como as condições iniciais da próxima etapa de cálculo do problema térmico.

Esta mesma metodologia de acoplamento do problema térmico e magnético foi adotada em [30]. A Figura 3.4 ilustra o fluxograma dessa rotina iterativa. Vale ser destacado que o próprio *software* COMSOL realiza o acoplamento entre os problemas térmico e magnético.

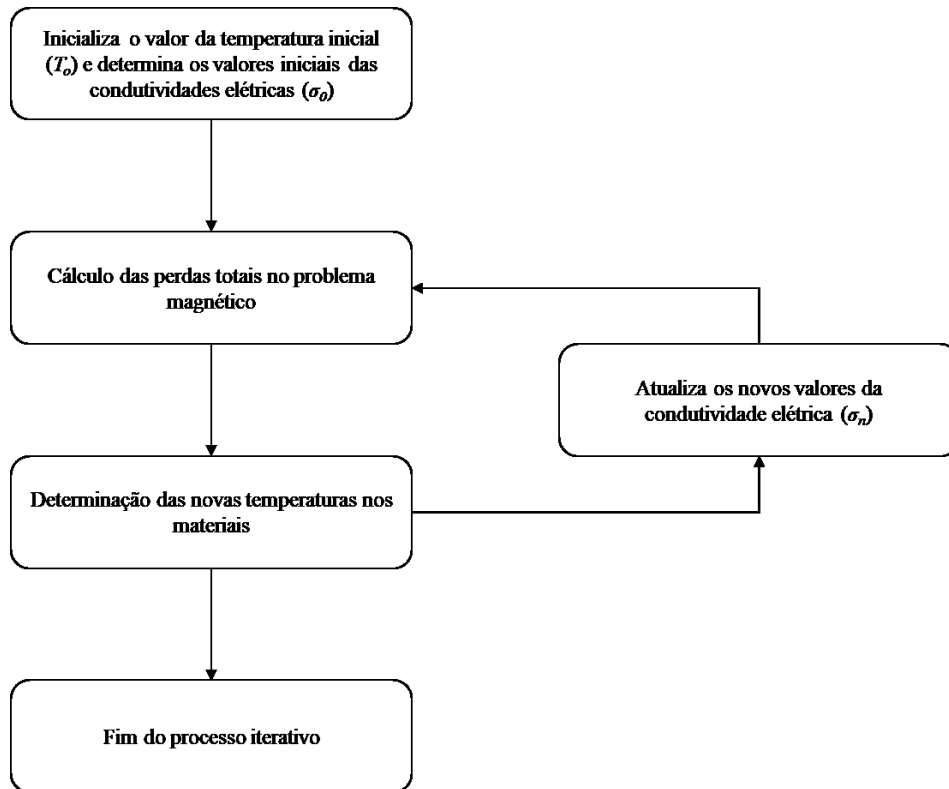


Figura 3.4 - Fluxograma do acoplamento termo-magnético do problema de blindagem do campo magnético de baixa frequência. Adaptado de [30].

Para exemplificar, o funcionamento do processo iterativo consiste nos seguintes passos: primeiro impõe-se a temperatura inicial, no caso a temperatura ambiente, para que a condutividade elétrica de cada material seja estabelecida. Com os resultados obtidos, é alcançada a solução do problema magnético para o cálculo das perdas por Efeito Joule em cada uma das regiões pertinentes, a saber: os núcleos dos cabos, as blindagens dos cabos e o sistema de blindagem. Em seguida, as perdas encontradas no cálculo do problema magnético serão as fontes de calor para a determinação da distribuição de temperatura, na solução do problema térmico. Assim, com os novos valores de temperatura calculados, a condutividade elétrica é atualizada e as perdas são novamente determinadas. Após algumas iterações, as variações da temperatura e, portanto, das condutividades elétricas são tão pequenas (inferiores a 0,1%) que o critério de parada do processo iterativo é alcançado, significando, assim, que o sistema de transmissão está em regime permanente.

3.3. Validação da Metodologia

A fim de validar a metodologia de cálculo do campo magnético e da temperatura, foram realizadas comparações com resultados previamente conhecidos. Inicialmente, a validação do cálculo do campo magnético foi apresentada por meio da comparação dos resultados obtidos pelo COMSOL com os valores de campo calculados com a aplicação da Lei de Biot-Savart. Além disso, a parte térmica foi aferida a partir do cálculo da IEC 60287 ([47] e [48]), norma que possibilita o cálculo da capacidade de condução de corrente de um cabo subterrâneo. Após a comparação com as soluções analíticas, os resultados experimentais obtidos em [52] foram utilizados para a comparação da metodologia computacional descrita anteriormente. Em todas as comparações foi considerado o acoplamento termo-magnético, detalhando na Figura 3.4, para o cálculo do campo e da temperatura.

3.3.1. Comparação entre Soluções Analíticas e Numéricas

O campo magnético gerado por uma linha subterrânea pode ser calculado por meio da equação de Biot-Savart e da superposição linear do campo produzido pela corrente que circula em cada fase. Para isso, é necessário considerar que os cabos são infinitamente longos na direção longitudinal, de forma que as interferências nas pontas possam ser ignoradas. Dessa forma, o problema pode ser representado em duas dimensões e o valor do campo magnético determinado analiticamente. Mais detalhes a respeito dessa metodologia de cálculo analítica podem ser encontrados em [5] e [39].

Para a situação analisada, foi considerado um trecho de uma linha de transmissão subterrânea. Nesse trecho, os cabos de alta tensão foram espaçados em 30 centímetros, enterrados a 1,5 metros e dispostos na configuração planar horizontal, posicionamento semelhante ao ilustrado na Figura 3.2. A corrente nas fases foi de 827,2 A, correspondendo a uma potência transmitida de 200 MVA para a tensão de linha de 138 kV.

O perfil de campo calculado corresponde ao campo magnético em um eixo perpendicular à linha situado a 1 metro acima da superfície do solo e analisado para uma largura de 6 metros. A Figura 3.5 e a Tabela 3.1 apresentam a comparação dos perfis de campo calculados com o COMSOL e de forma analítica pela equação de Biot-Savart. Os

valores foram confrontados a cada intervalo regular de 50 centímetros. Analisando os resultados vê-se que os valores calculados pelo COMSOL são praticamente coincidentes com os calculados analiticamente, com diferenças inferiores a 0,3%.

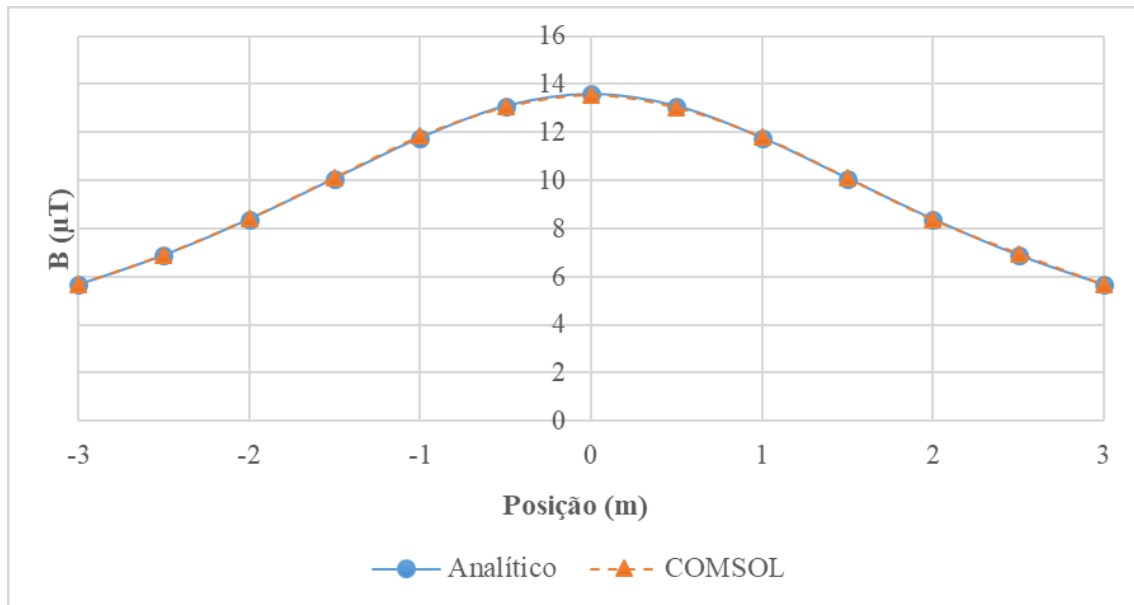


Figura 3.5 - Perfil do campo magnético gerado por uma linha subterrânea calculado analiticamente e pelo COMSOL.

Tabela 3.1 - Comparação dos valores do campo magnético gerado por uma linha subterrânea calculado analiticamente e pelo COMSOL.

Posição (m)	B Analítico (μT)	B COMSOL (μT)	Diferença (%)
-3	5.65	5.64	0.16
-2.5	6.88	6.90	0.27
-2	8.38	8.37	0.14
-1.5	10.08	10.06	0.17
-1	11.77	11.76	0.13
-0.5	13.09	13.07	0.17
0	13.59	13.58	0.11
0.5	13.09	13.08	0.09
1	11.77	11.77	0.01
1.5	10.08	10.07	0.05
2	8.38	8.38	0.03
2.5	6.88	6.89	0.18
3	5.65	5.64	0.14

Para a validação do cálculo térmico, foi determinada a ampacidade do cabo em regime permanente. A norma IEC 60287 ([47] e [48]) apresenta o cálculo analítico da corrente máxima admissível no regime permanente para uma linha trifásica diretamente enterrada. Considerando sistema subterrâneo descrito anteriormente, foram modelados os cabos de alta tensão (138 kV) com condutores em alumínio, isolamento em XLPE e área da seção transversal de 800 mm². Os parâmetros construtivos do cabo, ou seja, as dimensões do condutor, material isolante, blindagem do cabo e capa externa encontram-se descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Parâmetros construtivos do cabo subterrâneo de alta tensão analisado.

Diâmetro do Conductor (Al)	33,9 mm	Resistência DC (20 °C) do condutor	0,00367 Ω/km
Espessura da isolamento (XLPE)	19,2 mm	Resistividade térmica da isolamento	3,5 K.m/W
Espessura da blindagem (Pb)	2,7 mm	Resistividade da capa externa	3,5 K.m/W
Espessura da capa externa (HDPE)	3,5 mm	Coefficiente térmico	Al – 4,03e-3 1/K
			Pb – 4,00e-3 1/K

A resistividade térmica do solo foi considerada igual a 1 K.m/W e a temperatura ambiente igual a 25°C. Nessa situação, de acordo com a IEC 60287, a corrente máxima permitida (ampacidade) para uma linha trifásica diretamente enterrada, onde a secagem do solo não é considerada, é de 827,2 A. Com essa corrente, a temperatura no condutor central da linha é de aproximadamente 90°C, máxima temperatura suportável para a isolamento em XLPE. O cálculo da ampacidade em regime permanente é descrito na IEC 60287 [47] e dado pela seguinte equação:

$$I = \sqrt{\left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]} \quad (3.6)$$

onde:

$\Delta\theta$ – aumento da temperatura no condutor em relação à temperatura ambiente

($\Delta\theta = \theta_c - \theta_A$);

θ_c – temperatura do condutor;

θ_A – temperatura do ambiente;

R – resistência AC do condutor (Ω/m);

W_d – perdas no dielétrico (W/m);

T_1 – resistência térmica entre o condutor e a blindagem ($K.m/W$);

T_2 – resistência térmica entre a blindagem e a armação ($K.m/W$);

T_3 – resistência térmica da cobertura externa ($K.m/W$);

T_4 – resistência térmica da região exterior ao cabo ($K.m/W$);

n – número de condutores em cada cabo;

λ_1 – fator de perdas da blindagem;

λ_2 – fator de perdas da armação metálica.

Mais detalhes acerca do cálculo das resistências térmicas das partes do cabo (T_1 , T_2 e T_3) e da região exterior (T_4) podem ser encontradas em [48]. Após a determinação da ampacidade da linha foi simulada a distribuição da temperatura no sistema subterrâneo analisado. Nessa etapa, além da validação do cálculo térmico, foi analisada a importância do acoplamento termo-eletromagnético no estudo de blindagem.

A elevação de temperatura foi calculada para o caso simplificado, isto é, situação na qual não se considerou a variação da condutividade com a temperatura, e para o caso completo. As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam os resultados obtidos para a situação dos cabos subterrâneos sem considerar e considerando a dependência da condutividade com temperatura, respectivamente.

A Figura 3.7 mostra que, para a corrente nominal (827,2 A), o condutor central da linha subterrânea alcançou a temperatura de 89,7°C tendo considerado a variação da condutividade elétrica com a temperatura. A diferença entre valor calculado e o esperado (90°C) foi inferior a 0,5%, evidenciando que a capacidade de corrente admissível para esse sistema subterrâneo é de aproximadamente 827 A. Para o caso simplificado, a temperatura final no condutor central foi de aproximadamente 77,6°C.

Vale destacar que as condutividades do alumínio, material do núcleo do cabo, e do chumbo, material da blindagem metálica do cabo, reduziram respectivamente de 35,4 MS/m para 27,6 MS/m e de 4,84 MS/m para 3,96 MS/m durante o processo iterativo de cálculo da temperatura. A redução da condutividade aumenta as perdas por Efeito Joule

e, por conseguinte, resulta em uma maior elevação de temperatura do condutor, representando de maneira correta o fenômeno de aquecimento do cabo subterrâneo.

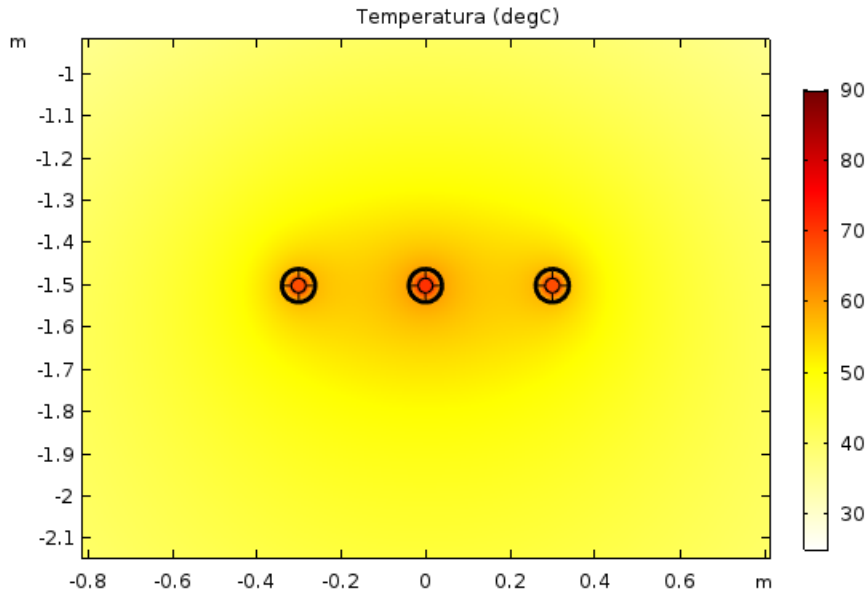


Figura 3.6 - Distribuição de calor no caso simplificado (sem o acoplamento dos problemas térmico e magnético).

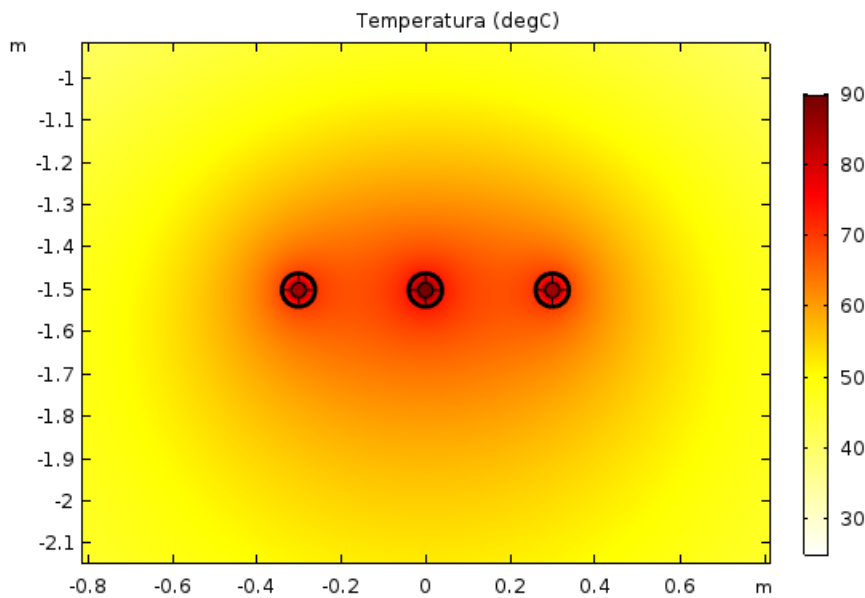


Figura 3.7 - Distribuição de calor no caso completo (com o acoplamento dos problemas térmico e magnético).

3.3.2. Comparação com Resultados Experimentais

Embora as simulações computacionais sejam importantes ferramentas que auxiliam na etapa de projeto, as medições constituem uma fase fundamental para a quantificação real acerca da eficácia das blindagens. A relevância do estudo experimental se deve às incertezas existentes na modelagem do problema com configurações mais complexas de blindagem ou com múltiplas fontes de campo, necessitando, assim, de simplificações nos modelos de cálculo. Todavia, por trazerem dificuldades adicionais de implementação, principalmente por se tratar de sistemas de potência, poucos trabalhos disponibilizam esse tipo de resultado experimental. Alguns resultados experimentais de blindagens instaladas em sistemas de potência podem ser encontrados nos trabalhos [7], [18] e [52].

Além de possibilitar o estudo real da eficácia dos sistemas de blindagem, as medições também podem ser utilizadas na comparação experimental das metodologias de cálculo de campo propostas. Dessa forma, para a comparação com resultados experimentais, os resultados calculados computacionalmente foram comparados com os valores de densidade de fluxo magnético apresentados no trabalho publicado pelo autor [52].

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental sobre a eficácia de diferentes técnicas de mitigação do campo magnético produzido por cabos subterrâneos. A partir das medições foi possível realizar uma análise detalhada da eficácia dos métodos de blindagem avaliados: chapa metálica em “H”, *loops* passivos com uso de núcleo magnético e canaleta fechada. Para isso, foi construído um arranjo experimental especial composto por quatro trechos com linhas trifásicas de média tensão (138 kV). A Figura 3.8 apresenta um desenho esquemático do arranjo experimental e o corte transversal das geometrias das blindagens.

Em todos os quatro trechos, os cabos foram curto-circuitados em uma das suas extremidades e enterrados a 1,5 metro de profundidade. Apenas no trecho em que foi utilizada a canaleta fechada, os cabos foram dispostos em arranjo triangular. Nos demais, os condutores foram posicionados em um arranjo planar com espaçamento de 0,3 metro entre as fases.

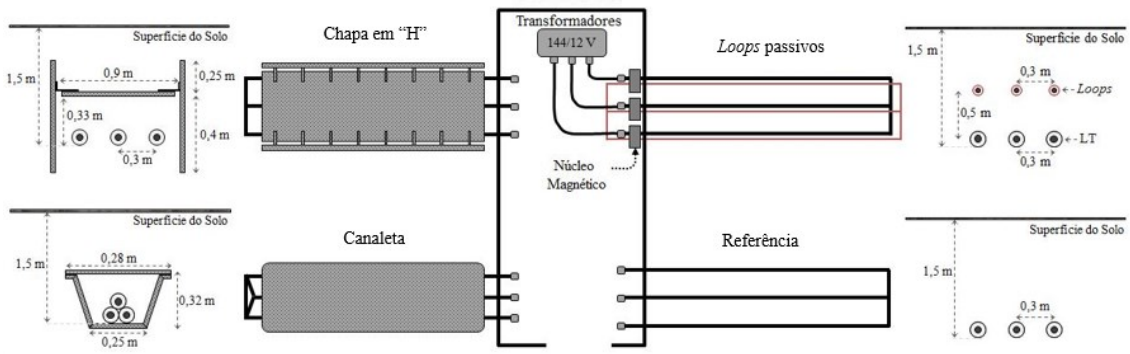


Figura 3.8 - Disposição dos quatro circuitos do arranjo experimental com os respectivos cortes transversais e geometrias. Adaptada de [38].

Um dos trechos foi definido como referência, sendo composto apenas pelos cabos subterrâneos. Nas blindagens metálicas foram utilizadas chapas de aço com espessura de 3 e 6 milímetros para a configuração aberta em “H” e para a canaleta fechada, respectivamente. No trecho com a técnica de compensação por *loops* passivos foram dispostos núcleos magnéticos para acoplar magneticamente os *loops* com as fases da linha. A partir do uso dos transformadores de corrente, foi possível a obtenção de um fator de acoplamento de aproximadamente de 80%. Vale destacar que os trechos foram energizados separadamente de forma a se obter a circulação de correntes de 827 A, correspondente ao valor nominal da corrente para o circuito de referência para os cabos de alta tensão descritos na Tabela 3.2. Maiores informações a respeito das técnicas de blindagem, incluindo as fotografias da obra civil e as análises dos resultados deste estudo experimental, podem ser encontradas em [52].

A comparação entre os valores medidos e simulados foi feita aplicando o fator de redução das blindagens. Dessa forma, a partir da equação (2.7), utilizaram-se os valores dos campos magnéticos medido e simulado para determinar a eficácia de cada tipo de blindagem. Em virtude da não existência de um circuito de referência com arranjo triangular, foi necessário o cálculo do campo magnético gerado por esse arranjo sem a presença de blindagem para determinar o fator de redução medido para a canaleta.

O perfil de campo foi delimitado em um eixo perpendicular à linha para uma largura de 3 metros e situado a 1,5 metros do nível do solo. A Figura 3.9 apresenta a comparação dos fatores de redução medido e simulado. Os valores dos fatores de redução medidos foram obtidos em [52].

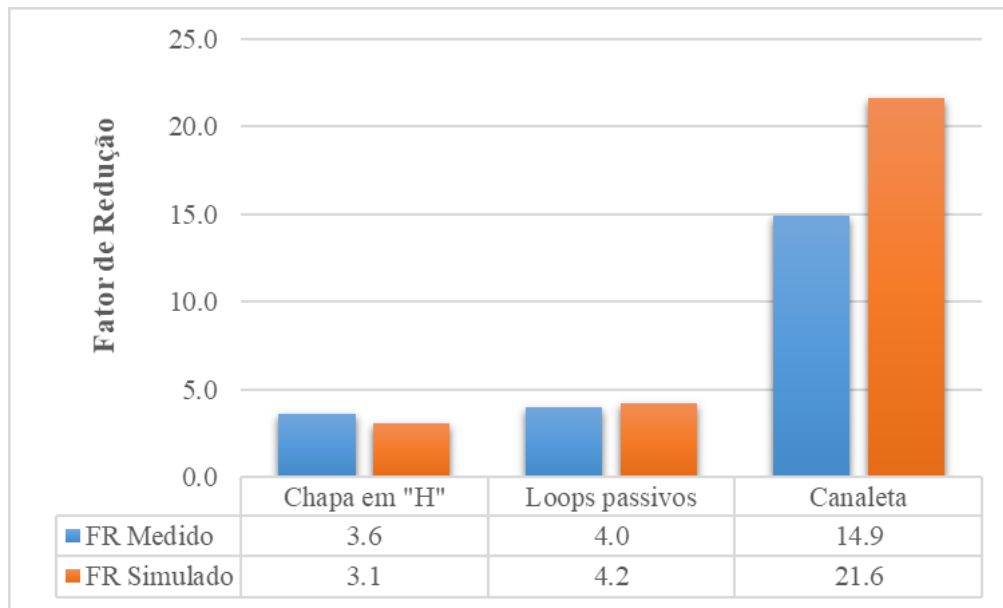


Figura 3.9 - Comparação entre os FR medidos e simulados para a chapa em “H”, *loops* passivos e canaleta.

Analisando os resultados da Figura 3.9, pode-se perceber que os valores simulados e medidos apresentaram boa concordância, validando, assim, a metodologia de cálculo computacional apresentada para o projeto de sistemas de blindagem de campo magnético de baixa frequência. A divergência mais notória ocorreu na blindagem com canaleta fechada em decorrência da dificuldade de se determinar as propriedades magnéticas das chapas de aço utilizadas, como discutido anteriormente nas dificuldades do projeto de blindagens ferromagnéticas. O desconhecimento dos valores iniciais (ordem de ‘mT’) da curva de magnetização do aço fazem com que a permeabilidade magnética seja estimada na simulação computacional, resultando em discrepâncias entre os valores medidos e calculados.

A Figura 3.10 ilustra os perfis de campo simulados para os quatro trechos do arranjo experimental da Figura 3.8. Vale destacar que a assimetria na atenuação proporcionada pelos *loops* pode ser creditada às pequenas diferenças dos fatores de acoplamentos dos transformadores de corrente. Essa variação medida no estudo experimental (inferior a 5%) foi considerada nas simulações realizadas, uma vez que se fossem considerados os fatores de acoplamento idênticos, a blindagem com *loops* passivos resultaria em uma atenuação ainda maior do campo.

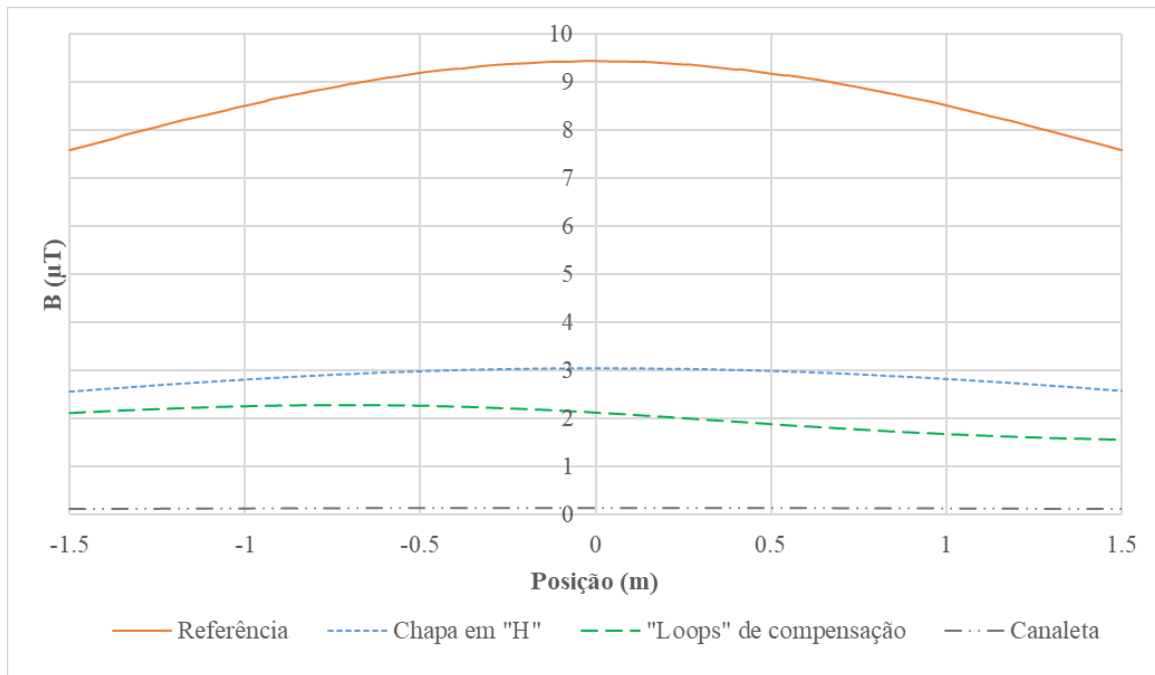


Figura 3.10 - Perfis de campo calculados para os trechos da referência, da configuração aberta da chapa em "H", da blindagem com *loops* passivos de compensação e da canaleta fechada.

3.4. Considerações Finais

Este capítulo apresentou a metodologia computacional proposta para avaliar a blindagem do campo magnético de baixa frequência em problemas 2D, tendo sido estudados arranjos de cabos subterrâneos como fonte de campo. Para a modelagem do problema, foram apresentadas as metodologias de cálculo pelo Método dos Elementos Finitos dos problemas magnético e térmico, além do acoplamento realizado entre essas físicas. Por fim, para a validação da metodologia apresentada, os resultados obtidos por meio de simulações foram comparados com expressões analíticas conhecidas da literatura e com valores de campo magnético obtidos experimentalmente.

Tendo isto em conta, pode-se inferir que os valores calculados com a metodologia apresentada mostraram concordância com os resultados utilizados na comparação com os valores experimentais e os valores encontrados na literatura, possibilitando, assim, a utilização dessa ferramenta para o estudo de outras técnicas de mitigação de campos gerados por linhas subterrâneas. Essas análises serão apresentadas nos próximos capítulos.

4. PROJETO DE SISTEMAS DE BLINDAGENS: ANÁLISE EM DUAS DIMENSÕES

4.1. Introdução

Nesse capítulo, é apresentado o estudo computacional das principais técnicas de mitigação do campo magnético de baixa frequência para problemas em duas dimensões (2D). As técnicas analisadas neste estudo são: o rearranjo dos condutores, os *loops* de compensação e as blindagens metálicas com configurações abertas e fechadas. De início, são apresentados os resultados obtidos para os diferentes métodos de mitigação, possibilitando, assim, uma análise preliminar da efetividade das blindagens. A partir dessa análise, se tornará possível a seleção de técnicas de mitigação para a modelagem em três dimensões. Todos os resultados foram obtidos por meio do uso do *software* COMSOL Multiphysics® a partir da metodologia discutida no Capítulo 3.

Novamente, para o projeto de sistemas de blindagem em 2D, um trecho convencional de um sistema trifásico de transmissão subterrâneo foi modelado para a avaliação do fator de redução (eficácia) de cada técnica e do possível sobreaquecimento (impacto térmico) causado na linha subterrânea. Além de possibilitar o conhecimento da ferramenta computacional utilizada para o projeto de sistemas de blindagens, o estudo permitiu uma análise inicial das técnicas de mitigação implementadas.

4.2. Estudo de Técnicas de Blindagem em 2D

Para o estudo realizado nesta etapa, a disposição dos cabos no trecho convencional de uma linha de transmissão subterrânea é similar à apresentada no Capítulo 3. Isto é, condutores foram considerados infinitamente longos, dispostos na configuração planar horizontal, espaçados em 30 centímetros e enterrados a uma profundidade de 1,5 metro. Os parâmetros do cabo de alta tensão (138 kV de 800 mm² Al/XPLE) modelado no estudo de caso estão apresentados na Tabela 3.2.

A Figura 4.1 ilustra o posicionamento dos cabos no trecho de uma vala típica de um cabo subterrâneo e detalha os parâmetros da resistividade térmica do solo (ρ_{solo}) e da

temperatura ambiente ($\theta_{ambiente}$). Para o trecho convencional modelado, a corrente considerada foi de 827 A, correspondendo ao valor da ampacidade da linha, como discutido no capítulo anterior (seção 3.3.1). O sistema trifásico conduzindo essa corrente é capaz de transmitir uma potência de aproximadamente 200 MVA. Esse sistema de transmissão pode ser observado na Figura 4.2 por meio do domínio modelado em 2D que foi utilizado no estudo inicial das técnicas de mitigação.

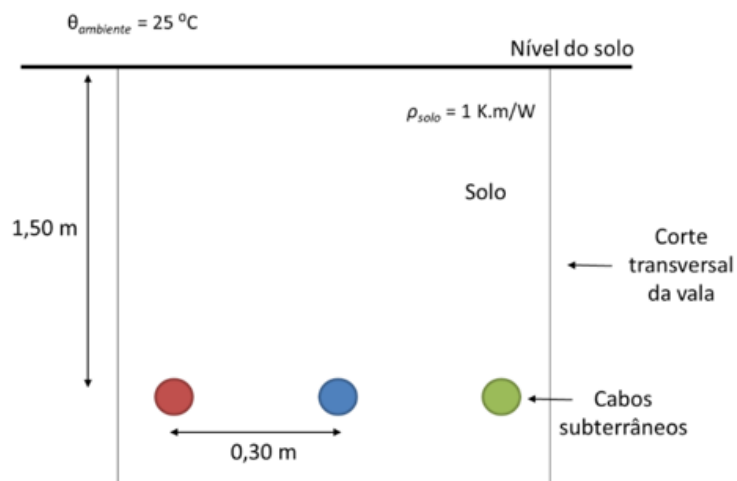


Figura 4.1 - Visão transversal da disposição dos cabos subterrâneos em um trecho convencional no estudo de caso realizado.

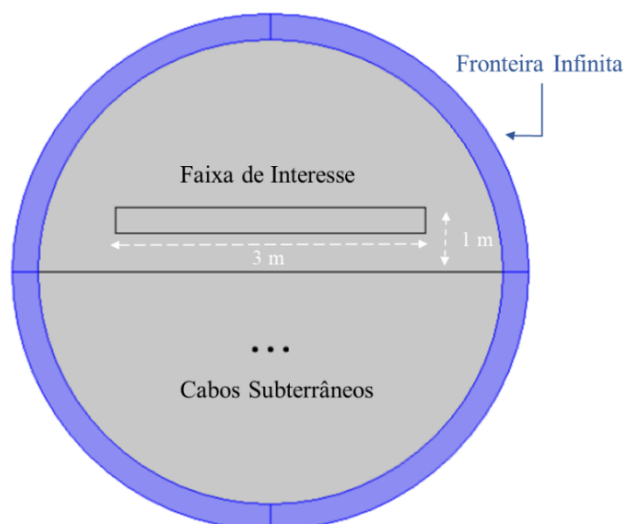


Figura 4.2 - Domínio modelado em duas dimensões (2D) para a representação do sistema subterrâneo.

Com base na modelagem da fonte de campo, foram avaliadas as seguintes técnicas de blindagem descritas nas seguintes seções do presente capítulo:

- 4.2.1 - rearranjo dos condutores: análise da alteração na configuração e espaçamento;
- 4.2.2 - *loops* de compensação: análise dos sistemas de compensação com baixo e alto acoplamento (presença do núcleo magnético);
- 4.2.3 - materiais metálicos: análise da blindagem com placas nas configurações abertas (chapas plana, em “U” invertido e em “H”) e fechadas (tubo e canaleta);
- 4.2.4 - combinação de técnicas de blindagem.

É importante destacar que, para a comparação das técnicas de mitigação, os fatores de redução foram determinados com base nos valores dos perfis de campo de acordo com a equação (2.7). Os perfis de campo são os valores calculados do campo magnético em um eixo perpendicular à linha situado a 1 metro acima da superfície do solo e analisado para uma largura de 3 metros, definindo, assim, a faixa de interesse (Figura 4.2). Já o impacto térmico foi quantificado por meio do cálculo da temperatura nos condutores de cada uma das fases, permitindo assim, a comparação da elevação final de temperatura na presença dos diferentes tipos de blindagem. Além disso, foi determinada a redução da capacidade do sistema trifásico subterrâneo de transmissão.

A seguir, são apresentadas as discussões acerca das técnicas de mitigação estudadas, sendo detalhadas as particularidades, características e eficiência de cada método de blindagem. No final do capítulo, os projetos de blindagem são comparados com base na eficácia da atenuação do campo magnético e no impacto térmico provocado.

4.2.1. Rearranjo dos Condutores

Na maioria das situações, em decorrência da viabilidade e do baixo custo de implementação, a mudança no posicionamento dos cabos é uma alternativa a ser considerada principalmente nas etapas iniciais do projeto do sistema subterrâneo, não sendo comumente considerada para cabos em operação. Apesar disso, devido à importância e a efetividade da técnica, o rearranjo dos condutores deve ser analisado no estudo de métodos de mitigação do campo magnético.

Para o estudo da eficácia do rearranjo dos condutores, a configuração dos cabos e o espaçamento entre as fases foram variados. Além disso, foram analisadas a influência

da sequência de fases em circuitos duplos e o aumento do campo magnético no ponto de junção dos cabos subterrâneos, trecho conhecido como caixa de emendas.

Primeiramente, com relação ao tipo de configuração, foram modelados os arranjos planar horizontal e triangular. No que tange o espaçamento dos cabos, foram analisadas as situações das fases espaçadas em 30 centímetros e dos cabos se tocando (sem espaçamento). A Figura 4.3 apresenta, além do posicionamento dos cabos, as distribuições da densidade do fluxo magnético para os quatro casos analisados. Adicionalmente, para facilitar a comparação entre os arranjos, são apresentados na Figura 4.4 os perfis de campo calculados na faixa de interesse, detalhada na Figura 4.2.

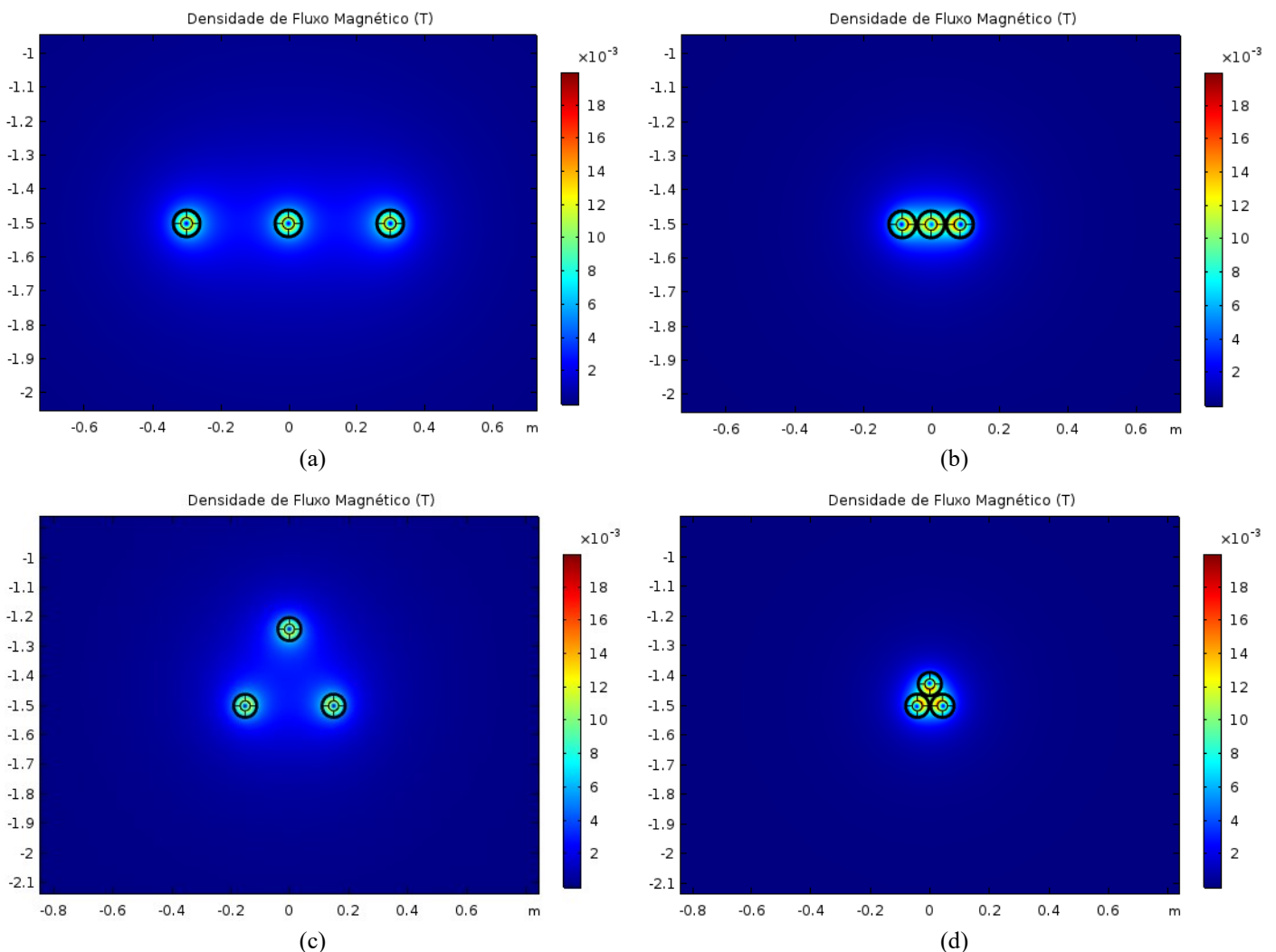


Figura 4.3 - Posicionamento dos cabos e distribuição da densidade de campo magnético nos quatro casos: (a) arranjo planar horizontal com cabos espaçados em 30 centímetros, (b) arranjo planar horizontal com os cabos se tocando, (c) arranjo triangular com os cabos espaçados em 30 centímetros e (d) arranjo triangular com os cabos se tocando.

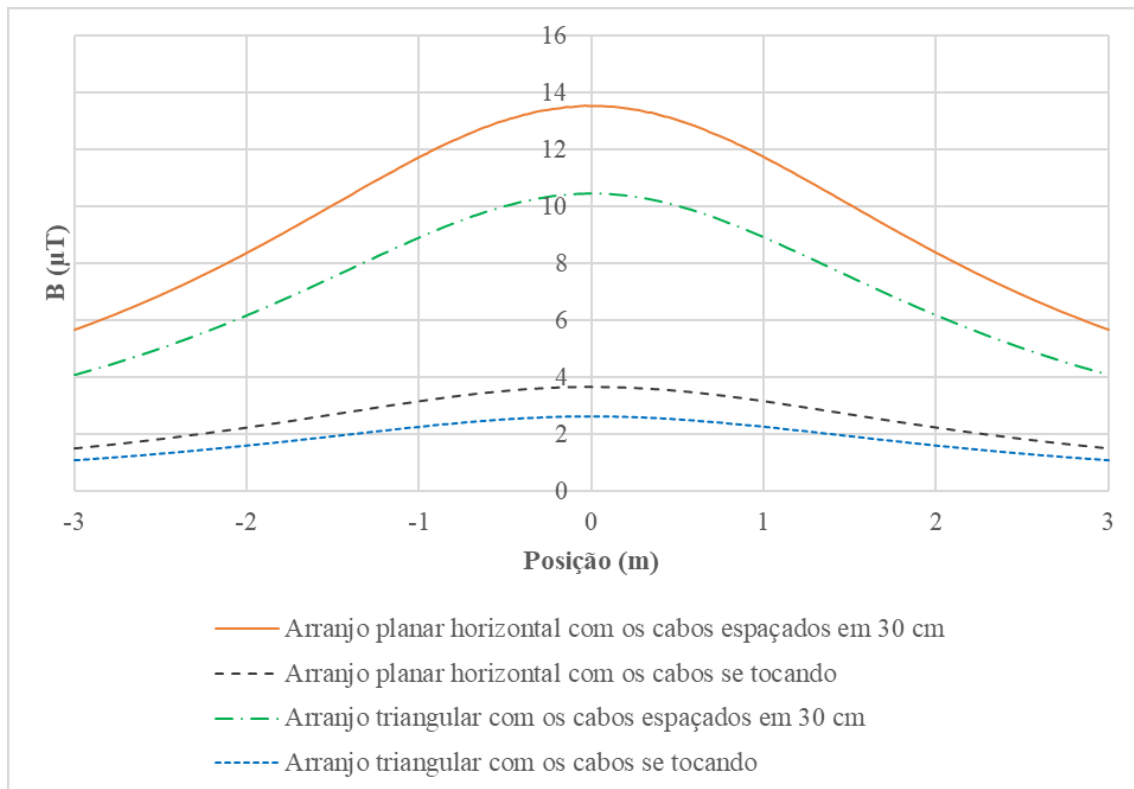


Figura 4.4 - Perfis de campo calculados para os arranjos: planar horizontal com cabos espaçados em 30 centímetros, planar horizontal com os cabos se tocando, triangular com os cabos espaçados em 30 centímetros e triangular com os cabos se tocando.

Analisando os resultados das Figuras 4.3 e 4.4, pode-se concluir que, como descrito na literatura, o rearranjo dos condutores é uma solução eficaz para a atenuação do campo magnético. Na comparação com a variação do tipo de configuração, a redução no espaçamento entre os cabos acarreta em menores valores do campo resultante. Para os arranjos com os condutores se tocando, o valor do campo máximo a 1 metro do nível do solo é inferior a $4 \mu\text{T}$, ou seja, mais de três vezes inferior à configuração convencional estudada (Figura 4.1).

No entanto, a aproximação dos cabos subterrâneos resulta em maior aquecimento dos condutores, limitando a capacidade de transmissão de corrente do sistema subterrâneo. O aquecimento adicional pode ser observado na Figura 4.5 que apresenta a distribuição da temperatura nos quatro arranjos analisados no presente trabalho.

Para os arranjos com os cabos se tocando, a temperatura máxima calculada é de aproximadamente 110°C , consideravelmente superior à temperatura suportável pelo isolamento em XLPE do cabo subterrâneo modelado (90°C). Vale destacar que o cabo que apresenta a maior temperatura, ou seja, o condutor crítico, teve discrepância nas duas

configurações analisadas. A fase central na configuração planar horizontal alcançou a temperatura de 89,7°C e de 111,7°C nos arranjos com os cabos espaçados em 30 centímetros e se tocando, respectivamente. Na configuração triangular, devido à profundidade dos cabos, os condutores mais aquecidos são os laterais. Sendo assim, os valores máximos da temperatura são respectivamente 89,2°C e 111,4°C para os casos com espaçamento (30 centímetros) e sem espaçamento entre os cabos.

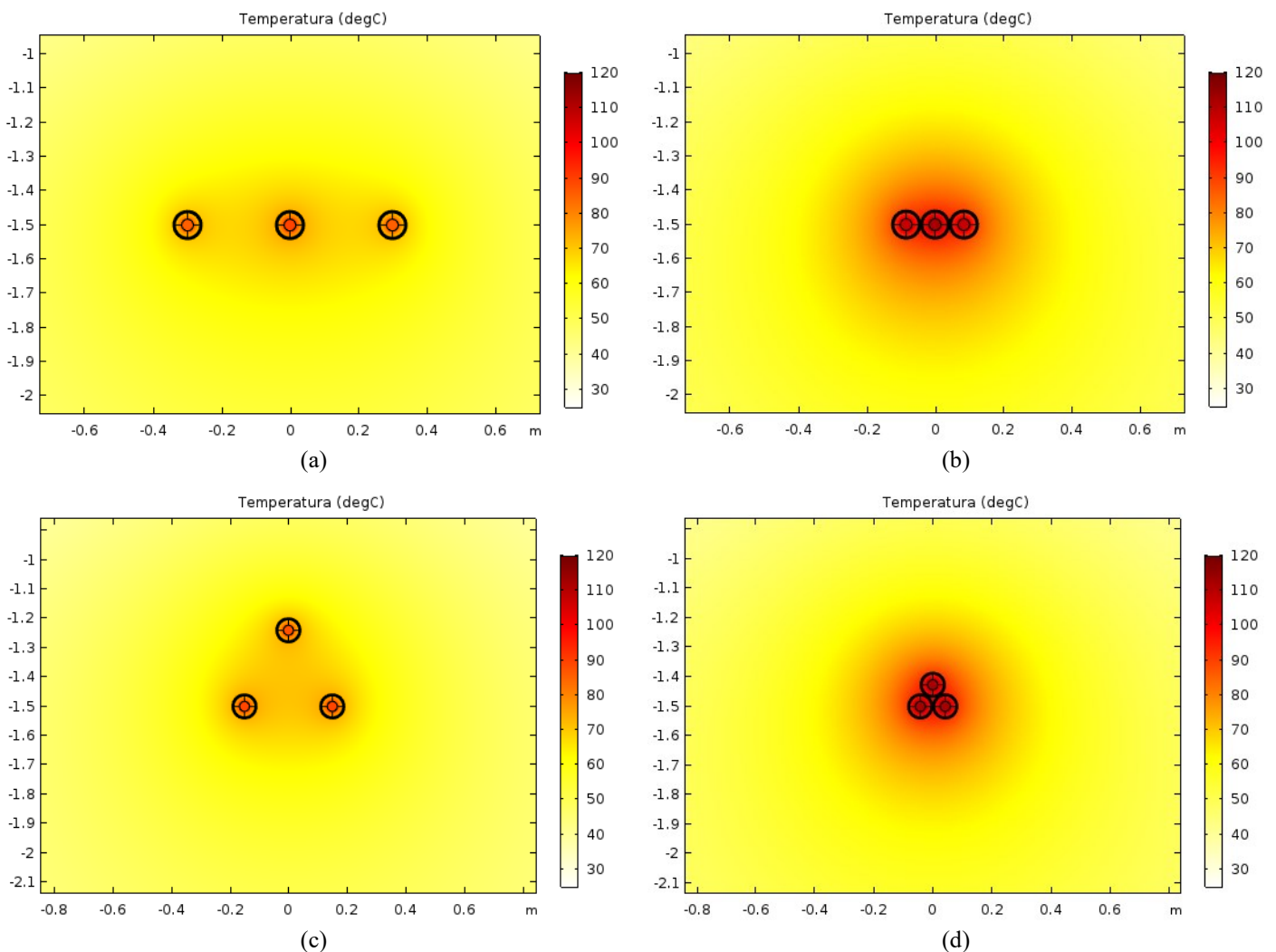


Figura 4.5 - Distribuição da temperatura nos quatro casos: (a) arranjo planar horizontal com cabos espaçados em 30 centímetros, (b) arranjo planar horizontal com os cabos se tocando, (c) arranjo triangular com os cabos espaçados em 30 centímetros e (d) arranjo triangular com os cabos se tocando.

A maior temperatura nos condutores faz com que seja necessária a redução da corrente na linha, diminuindo, assim, a capacidade de transmissão. Dessa forma, as potências transmitidas nos arranjos planar horizontal e triangular com os cabos se tocando

são de aproximadamente 175,4 e 175,9 MVA, que corresponde a uma redução de 2,6% e 2,3%, respectivamente.

Outras regiões que merecem um destaque especial na análise de campos magnéticos gerados são os trechos de múltiplos circuitos e da caixa de emendas. Na tentativa de reduzir o número de valas e, conseqüentemente, o custo das obras civis, são utilizados múltiplos circuitos de cabos subterrâneos para a transmissão de energia, sendo comumente empregado o circuito duplo com os cabos dispostos no arranjo planar vertical. Como discutido no Capítulo 2, o posicionamento das fases influencia diretamente o campo magnético resultante. Dessa forma, a técnica do rearranjo dos condutores é uma alternativa viável para a mitigação do campo gerado por um trecho com circuito duplo. Para exemplificar a importância do melhor posicionamento das fases de um sistema subterrâneo, foram simulados dois casos com circuito duplo.

A Figura 4.6 apresenta, além do posicionamento das fases, as distribuições da densidade de fluxo magnético nos dois circuitos duplos de transmissão subterrâneo, sendo avaliada a disposição convencional das fases – Figura 4.6 (a) – e o melhor posicionamento das fases – Figura 4.6 (b). No sistema de transmissão analisado, a corrente transmitida foi de 827 A, as fases centrais foram enterradas a uma profundidade de 1,5 metros e os cabos foram dispostos no arranjo planar vertical com espaçamento e distância entre os circuitos de 30 centímetros. Para a simulação, os ângulos das fases A, B e C foram considerados 0° , -120° e 120° , respectivamente.

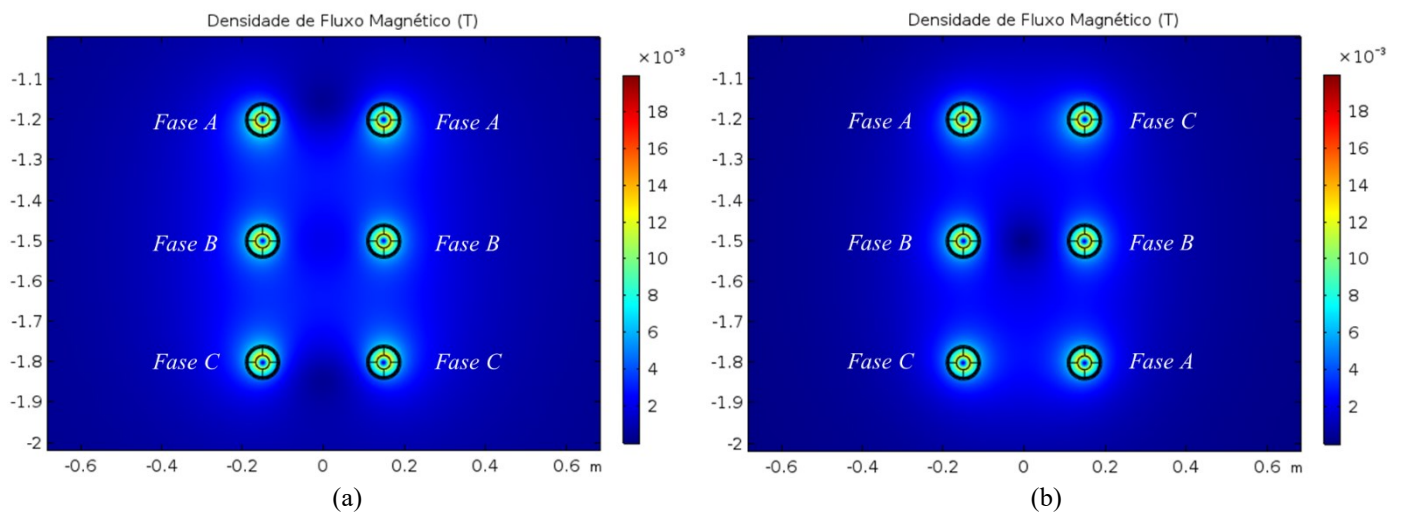


Figura 4.6 - Posicionamento das fases e distribuição da densidade de fluxo magnético para os circuitos duplos: (a) Caso 1 – disposição convencional das fases e (b) Caso 2 – melhor posicionamento das fases.

A Figura 4.7 mostra a comparação dos perfis de campo magnético calculados para os dois posicionamentos das fases do circuito duplo analisado. Em virtude da mudança no posicionamento das fases não afetar na distribuição da temperatura, não são apresentados os resultados térmicos da comparação entre os circuitos duplos.

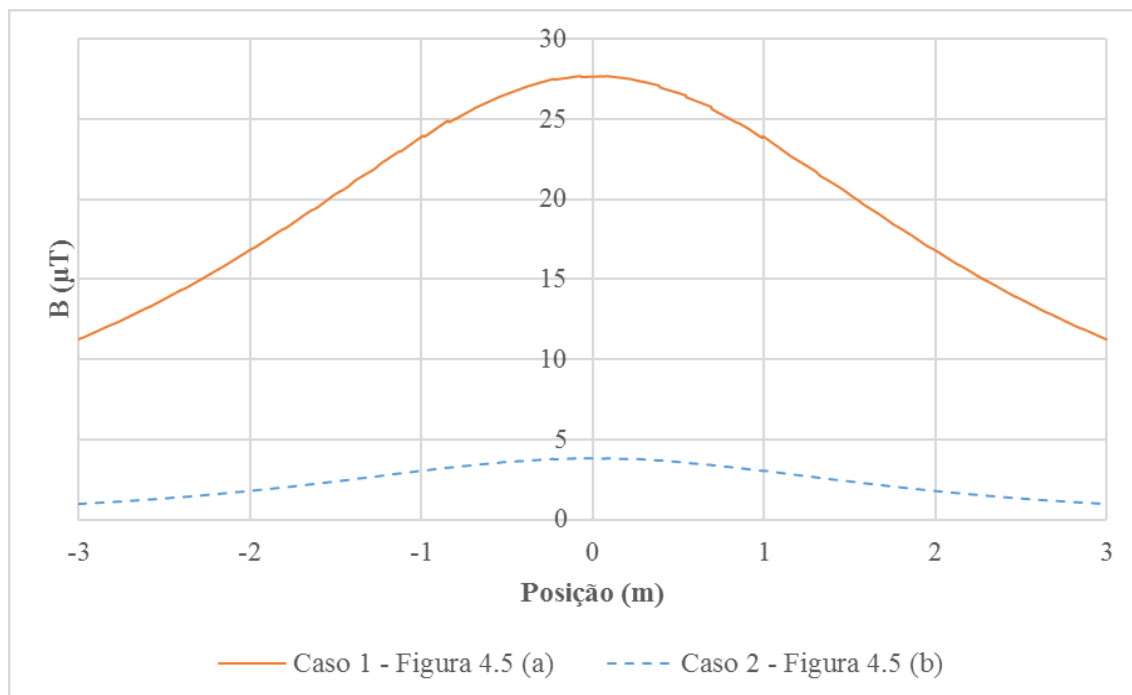


Figura 4.7 - Perfis de campo calculados para os circuitos duplos: Caso 1 e Caso 2

Observando os perfis de campo magnético da Figura 4.7, pode-se perceber que o rearranjo das fases reduz o valor máximo do campo em aproximadamente 7 vezes. O melhor posicionamento das fases faz com que o campo gerado por um circuito seja mitigado pelo campo originado pelo outro circuito, proporcionando assim, um campo resultante de menor intensidade. Logo, no que tange os valores de densidade de fluxo magnético, a melhor disposição das fases nos circuitos poderá viabilizar a utilização de sistemas subterrâneos com múltiplos circuitos.

Em geral, o trecho da caixa de emendas é considerado a região mais crítica do sistema subterrâneo com relação aos valores de campo magnético encontrados. Devido ao tamanho das emendas realizadas, torna-se indispensável um maior afastamento entre os condutores nesse ponto de junção dos cabos, o que resulta em intensidades de campo superiores aos valores obtidos nos trechos convencionais.

Para efeito de comparação com o trecho convencional ilustrado na Figura 4.1, o espaçamento entre os cabos foi modelado em 75 centímetros no trecho da caixa de emendas, como mostrado no posicionamento dos cabos da Figura 4.8. A Figura 4.9 apresenta os perfis de campo calculados considerando o sistema subterrâneo trifásico para o trecho convencional e para a caixa de emendas.

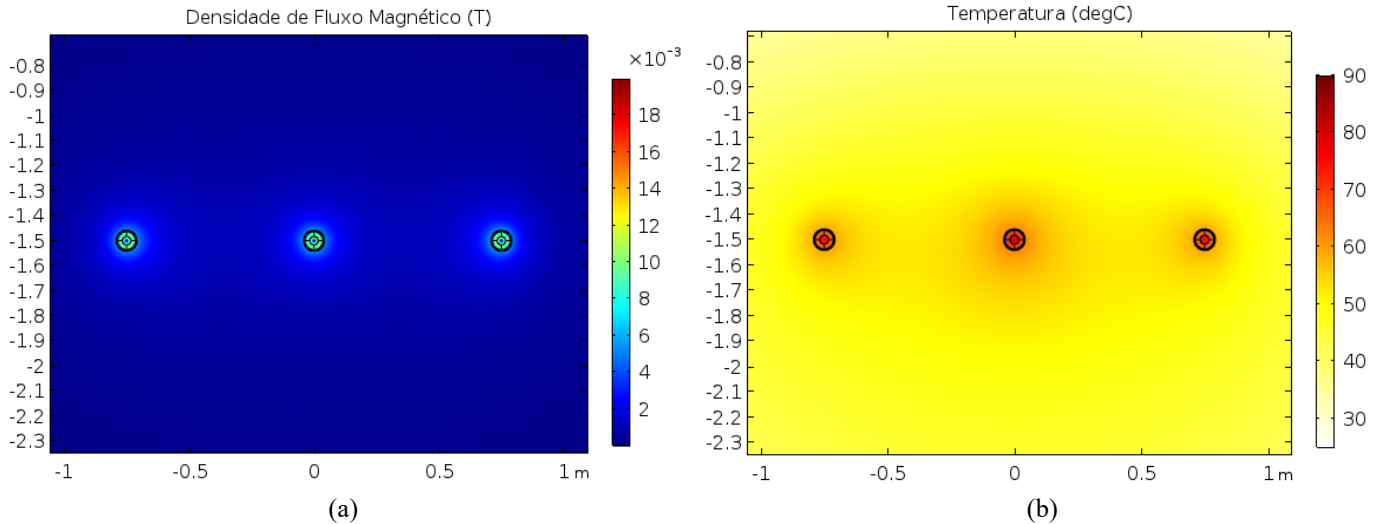


Figura 4.8 - Posicionamento das condutores subterrâneos na caixa de emendas: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) distribuição da temperatura.

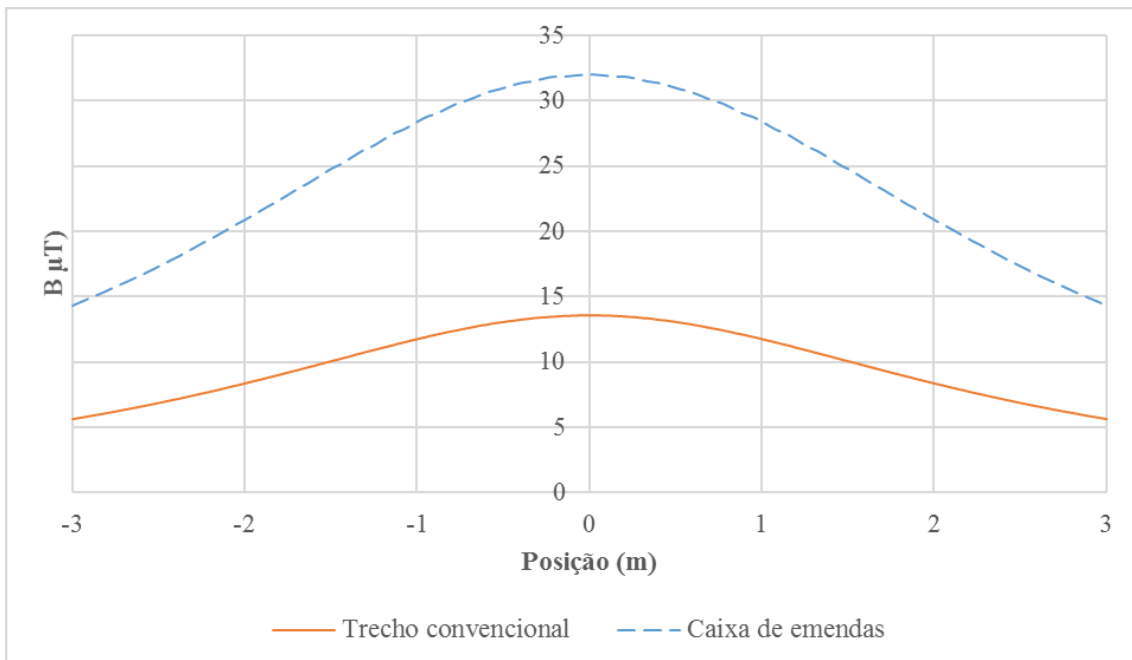


Figura 4.9 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional (espaçamento de 30 centímetros) e para a caixa de emendas (espaçamento de 75 centímetros).

Devido ao maior espaçamento entre as fases do circuito, os valores do campo magnético obtidos nas proximidades das caixas de emendas são consideravelmente superiores aos encontrados nos trechos convencionais. Dessa forma, faz-se necessário o uso de sistemas de blindagem para a redução do campo magnético nas proximidades dessa região e em trechos convencionais para situações com limites mais restritivos de campo.

Além disso, é interessante destacar que o maior afastamento entre os condutores na caixa de emendas resulta na temperatura alcançada inferior à máxima suportável pelo isolamento (90°C), sendo obtida a temperatura de 77,9°C, como mostrada na Figura 4.8(b). Maiores detalhes acerca do projeto de blindagens para o trecho da caixa de emendas do sistema subterrâneo são apresentados no Capítulo 6.

Para circunstâncias em que o rearranjo de condutores não é viável, como no caso de sistemas em operação, ou em situações na qual o valor limite de campo magnético permitido é muito restritivo, como nas proximidades de áreas de risco, faz-se necessário o uso de técnicas de mitigação. Os métodos mais recomendados são os *loops* de compensação e as blindagens metálicas.

4.2.2. *Loops* de Compensação

Os sistemas de compensação analisados nesse trabalho foram os *loops* passivos. Nesse sistema passivo, a própria linha subterrânea é responsável pela indução de corrente no circuito de compensação. Dessa forma, foram modeladas as configurações de *loops* na ausência dos núcleos magnéticos utilizados para acoplar os *loops* com a linha (baixo acoplamento) e na sua presença (alto acoplamento - Figura 2.4). Em todos os casos simulados, foi considerado o mesmo cabo isolado (Tabela 4.1) para modelar os condutores dos *loops*.

Tabela 4.1 - Parâmetros construtivos do cabo de 500 mm² modelado para representar os *loops*.

Diâmetro do Condutor (Cu)	27,3 mm
Espessura da isolação (XLPE)	2,2 mm
Espessura da capa externa (HDPE)	2 mm

Vale ser destacado que, em virtude da simplificação 2D, os condutores dos *loops* também foram considerados infinitamente longos, desprezando, assim, a influência das terminações. Os resultados da técnica de mitigação por meio dos *loops* de compensação são apresentados, primeiramente, para os arranjos com baixo acoplamento e, posteriormente, para os arranjos com alto acoplamento.

4.2.2.1. *Loops* com baixo acoplamento

No estudo dos *loops* com baixo acoplamento, foi analisada a influência do número de laços na eficiência da técnica de mitigação. Para isso, foram simuladas duas configurações com 1 e 4 *loops*, sendo avaliados os efeitos na atenuação do campo gerado pela linha subterrânea e no impacto térmico causado pela presença da blindagem. Nas duas configurações de *loops*, os condutores foram dispostos a 20 centímetros das fases. Para a modelagem dos *loops* com baixo acoplamento, foi imposta a condição de que a corrente resultante no laço de dois condutores é igual a zero, ou seja, a mesma intensidade de corrente induzida que circula por um condutor retorna pelo outro condutor, representado, assim, um laço fechado.

A Figura 4.10 apresenta o posicionamento dos *loops* e as distribuições da densidade de fluxo magnético nos arranjos com 1 e com 4 *loops*. Para a configuração com 1 *loop*, os condutores foram espaçados em 100 centímetros. Já no arranjo com o maior número de condutores (laços), os afastamentos entre os cabos do laço mais interno para o mais externo foram de 40, 80, 120 e 160 centímetros. Os perfis de campo calculados para as blindagens de *loops* com baixo acoplamento e para o trecho convencional sem blindagem são mostrados na Figura 4.11.

Analisando os perfis de campo apresentados na Figura 4.11, observa-se que o arranjo com o maior número de condutores é mais eficaz na atenuação do campo magnético, com fator de redução de 4,10. Nessa configuração, tendo como referência o laço mais interno para o mais externo, as correntes induzidas nos *loops* têm intensidade de 122, 139, 68 e 41 A. Apesar da indução de uma corrente de aproximadamente 177 A no arranjo com 1 *loop*, a configuração com o laço único apresentou um fator redução de apenas 1,79.

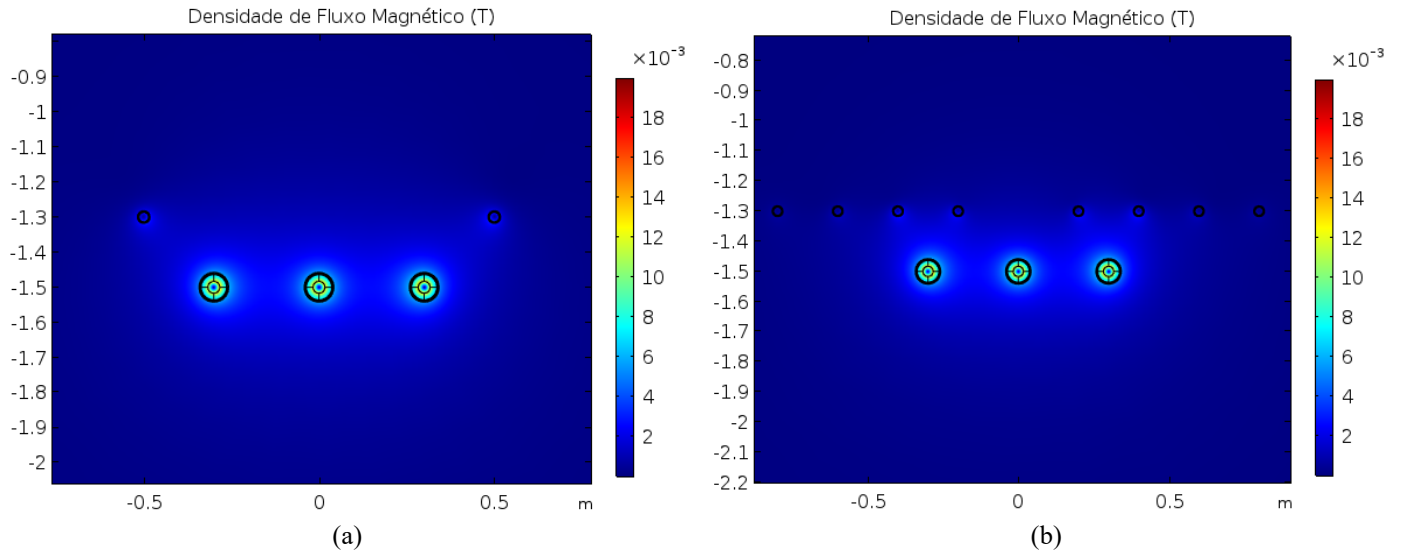


Figura 4.10 - Posicionamento dos *loops* e distribuição da densidade de fluxo magnético das blindagens com laços de compensação de baixo acoplamento: (a) 1 *loop* e (b) 4 *loops*.

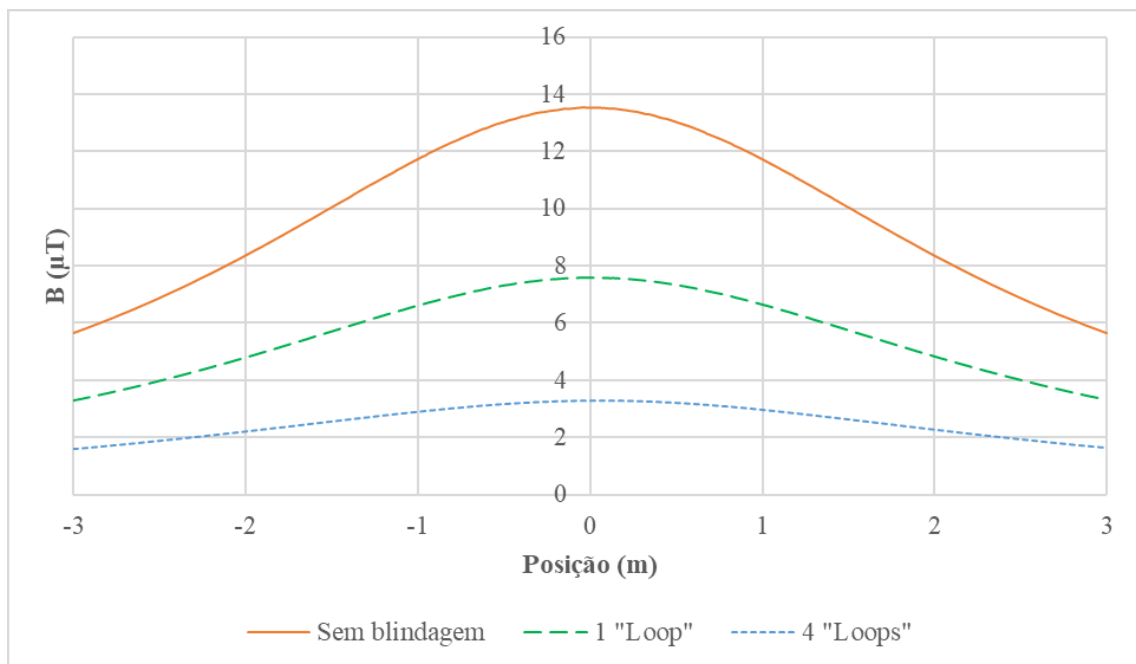


Figura 4.11 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para os *loops* com baixo acoplamento com 1 e 4 *loops*.

A Figura 4.12 apresenta a distribuição da densidade de corrente nos condutores dos arranjos com 1 e 4 *loops*. O aumento do número de laços resulta em uma maior indutância mútua entre os *loops*, acarretando em uma menor corrente induzida em cada laço. Todavia, o campo resultante gerado pelo conjunto de *loops* será maior do que o campo originado pelo arranjo com o laço único, por mais que circule uma corrente de

maior intensidade no arranjo com laço único (177 A). Dessa maneira, o arranjo de 4 *loops* apresenta a maior atenuação do campo gerado pelo sistema subterrâneo, como pode ser visto na Figura 4.11.

Além do número de laços, a distância do sistema de compensação para a linha subterrânea também afeta o nível de atenuação do campo. Os *loops* que são dispostos mais próximos da fonte do campo possuem intensidades maiores de correntes induzidas. Contudo, a distância para o ponto de interesse fica maior, resultando em menores campos magnéticos de compensação. Logo, pode-se perceber que existe uma relação de compromisso entre o posicionamento dos *loops* e a eficácia na atenuação do campo, justificando, assim, trabalhos encontrados na literatura de otimização da configuração dos *loops* de compensação. Além do posicionamento e do número de laços, a seção transversal (bitola) e o tipos dos condutores são fundamentais para o desempenho das blindagens com *loops* de compensação, tanto na mitigação do campo como no impacto térmico provocado.

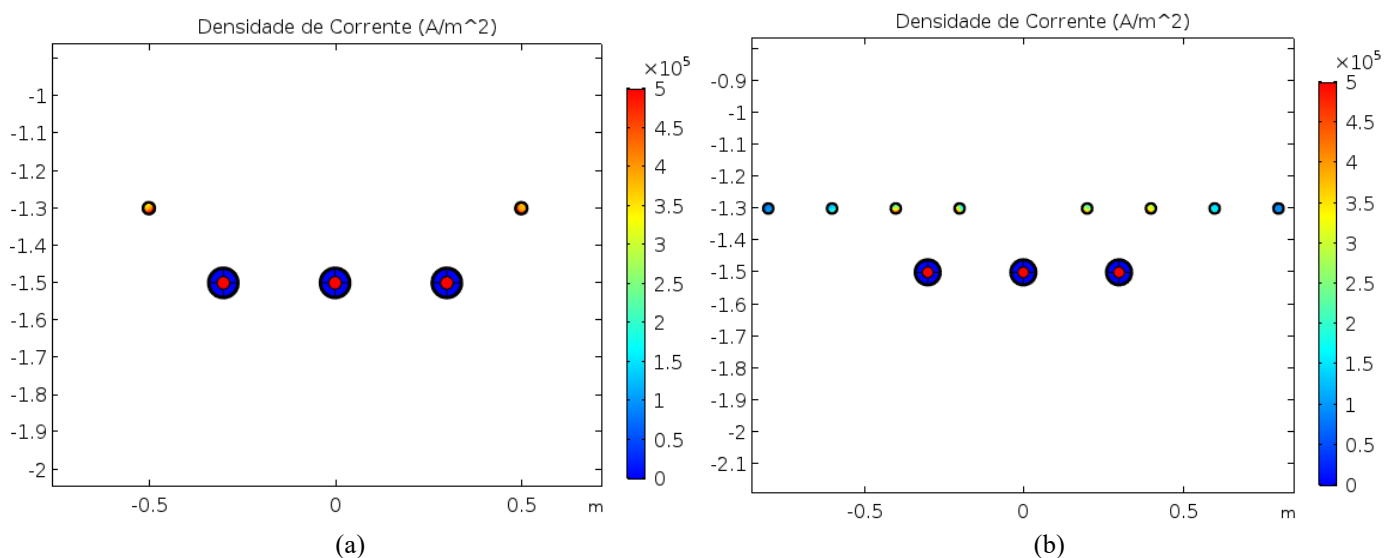


Figura 4.12 - Distribuição da densidade de corrente nos arranjos de *loops* passivos com baixo acoplamento: (a) 1 *loop* e (b) 4 *loops*.

As perdas por efeito Joule nos condutores dos *loops* resultam em um pequeno aquecimento adicional nos cabos do sistema subterrâneo. A Figura 4.13 apresenta a distribuição da temperatura nos arranjos com *loops* passivos de baixo acoplamento. A temperatura calculada no condutor central da linha é semelhante para os arranjos

analisados, sendo de aproximadamente 90,3°C e 90,8°C nos *loops* com 1 e com 4 condutores, respectivamente. Esse valor é superior à temperatura máxima suportável do isolamento XLPE (90°C), fazendo-se necessária a redução na ampacidade do sistema subterrâneo para 825,5 e 823,4 A.

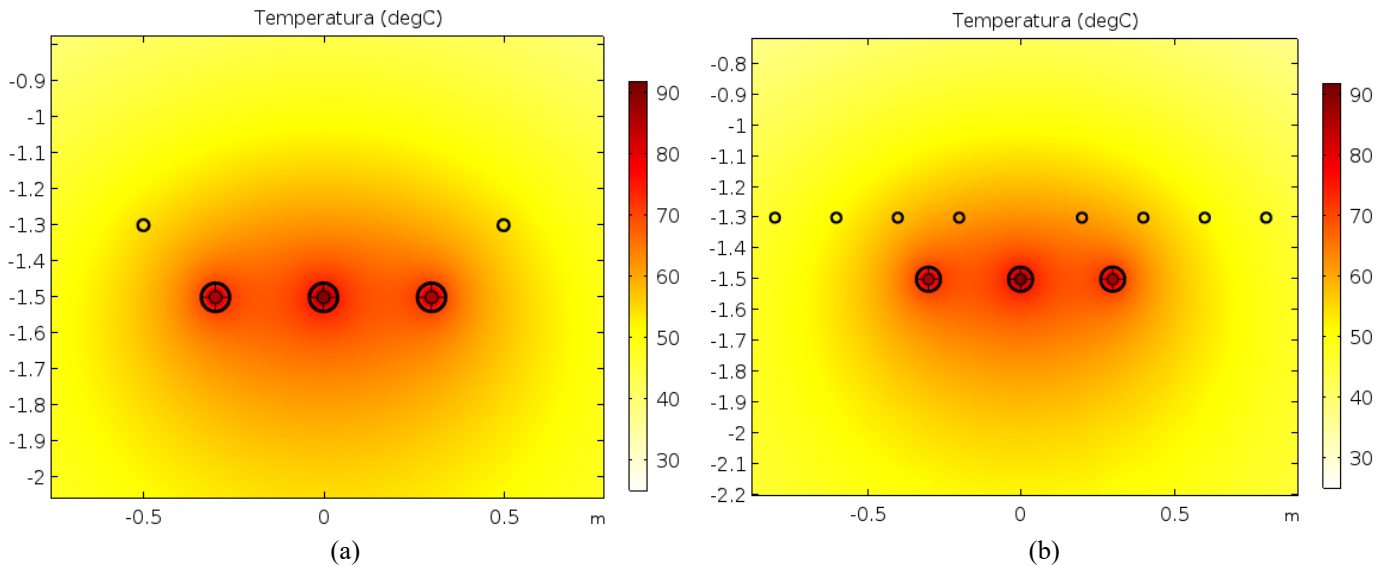


Figura 4.13 - Distribuição da temperatura nos arranjos de *loops* passivos com baixo acoplamento: (a) 1 *loop* e (b) 4 *loops*.

4.2.2.2. *Loops* com alto acoplamento

A blindagem com *loops* com alto acoplamento proporciona fatores de redução mais elevados na comparação com os de baixo acoplamento. Isso se deve à inserção do núcleo magnético que possibilita a circulação de correntes com maiores intensidades no circuito de compensação. Além disso, devido ao acoplamento magnético entre os *loops* e os cabos subterrâneos por meio de núcleos magnéticos, o posicionamento dos *loops* não afeta a intensidade da corrente induzida, permitindo que o sistema de compensação possa ser disposto a uma distância “H” das fases, como ilustrado na Figura 4.14.

Dessa forma, o impacto térmico proveniente do uso da blindagem pode ser minimizado e a potência transmitida pela linha fica menos comprometida. De maneira similar aos *loops* com baixo acoplamento, a intensidade da corrente no circuito de compensação e a distância para as fases do sistema subterrâneo são parâmetros que podem ser otimizados no projeto de sistemas com alto acoplamento.

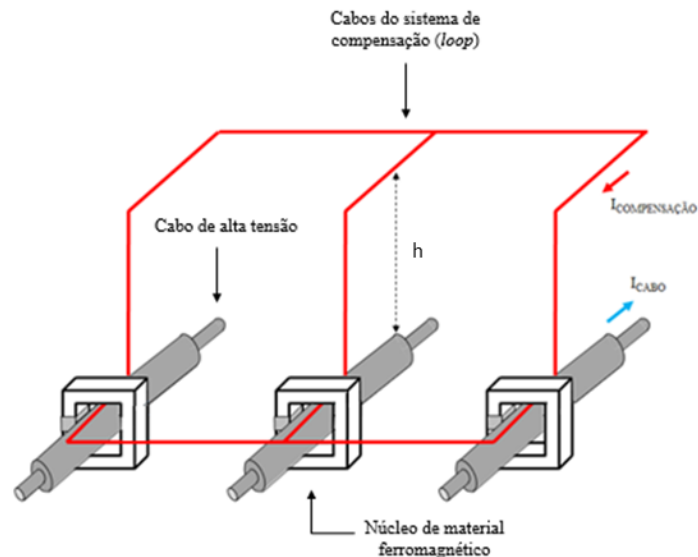


Figura 4.14 - Diagrama do arranjo com alto acoplamento para a distância “h” dos *loops* para os cabos de alta tensão. Adaptada de [5].

Para apresentar as vantagens dessa técnica foram simuladas configurações de *loops* com alto acoplamento, sendo analisadas a variação da altura dos *loops* (h) e do fator de acoplamento⁶ (FA). A modelagem dos *loops* com alto acoplamento foi realizada por meio da inserção das correntes nos condutores dos *loops*, sendo a intensidade determinada pelo FA.

Nessa etapa do estudo de *loops* de compensação com alto acoplamento foram modeladas duas configurações. No primeiro arranjo, os *loops* estão dispostos a 20 centímetros das fases e o fator de acoplamento é de 90%. Na segunda configuração, os laços de compensação estão colocados mais afastados da linha, aproximadamente 50 centímetros, com fator de acoplamento de 70%.

A Figura 4.15 apresenta o posicionamento dos *loops* e as distribuições da densidade de fluxo magnético calculada para a “Configuração 1 (FA: 90%)” e para a “Configuração 2 (FA: 70%)”. Para confrontar a eficácia dos *loops* com alto acoplamento, são comparados na Figura 4.16 os perfis de campo para as dois arranjos analisados.

⁶ Fator de acoplamento (FA): razão entre as intensidades das correntes de compensação e do sistema trifásico.

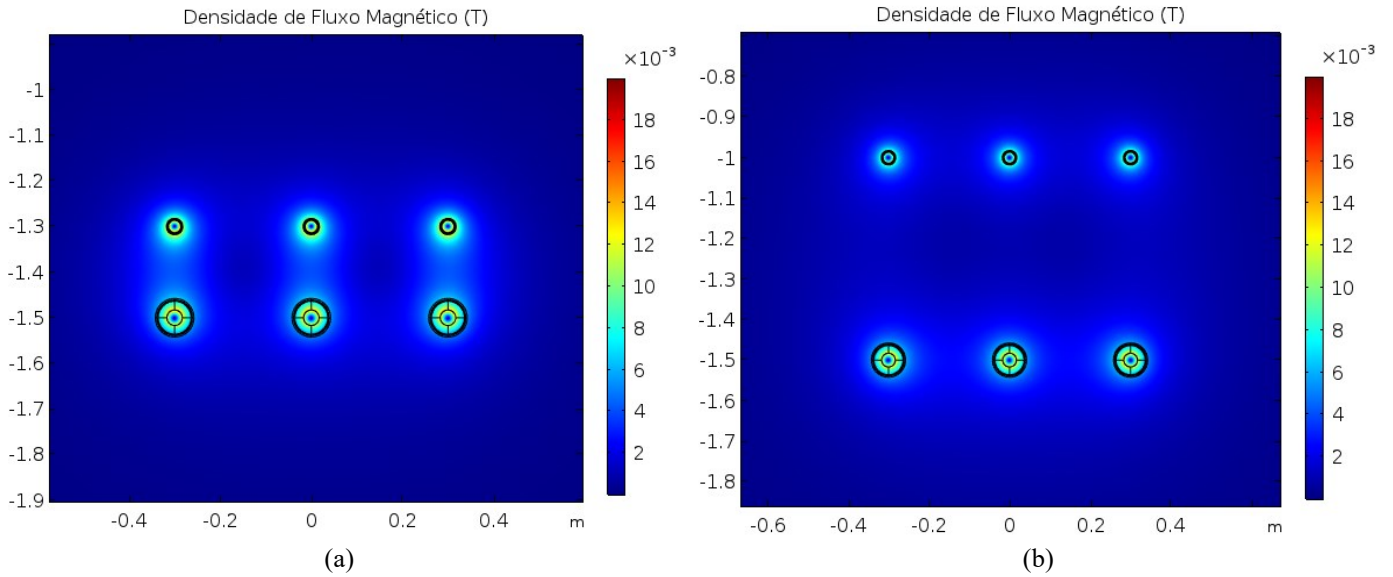


Figura 4.15 - Posicionamento dos *loops* e distribuição da densidade de fluxo magnético das blindagens com laços de compensação de alto acoplamento: (a) Configuração 1 (FA: 90%) e (b) Configuração 2 (FA: 70%).

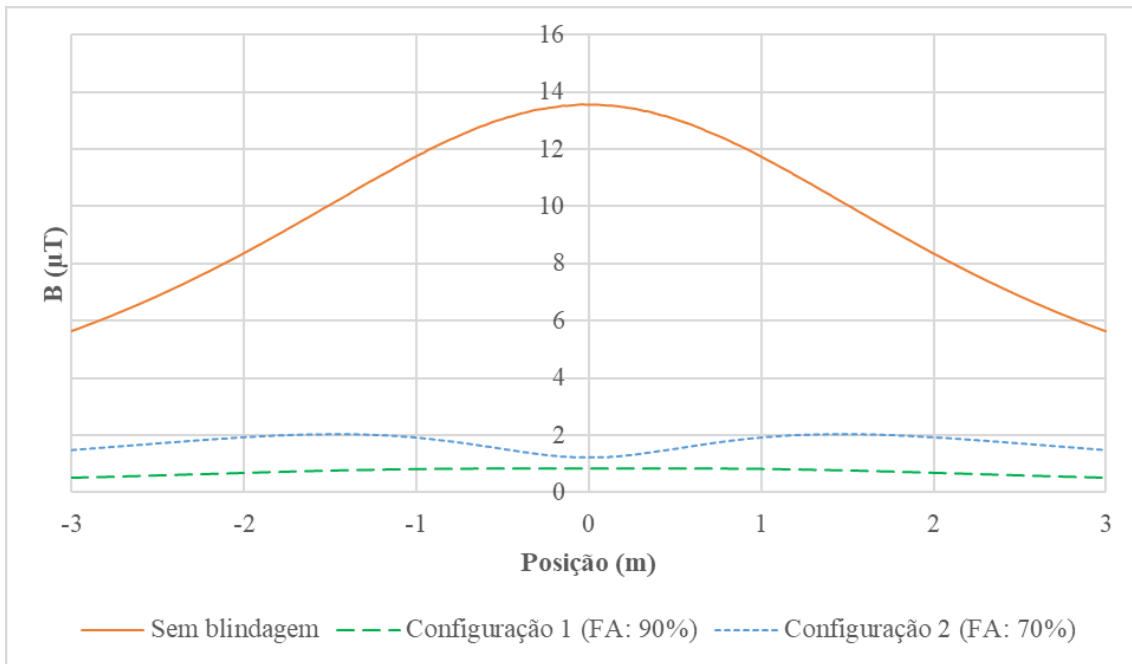


Figura 4.16 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para os *loops* com alto acoplamento: Configuração 1 (FA: 90%) e Configuração 2 (FA: 70%).

Os resultados obtidos para as duas configurações de *loops* com alto acoplamento evidenciam que a inserção do núcleo magnético no sistema de compensação origina um campo resultante inferior a $2 \mu\text{T}$, resultado não alcançado nas configurações com baixo acoplamento. Esse desempenho pode ser creditado principalmente às maiores

intensidades de correntes de compensação obtidas nos arranjos com alto acoplamento, sendo injetadas correntes de aproximadamente 479 A e 744 A nas configurações com FA de 70% e 90%, respectivamente.

O arranjo com o fator de acoplamento de 90% proporciona uma maior atenuação do campo magnético (FR de 16,18) na comparação com a “Configuração 2 (FA: 70%)”, cujo o fator de redução é de 6,66. É interessante destacar que o uso do núcleo magnético possibilita a atenuação do campo sem a necessidade da disposição de um maior número de condutores que formam os *loops*. Por outro lado, a circulação de uma corrente de alta intensidade nas proximidades dos cabos subterrâneos provoca maiores perdas nos *loops* e, conseqüentemente, em uma elevação adicional na temperatura dos condutores da linha. Para quantificar o impacto térmico provocado pela “Configuração 1 (FA: 90%)”, foi calculada a temperatura de 118,2°C no condutor central.

Como discutido anteriormente, para a redução desse impacto recomenda-se um maior afastamento entre *loops* e os cabos subterrâneos e a redução do fator de acoplamento, como realizado na “Configuração 2 (FA: 70%)”. Neste sistema com alto acoplamento, a temperatura calculada na fase central é de 100,5°C, valor superior à temperatura máxima admissível, mas consideravelmente inferior à elevação provocada pelo arranjo com fator de acoplamento de 90%. A Figura 4.17 apresenta os resultados das distribuições da temperatura nas configurações de *loops* com alto acoplamento.

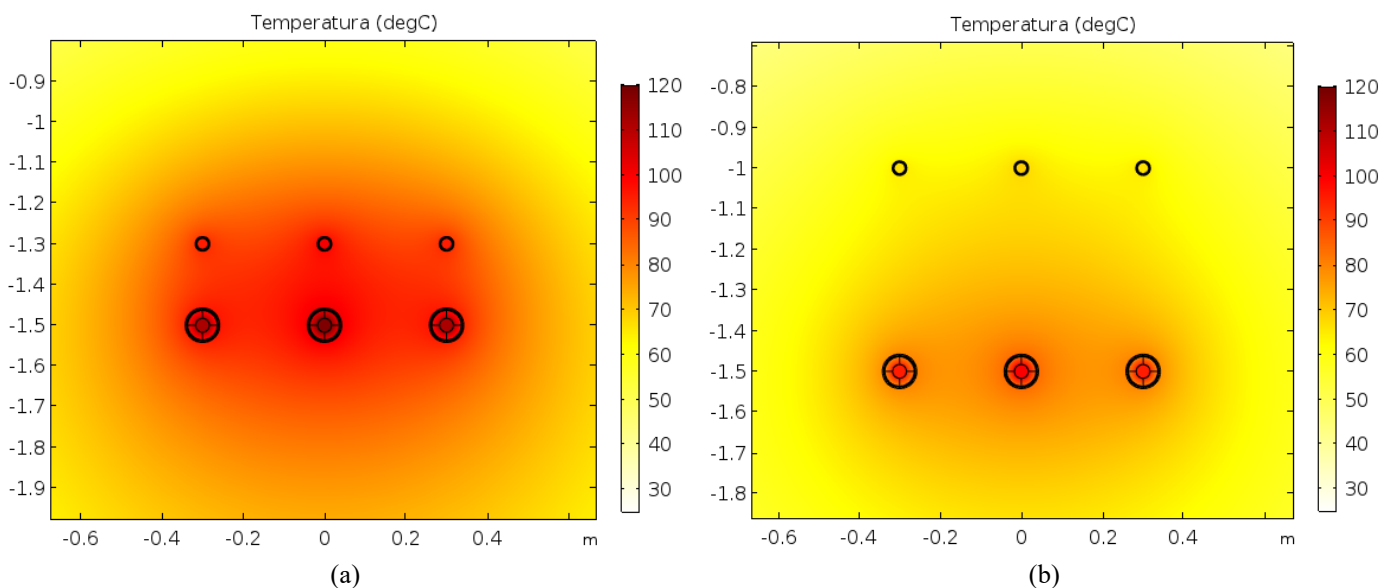


Figura 4.17 - Distribuição da temperatura nos arranjos de loops passivos com alto acoplamento: (a) Configuração 1 (FA: 90%) e (b) Configuração 2 (FA: 70%).

Para quantificar a perda na capacidade de transmissão, são calculados os novos valores de ampacidade da linha de 712 e 777 A para o trecho convencional com a presença do sistema de blindagem dos *loops* com FA de 90% e 70%, respectivamente. A configuração com maior fator de acoplamento resulta em uma perda na potência transmitida de aproximadamente 14%.

Diante do exposto, para os *loops* com alto acoplamento, percebe-se que existe uma relação de compromisso entre a eficácia da blindagem e o impacto térmico provocado. Para análise dessa relação de compromisso no desempenho da blindagem podem ser utilizadas técnicas de otimização multiobjetivo nas etapas de projeto [5].

Uma outra alternativa para minimizar o impacto térmico é a divisão dos circuitos dos *loops* em múltiplos condutores no entorno do cabo subterrâneo, como a configuração de *loops* proposta em [18].

Na técnica do *High Magnetic Coupling Passive Loop* (HMCPL) [18], são dispostos quatro condutores no entorno de cada uma das fases do sistema subterrâneo. Com a divisão dos circuitos de compensação é possível a utilização de FA maiores e próximos de 100%, resultando na maior eficácia da blindagem. A Figura 4.18 apresenta o posicionamento dos *loops* nessa configuração e uma fotografia de uma montagem do HMCPL em um trecho real de linha subterrânea .

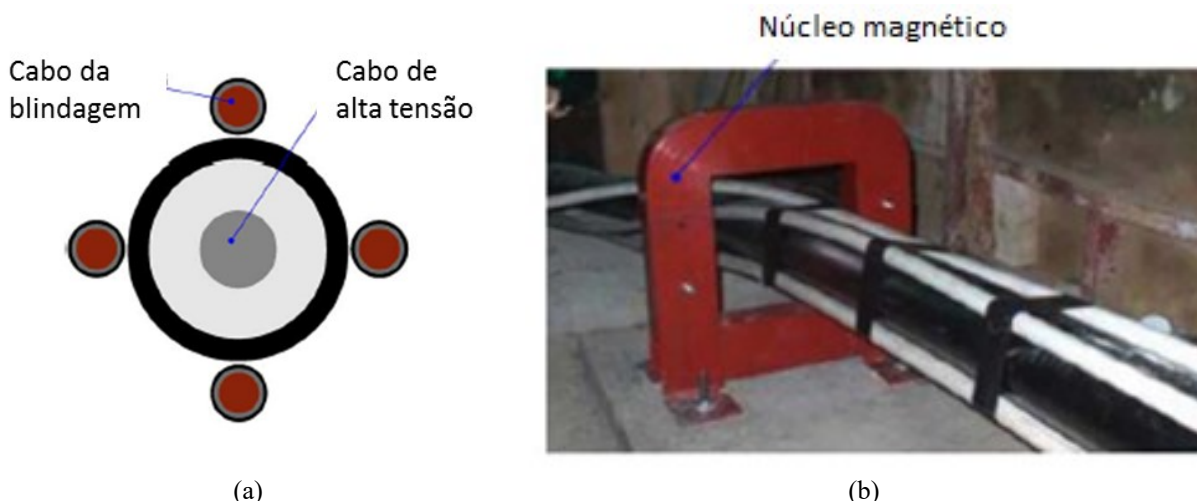


Figura 4.18 - *High Magnetic Coupling Passive Loop*: (a) posicionamento dos *loops* no entorno da fase e (b) fotografia da montagem. Adaptada de [18].

A técnica do HMCPL foi umas técnicas de blindagens construídas no Laboratório de Extra e Alta Tensão (LEAT) da UFMG durante o Projeto de P&D CEMIG D – ANEEL Nº 318, “Linhas de Distribuição Subterrânea: Soluções para Mitigação de Interferências Eletromagnéticas e Monitoramento da Integridade do Isolamento, sem Comprometimento da Capacidade de Transmissão de Energia”. As Figuras 4.19 e 4.20 apresentam algumas das fotografias da montagem realizada no laboratório para mostrar o posicionamento dos condutores dos *loops* no entorno dos cabos que representam a fonte de campo. A título de informação, foi obtido um fator de redução de aproximadamente 16 com montagem do HCMPL realizada no LEAT.



Figura 4. 19 - Fotografia da montagem da blindagem HMCPL realizada no LEAT da UFMG.



Figura 4.20 - Disposição dos *loops* na montagem da blindagem do HMCPL realizada no LEAT.

Nesse estudo computacional, para simular o HMCPL, os cabos dos *loops* foram modelados de acordo com os parâmetros descritos na Tabela 4.1 e a distância entre os condutores para a linha é de 10 centímetros. Assim como no HMPCL proposto em [18], o fator de acoplamento considerado é de 95%, induzindo em cada um dos cabos da blindagem a corrente de aproximadamente 196 A.

A Figura 4.21 apresenta o posicionamento dos *loops* no HMCPL (distância de 10 centímetros das fases) e a simulação da distribuição da densidade de fluxo magnético para essa blindagem. Além disso, é comparado na Figura 4.22 o perfil de campo do HMCPL com os perfis de campo calculados para as outras configurações de *loops* com alto acoplamento.

Dentre as técnicas de *loops* de compensação, o HMCPL se mostra mais eficaz na redução do campo gerado pela linha, resultando em um FR de 20,1. Esse fator de redução é obtido em razão do fator de acoplamento utilizado (95%) e do posicionamento dos *loops* no entorno de cada uma das fases.

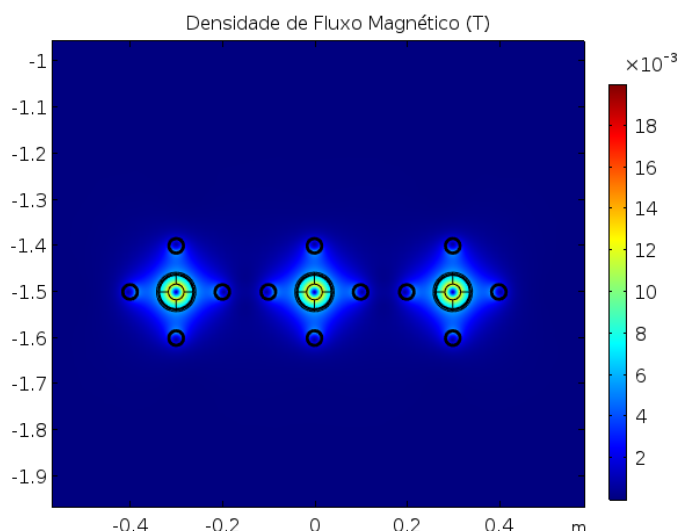


Figura 4.21 - Posicionamento dos *loops* e distribuição da densidade de fluxo magnético das blindagens HMCPL.

Como esperado, a utilização de um número maior de condutores e, conseqüentemente, da circulação de correntes de intensidades mais baixas, resulta no menor impacto térmico causado pela blindagem do HMCPL comparado às outras configurações de *loops* com alto acoplamento. A temperatura calculada na fase central do

sistema subterrâneo é de 99°C como mostra a Figura 4.23, valor consideravelmente inferior à temperatura obtida de 118,2°C na “Configuração 1 (FA: 90%)”. Essa elevação de temperatura alcançada no HMCPL resulta na redução da capacidade de transmissão do sistema para aproximadamente 189 MVA.

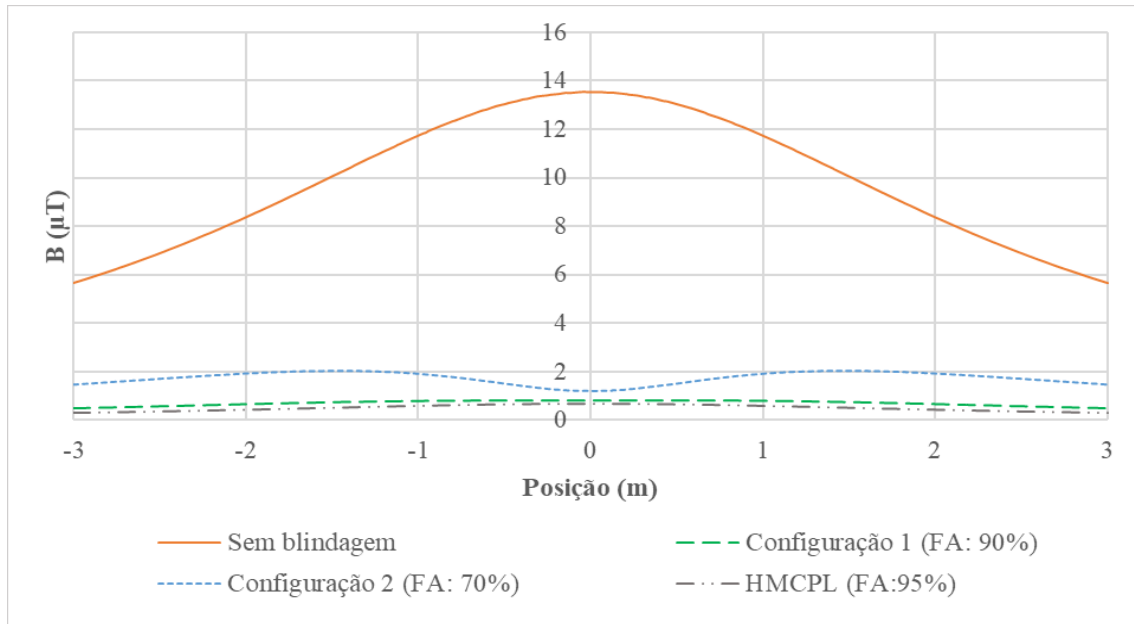


Figura 4.22 - Comparação dos perfis de campo do HMCPL com os perfis de campo calculados para as outras blindagens de *loops* com alto acoplamento.

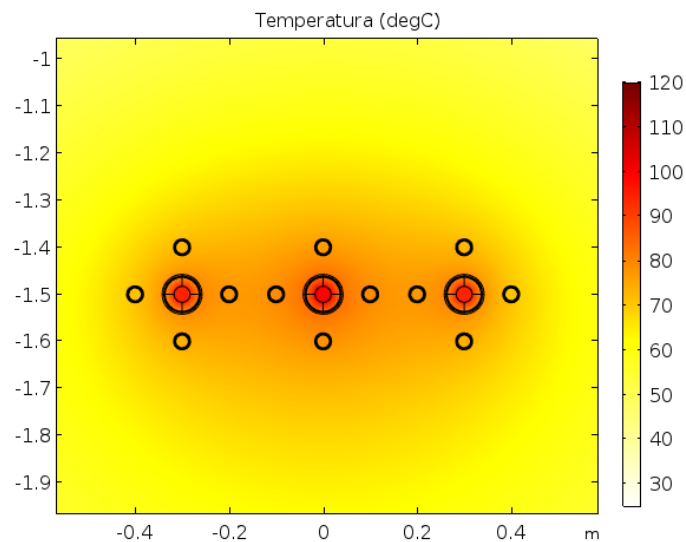


Figura 4.23 - Distribuição da temperatura no arranjo HMCPL.

4.2.2.3. Fatores de redução e impactos na capacidade de transmissão de potência da linha

A fim de comparar as diferentes configurações de *loops* de compensação analisados no presente estudo, determinou-se o fator de redução (FR) de cada *loop* passivo pela equação (2.7). Os valores calculados dos fatores de redução são apresentados na Figura 4.24.

Analisando os FR calculados, pode-se inferir que, devido à inserção do transformador de corrente, as configurações de alto acoplamento apresentam a maior eficácia de blindagem. Contudo, devido à maior intensidade das correntes de compensação, a elevação adicional da temperatura nas fases da linha é superior nas configurações com uso dos núcleos magnéticos.

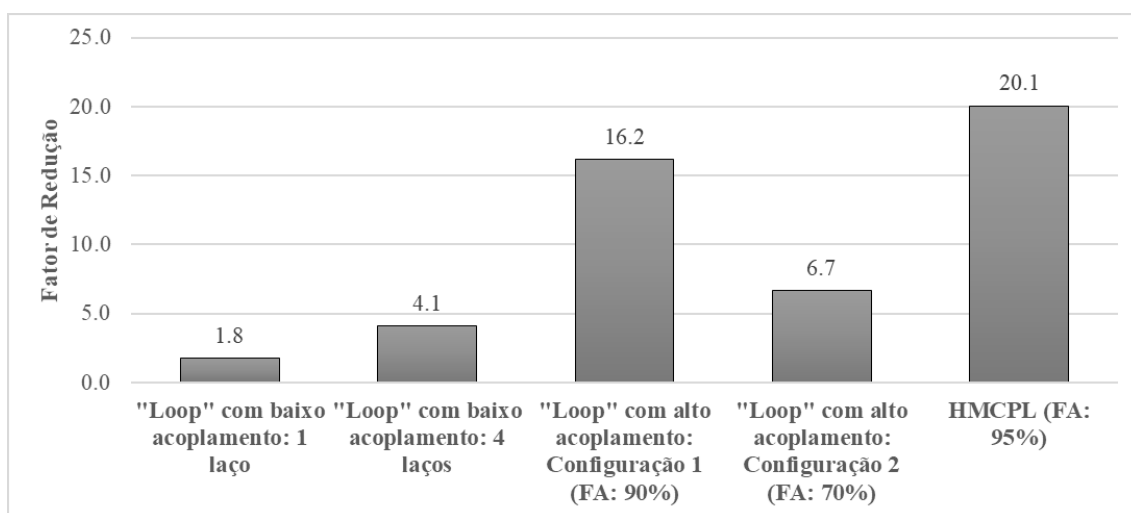


Figura 4.24 - Fatores de redução calculados para os *loops* de compensação com baixo e alto acoplamento.

É importante destacar que o maior afastamento entre os laços de compensação e a linha subterrânea reduz o impacto térmico provocado pela blindagem, porém o efeito do sistema de compensação ainda é considerável. Para minimizar o sobreaquecimento, é necessário colocar os *loops* com alto acoplamento mais afastados do sistema subterrâneo. Em virtude de outros circuitos e tubulações subterrâneas, um posicionamento mais próximo do nível do solo pode ser inviável para a instalação na obra civil.

Com relação aos *loops* de baixo acoplamento, a eficácia de blindagem pode ser elevada tanto com o aumento do número de condutores, como apresentado no presente

trabalho, como na inserção de capacitores de compensação no circuito dos *loops*. A presença do núcleo magnético eleva o custo da técnica de blindagem com alto acoplamento em relação as soluções de baixo acoplamento. No entanto, algumas configurações de alto acoplamento possuem comprimentos menores dos cabos dos *loops*, podendo tornar essa solução financeiramente mais viável.

Além das comparações dos fatores de redução, determinou-se a perda na capacidade de transmissão de potência provocada pelos *loops* de compensação de baixo e alto acoplamento. A perda foi calculada a partir da redução percentual da potência transmitida pelo sistema trifásico, sendo adotada a potência nominal de 200 MVA para linha ilustrada na Figura 4.1. A Figura 4.25 apresenta os resultados do impacto proporcionado pela blindagem na capacidade de transmissão da linha.

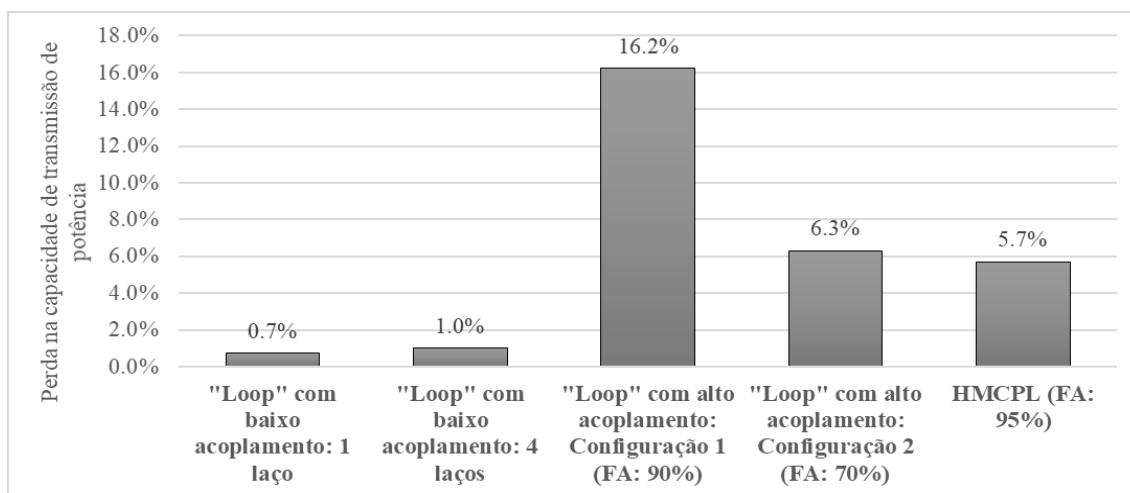


Figura 4.25 - Perda na capacidade de transmissão de potência calculada para os *loops* de compensação com baixo e alto acoplamento.

Observando os resultados obtidos, pode-se perceber que as perdas na potência transmitida apresentam a mesma tendência dos valores calculados para as temperaturas nas fases da linha subterrânea, sendo a configuração com FA de 90% o arranjo que resultou no maior impacto térmico. A divisão do sistema de compensação em múltiplos condutores no arranjo do HMCPL resultou no menor impacto na capacidade de transmissão na comparação com os *loops* de alto acoplamento.

As perdas por efeito Joule nos condutores dos *loops* são proporcionais ao quadrado da corrente. Logo, por mais que se tenha mais condutores no entorno das fases,

a potência dissipada por cada um é quatro vezes menor, resultando em um impacto térmico menor na comparação do HMCPL (FA: 95%) com a Configuração 1 (FA: 90%). Dessa forma, apesar do maior número de cabos e das presenças dos núcleos magnéticos elevarem o custo da blindagem, a técnica do HMPCL torna-se a melhor solução para a aplicação em situações reais nas quais é necessária uma maior atenuação do campo sem tanto impacto na potência transmitida.

Diante disso, pode-se notar que existe uma relação de compromisso entre a eficácia da atenuação, a perda na capacidade de transmissão e o custo (complexidade) da blindagem. Como descrito anteriormente, algoritmos de otimização multiobjetivos podem ser utilizados no projeto de blindagens com *loops* de compensação [5].

No caso das configurações analisadas no presente estudo, o projeto dos *loops* de baixo acoplamento pode otimizar os seguintes parâmetros construtivos: seção transversal, material do condutor, posicionamento e número de laços. Já para o projeto dos *loops* com alto acoplamento pode-se otimizar as características do condutor, fator de acoplamento e a posição do sistema de compensação. A utilização de algoritmos de otimização para o projeto de *loops* possibilita o desenvolvimento de configurações com melhor desempenho na atenuação do campo.

Dessa forma, é possível reduzir o campo para valores inferiores aos limites sem o comprometimento elevado da capacidade de transmissão de potência. Todavia, essa análise não é foco de estudo do presente trabalho. Um estudo detalhado sobre a determinação das configurações ótimas dos *loops* de compensação pode ser encontrado em [5], dissertação de mestrado do autor.

4.2.3. Blindagem com Materiais Metálicos

No estudo da blindagem do campo magnético de baixa frequência por meio de materiais metálicos, foram avaliadas as configurações aberta e fechada. Devido ao melhor desempenho nas configurações de blindagens, foram utilizados materiais condutivos na configuração aberta e materiais ferromagnéticos na configuração fechada. Novamente, em virtude da simplificação 2D, as chapas foram consideradas infinitamente longas, sendo desprezados os efeitos provenientes da representação das terminações das placas.

Os materiais considerados no estudo das blindagens metálicas foram cobre, alumínio e aço SAE 1018. As principais propriedades desses materiais são listadas na Tabela 4.2. Em virtude do comportamento não linear da curva de magnetização do aço SAE 1018, foi utilizada a curva de magnetização apresentada na Figura 4.26.

Tabela 4.2 - Parâmetros dos materiais utilizados nas blindagens metálicas.

Material	Condutividade elétrica (MS/m)	Permeabilidade relativa	Condutividade térmica (W/K.m)
Cobre	58,0	1	400
Alumínio	35,4	1	237
SAE 1018	5,8	-	43

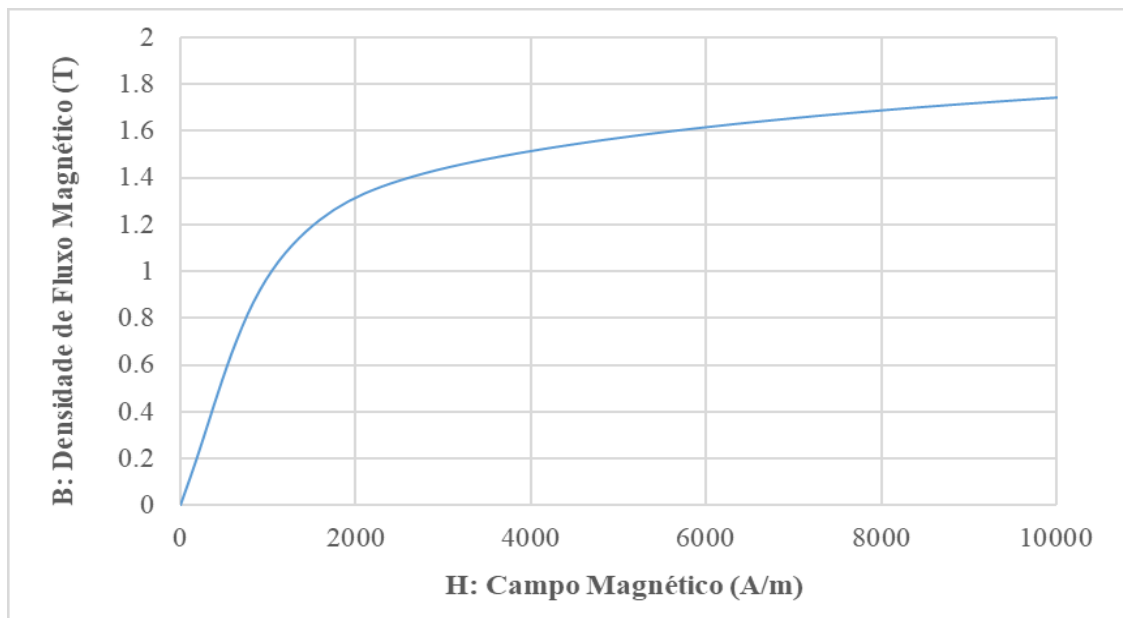


Figura 4.26 - Curva B x H do aço SAE 1018. Dados fornecidos pelo COMSOL.

Observando a Figura 4.26, pode-se perceber que os valores de densidade de fluxo magnético existentes na curva de magnetização do aço são consideravelmente superiores aos valores obtidos nas simulações de cabos subterrâneos (ordem de mT a μ T). Dessa forma, na maioria dos projetos de blindagens com materiais ferromagnéticos, necessita-se de estimar os valores iniciais da curva de magnetização e, por consequência, a permeabilidade magnética relativa do aço. Como discutido nos Capítulos 2 e 3, o desconhecimento das propriedades dos materiais ferromagnéticos pode ocasionar à erros nos projetos de blindagens com aço, resultando em discrepâncias na eficácia da redução

do campo entre simulações computacionais e medições experimentais. Vale ressaltar que devido à essa dificuldade a permeabilidade magnética relativa foi estimada a partir da curva de magnetização da Figura 4.26 no estudo apresentado nesse capítulo. Os resultados do desempenho das blindagens com chapas metálicas nas configurações aberta e fechada são detalhados a seguir.

4.2.3.1. Configuração aberta

Com o intuito de analisar as blindagens abertas, foram simulados os arranjos com a chapa plana, em “U” invertido e em “H”. Em todas as configurações abertas, as chapas têm 3 milímetros de espessura e são dispostas a 20 centímetros dos cabos subterrâneos. A Figura 4.27 apresenta as dimensões das chapas plana, em “U” invertido e em “H” analisadas no estudo das blindagens abertas.

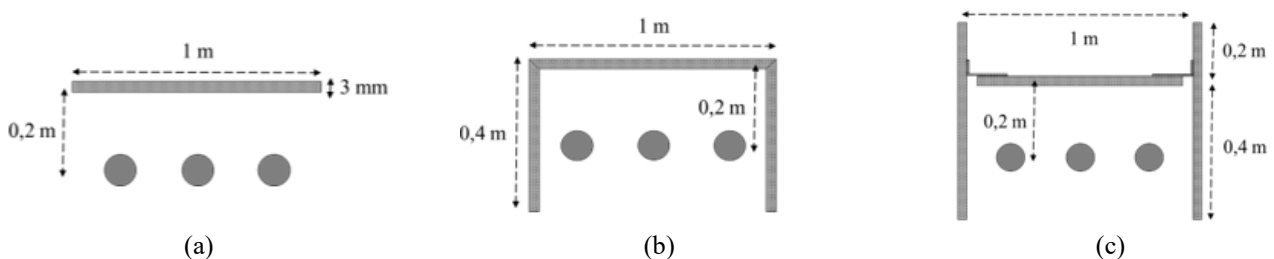


Figura 4.27 - Dimensões das blindagens abertas estudadas: (a) chapa plana, (b) chapa em “U” invertido e (c) chapa em “H”.

Os contatos elétricos entre as placas foram considerados ideais, de forma a representar a soldagem das chapas em uma montagem real. Além disso, optou-se pelas chapas de cobre ou de alumínio no estudo das configurações metálicas abertas. A escolha desses materiais ocorreu, pois, nas configurações abertas, as correntes induzidas na blindagem são as responsáveis pela geração do campo que irá se opor ao campo originado pela fonte. Logo, os materiais com maior condutividade elétrica apresentam maior eficácia na atenuação do campo magnético nas configurações abertas.

Inicialmente, foi simulada a configuração aberta da chapa plana horizontal com 1 metro de largura. Em cada uma das configurações, foi analisado o desempenho da blindagem, ou seja, calculada a eficácia na atenuação do campo e o impacto térmico provocado no sistema subterrâneo.

A Figura 4.28 apresenta a comparação dos perfis de campo calculados para a chapa plana de cobre e de alumínio com os valores do campo magnético no trecho convencional de uma linha subterrânea. Além disso, para exemplificar os valores calculados, são apresentadas, na Figura 4.29, a distribuição da densidade de fluxo magnético e as linhas de campo na presença da blindagem com a chapa plana de alumínio.

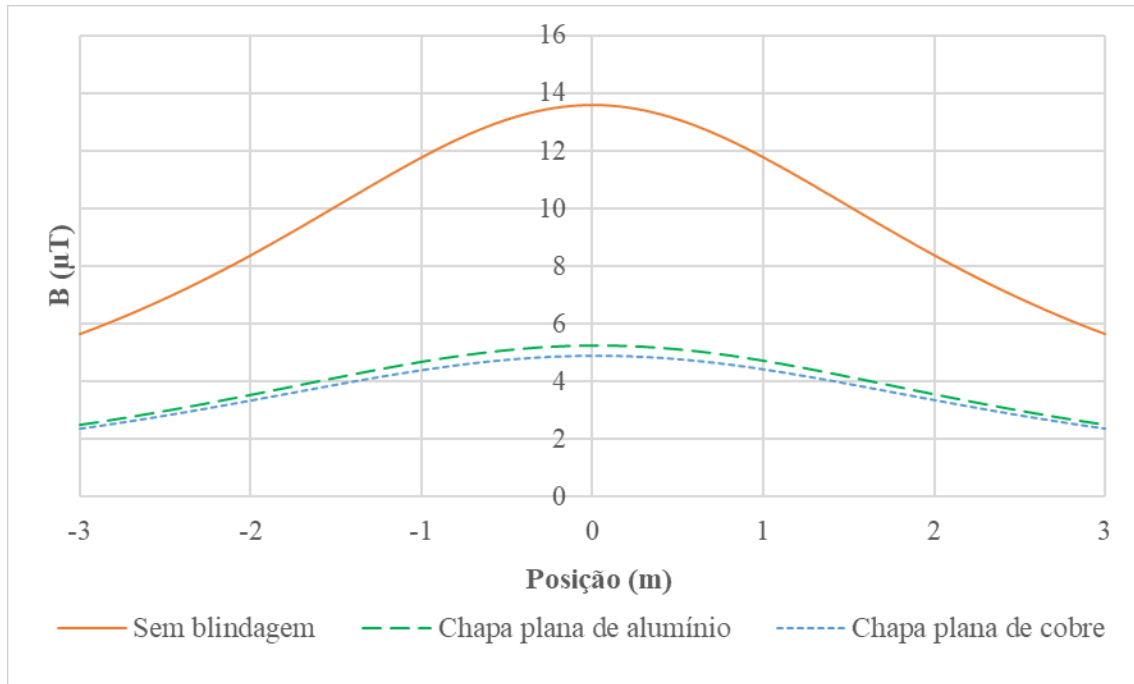


Figura 4.28 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para o uso da chapa plana de cobre e de alumínio.

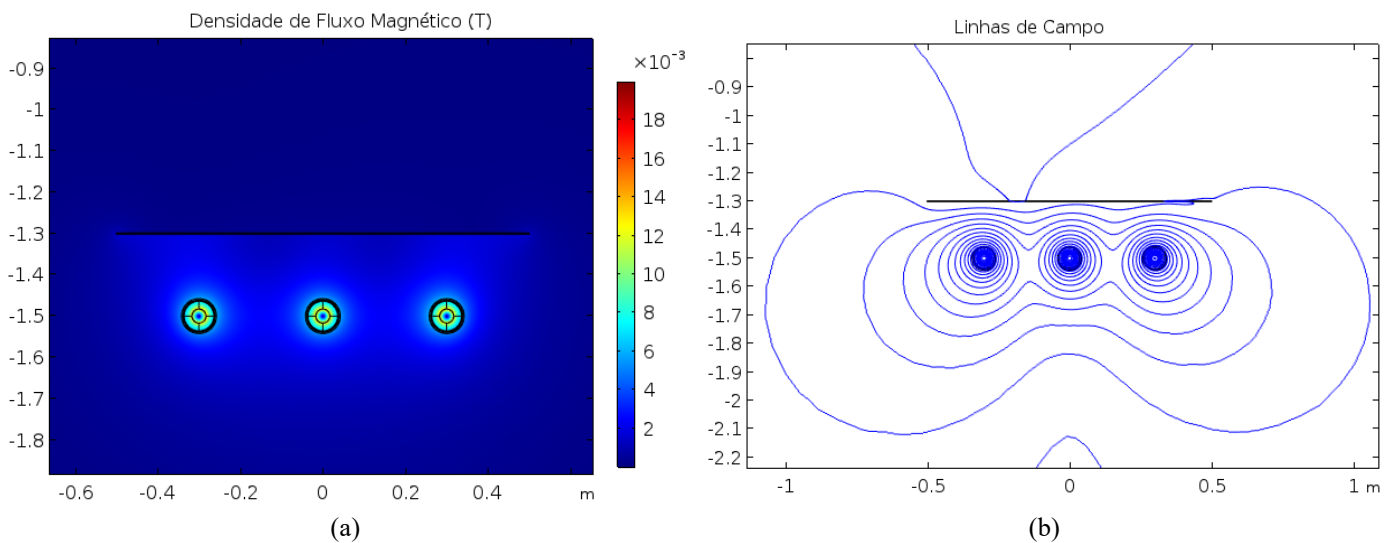


Figura 4.29 - Blindagem com chapa plana de alumínio: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.

Em virtude da condutividade elétrica do cobre ser superior à do alumínio, em torno de 40%, a eficácia da blindagem com chapa de cobre foi superior à de alumínio, como pode ser observado pelos perfis de campo da Figura 4.28. Dessa forma, os fatores de redução obtidos são 2,78 e 2,58 para as chapas de cobre e de alumínio, respectivamente.

Com relação ao impacto térmico, a chapa de cobre apresenta melhor desempenho em comparação com a chapa de alumínio, uma vez que o cobre possui maior condutividade elétrica, resultando em menores perdas por Efeito Joule, e maior condutividade térmica, facilitando a dissipação do calor.

A temperatura final calculada no condutor central com a presença da chapa de cobre é de 90,4°C, enquanto que na blindagem de alumínio foi de 91,8°C. Sendo assim, a redução na ampacidade proporcionada pelo uso da chapa de cobre (0,3%) é inferior à de alumínio (1,2%). A Figura 4.30 apresenta a distribuição da temperatura para as blindagens com as chapas planas de cobre e de alumínio.

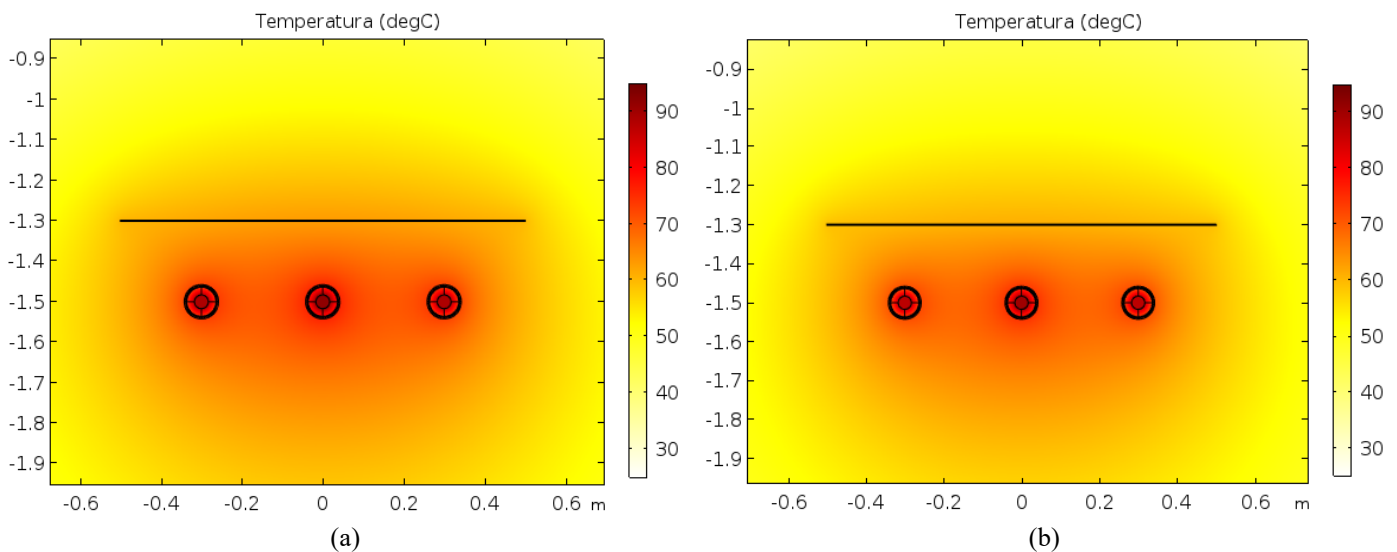


Figura 4.30 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem com chapa plana: (a) alumínio e (b) cobre.

A mesma análise do desempenho da blindagem foi feita para a configuração com a chapa em “U” invertido. Para esse formato de chapa, foram dispostas duas placas verticais de 40 centímetros nas extremidades laterais da chapa plana horizontal. A Figura 4.31 apresenta os perfis de campo calculados para as chapas de cobre e de alumínio. Novamente, para exemplificar os resultados calculados, a Figura 4.32 apresenta

distribuição da densidade de fluxo magnético e as linhas de campo para a blindagem com chapa de cobre em “U” invertido.

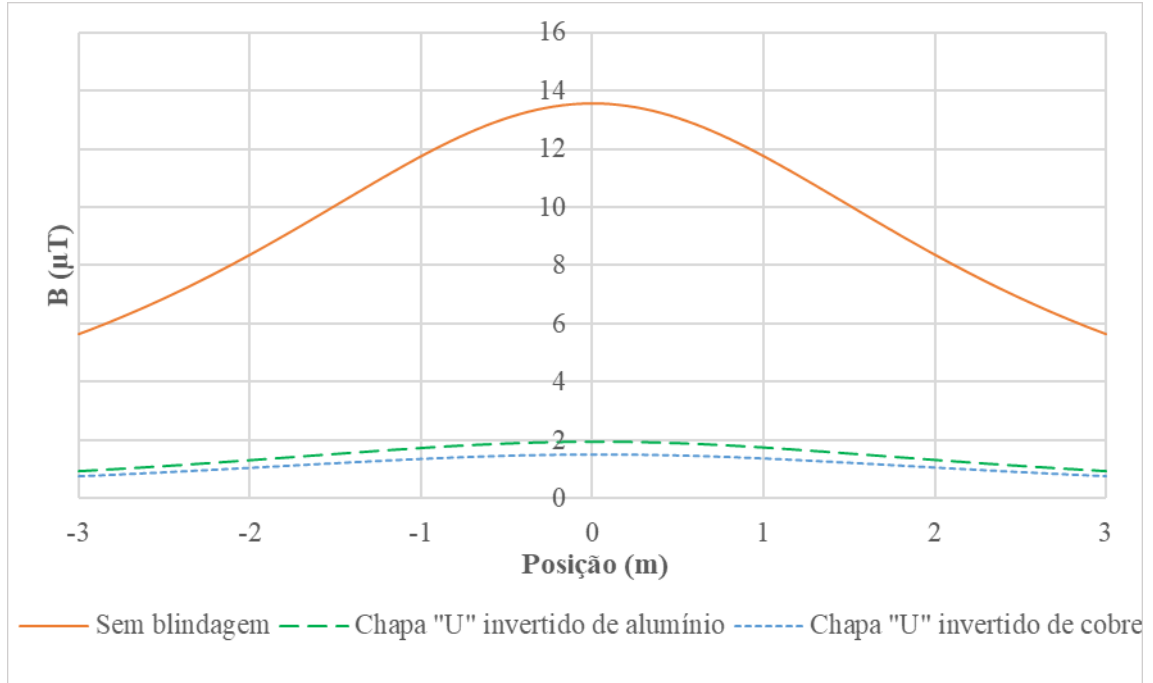


Figura 4.31 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para o uso da chapa de cobre e de alumínio em “U” invertido.

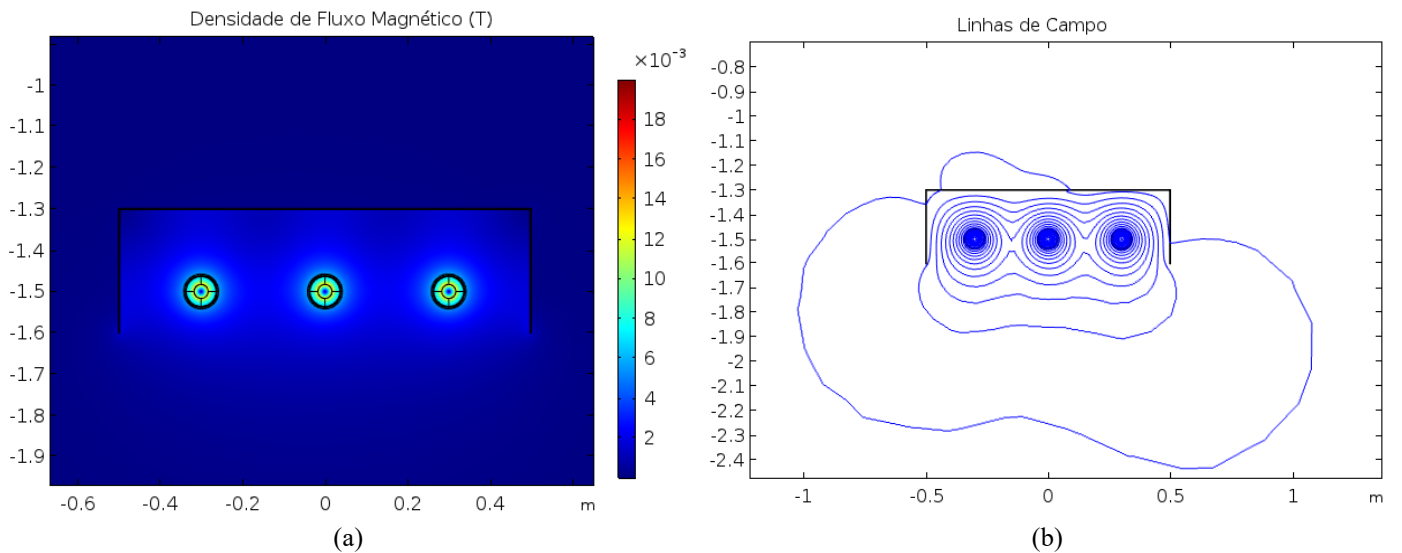


Figura 4.32 - Blindagem com chapa de cobre em “U” invertido: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.

Analisando os resultados obtidos, pode-se concluir que a chapa em “U” invertido apresenta maior eficácia na atenuação de campo quando comparada à placa plana horizontal. Os FR determinados pela blindagem no formato de “U” são 9,06 e 7,00 para as chapas de cobre e alumínio, respectivamente.

A presença das placas verticais diminui a dispersão do campo magnético pelas extremidades da placa horizontal, como pode ser observado na Figura 4.32 (b), promovendo uma maior eficácia na atenuação do campo gerado pelos cabos subterrâneos. Além de reduzir a dispersão do campo, a presença das placas laterais faz com que circulem correntes induzidas nessas placas, originando o campo de mitigação superior ao gerado pela chapa plana.

Com relação ao desempenho térmico, os resultados da temperatura apresentam a mesma tendência da chapa plana, ou seja, as placas de alumínio promovem um aquecimento adicional superior às placas de cobre. A temperatura calculada no condutor central da linha subterrânea é 90,2°C e 92,0°C para as chapas de cobre e de alumínio, respectivamente. O aquecimento adicional no condutor central resulta na redução da capacidade de transmissão em aproximadamente 0,2% e 1,3% para as chapas de cobre e de alumínio. A Figura 4.33 mostra a distribuição da temperatura para a blindagem com chapas em “U” invertido.

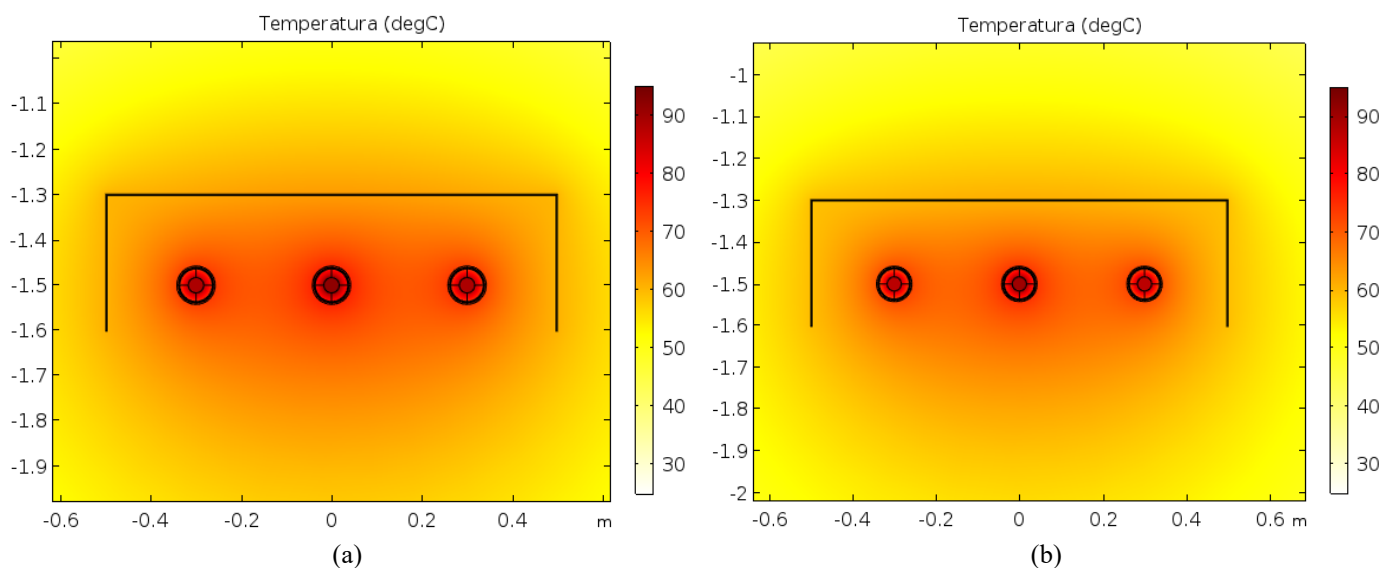


Figura 4.33 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem com chapa em “U” invertido: (a) alumínio e (b) cobre.

Por fim, foi analisado o desempenho da configuração em “H” com chapas de cobre e alumínio. Nessa blindagem, foram dispostas duas placas verticais de 60 centímetros de largura nas extremidades laterais da placa horizontal. A eficácia da blindagem foi comparada por meio dos valores dos perfis de campo da Figura 4.34. Novamente, para exemplificar os valores calculados para a chapa de alumínio em “H”, é apresentado na Figura 4.35 as linhas de campo e a distribuição da densidade de fluxo magnético na presença dessa blindagem.

Tendo em conta os resultados apresentados na Figura 4.34, pode-se afirmar que o uso da chapa em “H” resulta nos menores valores de campo magnético, sendo obtidos FR de 13,32 para a blindagem de cobre e 10,61 para a blindagens de alumínio. Dada a presença das placas verticais que reduzem o “vazamento” do campo, a eficácia da configuração no formato “H” é superior às da chapa plana e da chapa em “U” invertido. O incremento com relação a chapa no formato de “U” pode ser explicado pela utilização de uma maior quantidade de material e, principalmente, pela circulação de maiores intensidades de correntes induzidas nas placas laterais

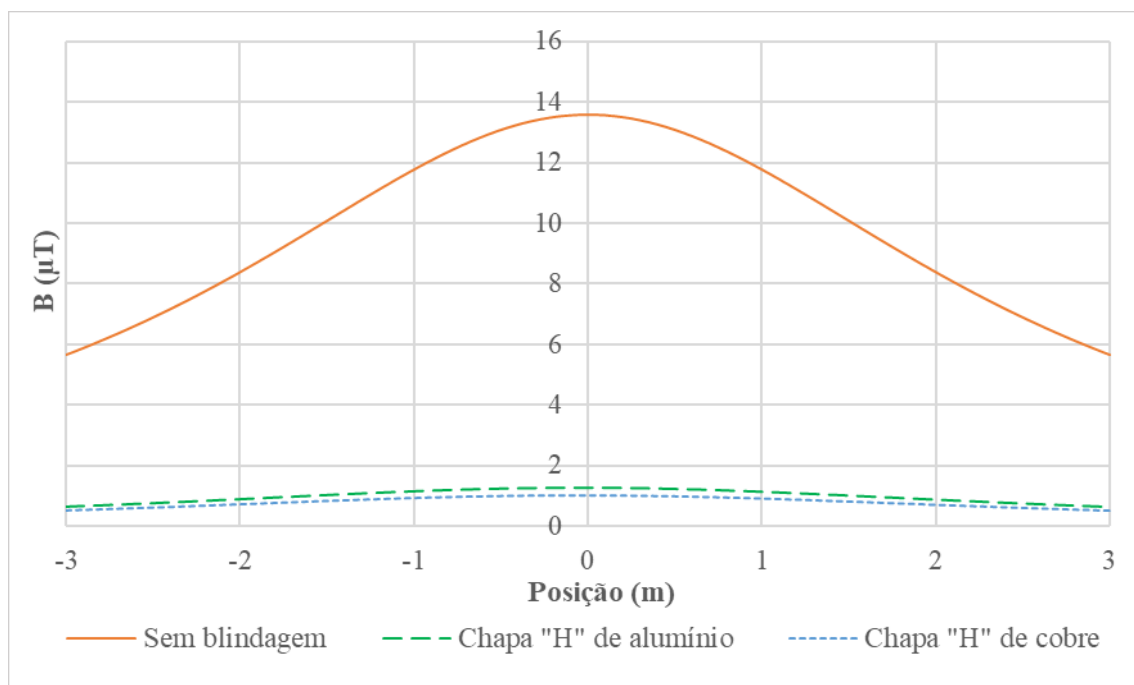


Figura 4.34 - Perfis de campo magnético calculado para o trecho convencional sem blindagem e para o uso da chapa de cobre e de alumínio em “H”.

Além da redução na dispersão do campo, a presença das placas verticais da chapa em “H” facilita a dissipação do calor originado pela blindagem, resultando em um impacto térmico menor do que o calculado nas configurações anteriores. O auxílio na dissipação do calor faz com que, na presença da chapa de cobre em “H”, a temperatura máxima no condutor da linha seja inferior a 90°C , sendo calculada a temperatura de $88,2^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, a blindagem funciona como um dissipador térmico, auxiliando na troca de calor e não provocando perda na capacidade de transmissão de corrente da linha.

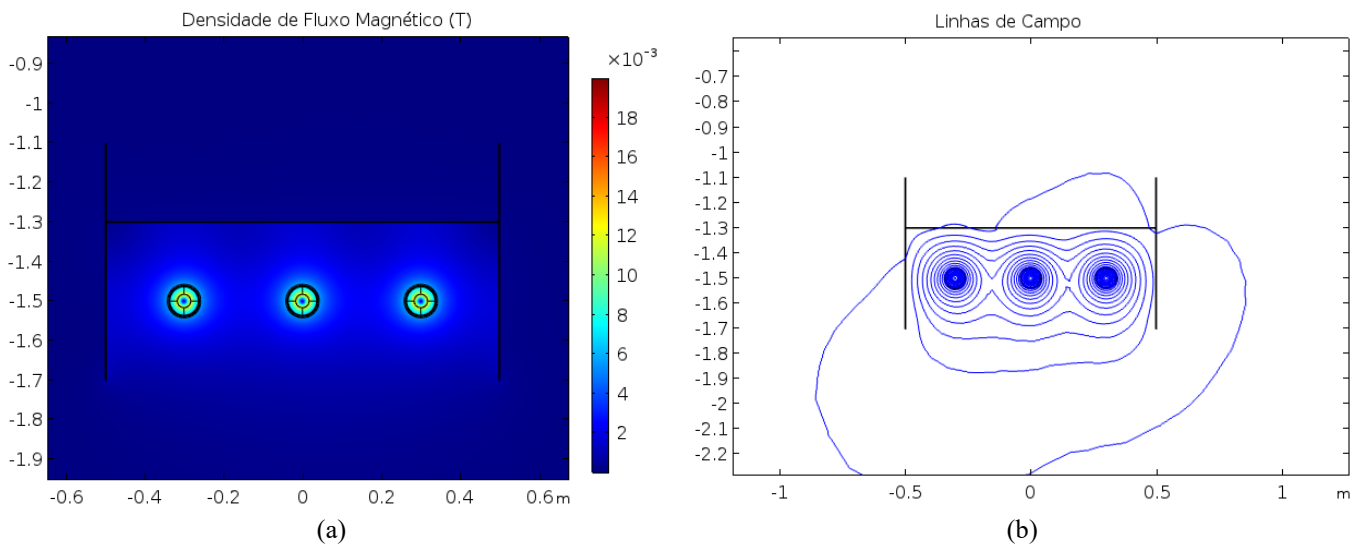


Figura 4.35 - Blindagem com chapa de alumínio em “H”: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.

Para a configuração de alumínio, não foi observado esse mesmo comportamento da blindagem como dissipador térmico, sendo calculada a temperatura final de aproximadamente $90,2^{\circ}\text{C}$, que resulta na redução em aproximadamente 0,2% da capacidade de transmissão. As distribuições da temperatura na presença das chapas de cobre e de alumínio em “H” podem ser observadas na Figura 4.36.

Observando os resultados obtidos no estudo das configurações metálicas abertas, pode-se inferir que as chapas de cobre apresentam blindagens mais eficientes na comparação com as blindagens de alumínio. Todavia, o custo das blindagens de cobre é também superior às configurações de alumínio, podendo inviabilizar a solução que resulta em maiores atenuações do campo. Além disso, é interessante destacar que a configuração

com a chapa de cobre em “H” funciona como dissipador, não impactando, assim, na capacidade de transmissão de potência da linha.

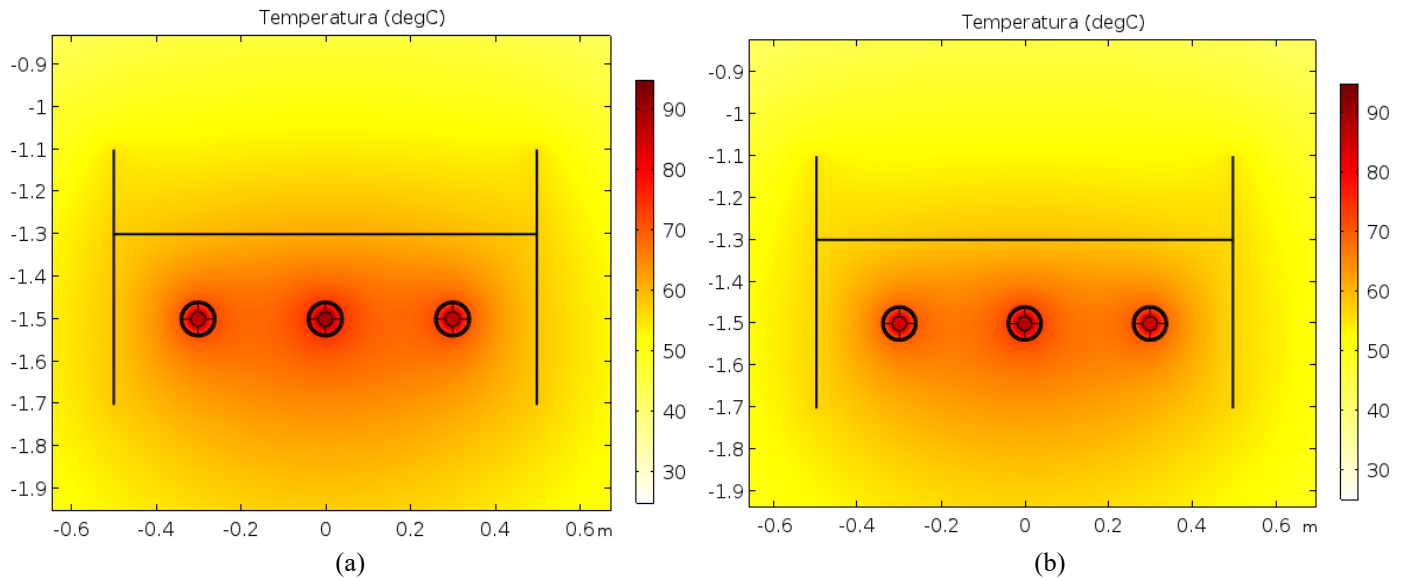


Figura 4.36 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem com chapa em “H”: (a) alumínio e (b) cobre.

Para o caso das outras blindagens com placas metálicas, o sobreaquecimento causado nos cabos subterrâneos é pequeno na comparação com a técnica dos *loops* de compensação. O menor impacto térmico pode ser explicado pela largura e espessura da placa, de modo que, se esses parâmetros fossem reduzidos, a influência térmica da presença da blindagem seria mais perceptível. Em [30] podem ser encontradas mais informações sobre o estudo das influências das dimensões das placas (tipo de material, espessura, largura, distância para linha, dentre outras) no desempenho das blindagens com chapas metálicas.

4.2.3.2. Configuração fechada

Para uma melhor utilização do espaço no interior das blindagens fechadas, a disposição dos cabos subterrâneos foi alterada para o arranjo triangular com as fases se tocando (sem espaçamento), como ilustrado na Figura 4.3 (d). Dessa forma, apenas com o rearranjo dos condutores, é alcançada tanto uma atenuação do campo magnético quanto uma alteração na distribuição da temperatura no sistema subterrâneo. Mais detalhes

acerca dos efeitos do reposicionamento das fases podem ser encontrados na Seção 2.3.1 que descreve a técnica de rearranjo dos condutores do Capítulo 2.

As configurações fechadas avaliadas foram a canaleta e o tubo, sendo considerado o material ferromagnético do aço SAE 1018 para a fabricação das blindagens. As características do aço foram descritas na Tabela 4.2 e Figura 4.26. A canaleta é composta por uma geometria trapezoidal, formada por uma placa horizontal (tampa) e uma placa dobrada (base). A conexão elétrica entre a tampa e a base foi considerada ideal para se alcançar uma maior eficácia na atenuação do campo.

O tubo é formado por uma geometria cilíndrica de maneira a confinar os cabos subterrâneos no seu interior. Para as blindagens fechadas, foram consideradas chapas de aço SAE 1018 com 3 milímetros de espessura. Foi adotada a mesma espessura das placas das configurações abertas para a comparação do desempenho das técnicas de mitigação.

O material considerado para o preenchimento da canaleta e do tubo tem resistividade térmica semelhante à do solo (1 K/W.m). A Figura 4.37 apresenta as dimensões da canaleta e do tubo.

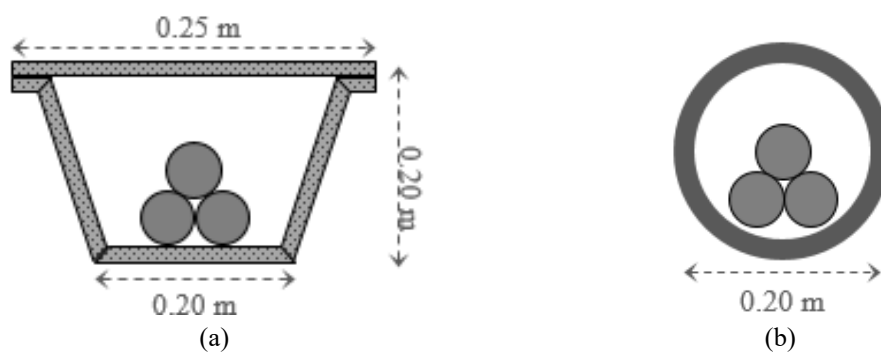


Figura 4.37 - Dimensão das blindagens fechadas estudadas: (a) canaleta e (b) tubo.

A partir das definições das dimensões, foram simuladas as configurações da canaleta e do tubo para a análise do desempenho das blindagens. A Figura 4.38 apresenta as distribuições da densidade de fluxo magnético para a canaleta e para o tubo. Para o estudo da eficácia de blindagem, são comparados na Figura 4.39 os perfis de campo calculados para a canaleta e para o tubo com os valores de campo obtidos para o sistema subterrâneo no arranjo triangular.

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.39, nota-se que, tomando como referência a intensidade de campo originada pelo arranjo triangular, as blindagens fechadas resultam na atenuação do campo magnético para intensidades inferiores a 0,12 μT . Os fatores de redução calculados são de 24,62 e 33,76 para a blindagem com a canaleta e com o tubo, respectivamente.

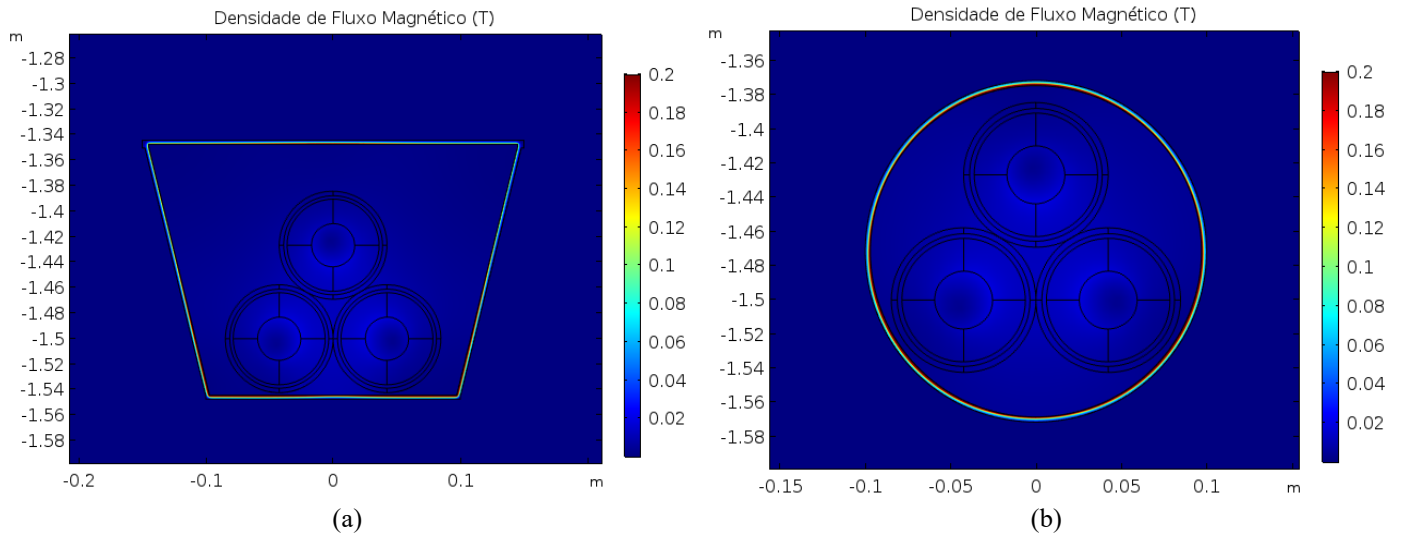


Figura 4.38 - Distribuição da densidade do fluxo magnético na presença das blindagens fechadas: (a) canaleta e (b) tubo.

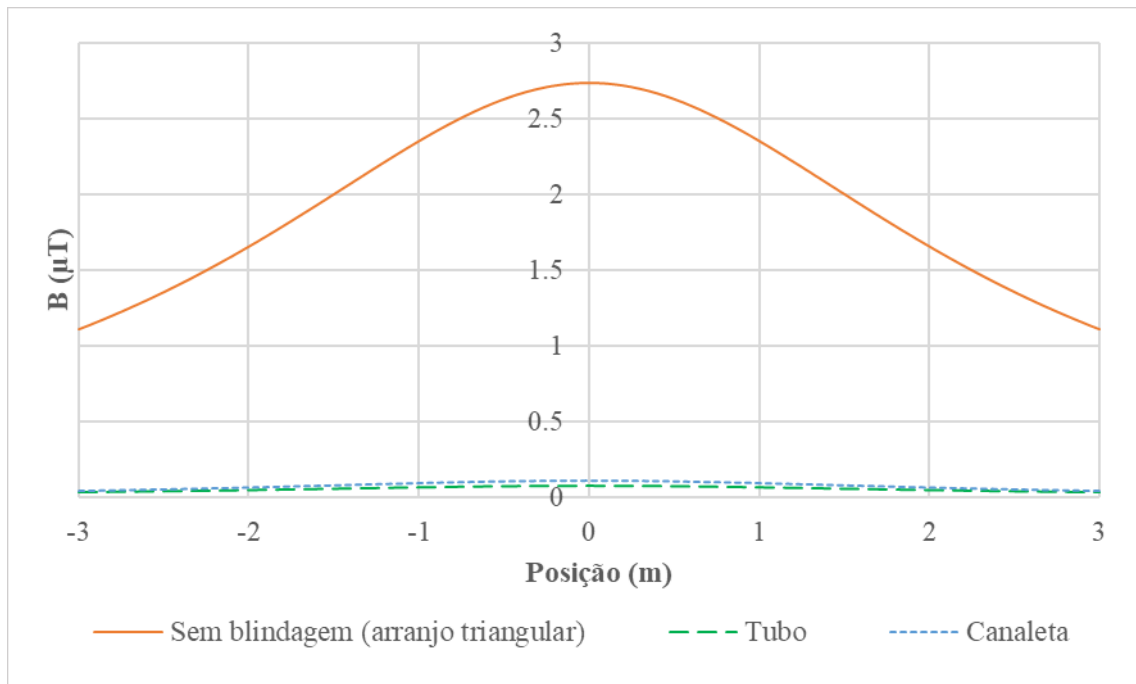


Figura 4.39 - Perfis de campo magnético calculado para o sistema subterrâneo no arranjo triangular sem blindagem e para o uso da canaleta e do tubo.

Vale ser lembrado que a efetividade da blindagem com material ferromagnético depende da condutividade elétrica e, principalmente, da permeabilidade magnética, determinada pela curva de magnetização (Figura 4.26). Dessa forma, caso seja utilizado outro tipo de aço com propriedades superiores, como o aço-silício de grão-orientado, maiores níveis de atenuação do campo podem ser alcançados. Como discutido anteriormente, a informação detalhada acerca da curva de magnetização dos aços comerciais não é facilmente conhecida, podendo levar a erros na execução de projetos reais.

Outro aspecto fundamental do desempenho das blindagens com configurações fechadas é o contato elétrico de todas as partes metálicas. No caso da canaleta, a tampa pode ser apenas disposta sobre a base, não constituindo, assim, um circuito elétrico fechado. O posicionamento da tampa sem o uso da soldagem facilita e reduz o custo da instalação da obra civil. No entanto, a efetividade da mitigação diminui em mais de duas vezes, resultando em FR de 13,08 para a canaleta na qual a tampa é disposta sem solda sobre a base trapezoidal.

Caso os valores de campo sejam confrontados com o trecho convencional (Figura 4.1), é possível a redução do campo em aproximadamente 120 vezes com a utilização da blindagem fechada com contato ideal e do rearranjo dos condutores. Dessa forma, a alternativa da disposição dos cabos subterrâneos no interior de uma canaleta ou de um tubo é recomendada para situações que exigem menores intensidades de campo, como nas proximidades de escolas, parques, asilos e hospitais.

No entanto, tanto a aproximação das fases quanto o confinamento dos cabos no interior das blindagens fechadas promovem um aquecimento adicional à linha subterrânea. Apenas a aproximação das fases resulta em uma elevação adicional de temperatura superior a 20°C, reduzindo a capacidade de transmissão de corrente da linha para aproximadamente 737 A.

A mudança no posicionamento dos cabos devido à utilização da blindagem com a canaleta ou com o tubo faz com que as temperaturas máximas nas fases sejam de 121,2°C e de 125,5°C, respectivamente. Para as configurações do sistema trifásico dispostas no arranjo triangular no interior da canaleta e do tubo, as capacidades de transmissão de potência são de aproximadamente 168 e 166 MVA. A Figura 4.40 apresenta a distribuição da temperatura nas blindagens com a canaleta e com o tubo.

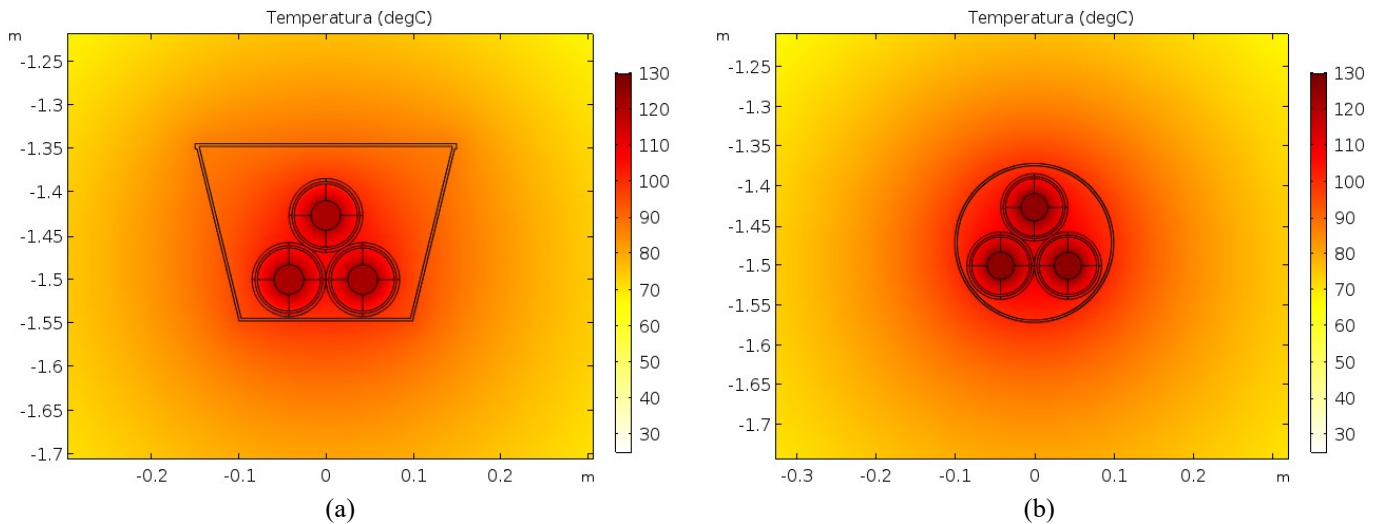
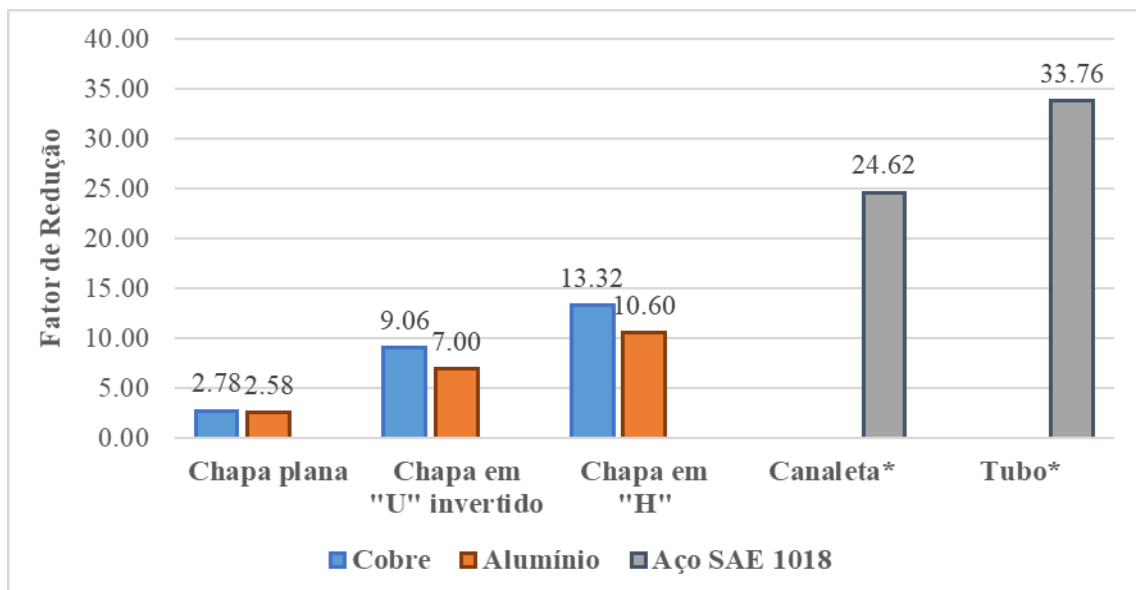


Figura 4.40 - Distribuição da temperatura na presença da blindagem fechada de aço SAE 1018: (a) canaleta e (b) tubo.

4.2.3.3. Fatores de redução e impactos na capacidade de transmissão de potência da linha

Para comparar a eficácia proporcionada pelas blindagens metálicas, foi determinado o FR obtido em cada uma das configurações analisadas. A Figura 4.41 apresenta os valores dos fatores de redução calculados para a chapa plana, a chapa em “U” invertido, a chapa em “H”, a canaleta e o tubo.



* O FR foi determinado a partir do sistema subterrâneo disposto no arranjo triangular com os cabos se tocando.

Figura 4.41 - Fatores de redução calculados para as blindagens metálicas com configurações aberta e fechada.

Observando os resultados obtidos para as configurações abertas, pode-se inferir que as placas de cobre apresentam melhor desempenho em comparação com as de alumínio, obtendo fatores de redução de 9,06 para as chapas em “U” invertido e de 13,32 para as chapas em “H”.

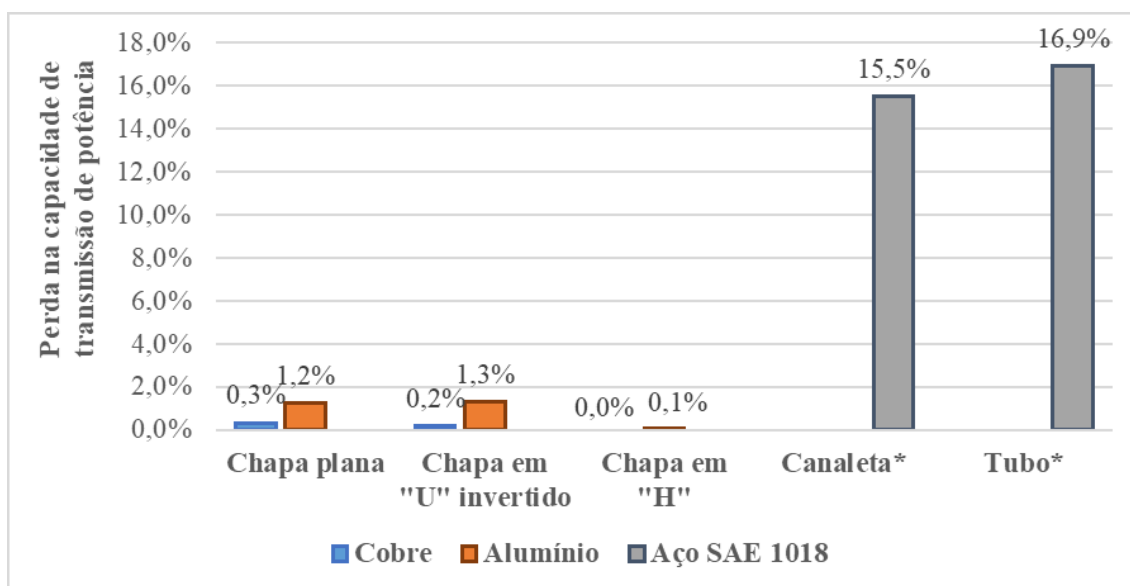
A melhor atenuação do campo é proveniente da utilização de uma maior quantidade de material e da disposição de placas verticais nas extremidades laterais da placa horizontal. Além de contribuir na redução do campo, as placas verticais podem oferecer proteção mecânica aos cabos subterrâneos.

A principal dificuldade na implementação prática das chapas em “U” invertido e em “H” é a conexão elétrica entre as placas. Como discutido no capítulo 2, é de fundamental importância o bom contato elétrico entre as placas que formam uma blindagem de material condutivo. Dessa forma, deve-se garantir por meio de solda um ótimo contato entre as placas verticais e horizontais o que pode onerar demasiadamente o custo da obra.

Nas configurações fechadas, o tubo de aço apresenta o melhor desempenho na mitigação do campo, com FR de aproximadamente 33,76. A canaleta de aço também proporciona uma atenuação significativa do campo (FR de 24,62), embora tenha sido obtido um FR superior ao calculado na canaleta fechada descrita na seção 3.3.2 do capítulo anterior (FR de 21,6). Essa diferença pode ser explicada pelos diferentes tamanhos das canaletas modeladas no presente trabalho.

Para análise do impacto térmico da presença das blindagens metálicas, comparou-se as perdas provocadas na capacidade de transmissão de potência. A Figura 4.42 apresenta os valores percentuais das perdas adotando como referência a potência de 200 MVA do sistema trifásico.

É importante lembrar que nas blindagens com a canaleta e o tubo, o impacto térmico total e, conseqüentemente, a redução na capacidade de transmissão, são provenientes tanto do uso da blindagem fechada como da aproximação das fases. Caso seja avaliado o sobreaquecimento causado apenas pela presença da blindagem, calcula-se a elevação de temperatura de 10°C para canaleta e 14°C para o tubo. Assim, pode-se estimar uma perda de capacidade causada apenas pelo uso da blindagem em aproximadamente 6,6% e 7,2% para a canaleta e para o tubo, respectivamente.



* A perda na capacidade de transmissão de potência foi determinada a partir do sistema subterrâneo disposto no arranjo planar com os cabos espaçados em 30 centímetros (200 MVA).

Figura 4.42 - Perda na capacidade de transmissão de potência para as blindagens metálicas com configurações aberta e fechada.

Por fim, vale destacar que as configurações ferromagnéticas fechadas se apresentam como uma alternativa eficaz na redução do campo gerado por linhas subterrâneas. Contudo, além do impacto térmico provocado no sistema subterrâneo e do elevado custo financeiro, esse tipo de blindagem fechada pode ocasionar dificuldades práticas nas etapas de instalação da obra civil, como por exemplo, em regiões em que o trecho da linha apresenta curvas acentuadas ou na inserção do *backfill* no entorno dos cabos subterrâneos.

4.2.4. Combinação de Técnicas de Blindagem

Para avaliar combinações de técnicas de blindagem que possam ser implementadas em situações práticas, foi analisada a técnica de blindagem composta por *loops* passivos de compensação e chapas metálicas. Para isso, analisou-se a disposição de *loops* de baixo e alto acoplamento no entorno de uma placa plana horizontal de cobre. As configurações dos sistemas de blindagem foram projetadas para resultar em atenuação considerável do campo magnético e, também, facilitar a instalação dos equipamentos (cabos e placas) nos trechos reais de linhas subterrâneas.

Na configuração com laços de baixo acoplamento, um laço foi posicionado com espaçamento de 1,50 metros entre os condutores dos *loops*. Já na configuração com *loops* de alto acoplamento, foram utilizados três condutores espaçados em 50 centímetros e o FA considerado foi de 50%.

Em ambas as configurações o sistema de compensação foi posicionado junto a uma chapa plana horizontal de cobre com espessura de 3 milímetros, 1 metro de largura e 20 centímetros de distância dos cabos subterrâneos. A combinação dessas técnicas de mitigação resultou na técnica de blindagem analisada.

As Figuras 4.43 e 4.44 apresentam, além dos posicionamentos dos sistemas de compensação, as distribuições da densidade de fluxo magnético e as linhas de campo no entorno dos cabos subterrâneos para os sistemas de blindagem com os *loops* de baixo e alto acoplamento, respectivamente. Já a Figura 4.45 compara os perfis de campo calculados para essas combinações de técnicas de mitigação com o campo originado por um trecho convencional de linha subterrânea.

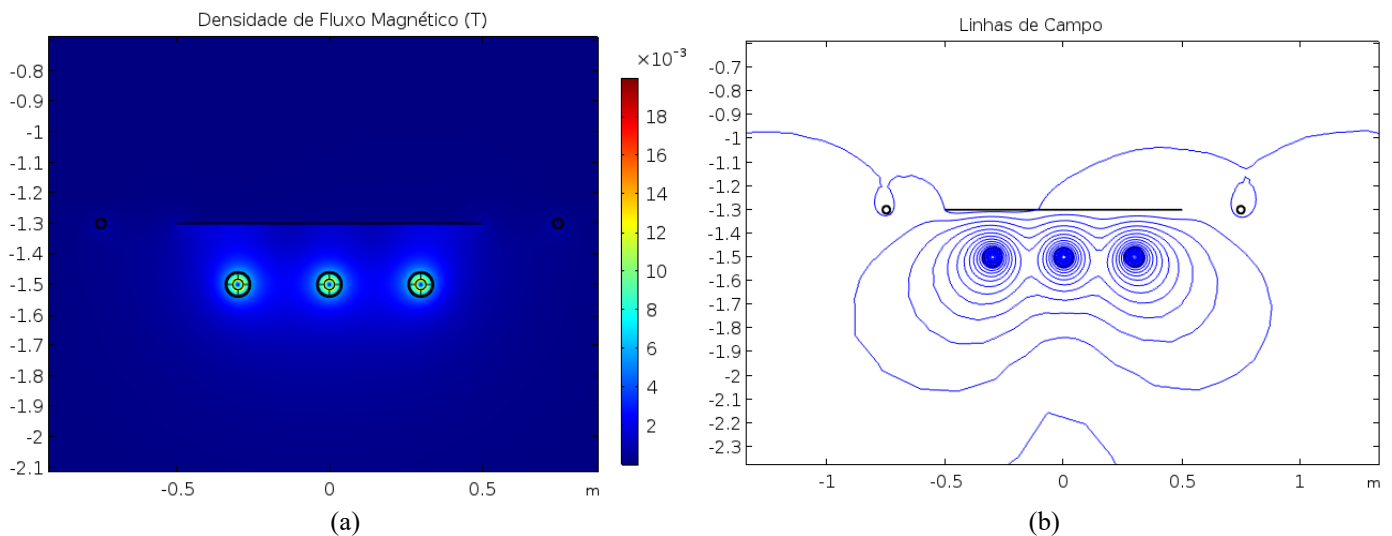


Figura 4.43 - Posicionamento do sistema de blindagem composto por *loops* com baixo acoplamento e por chapa plana: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.

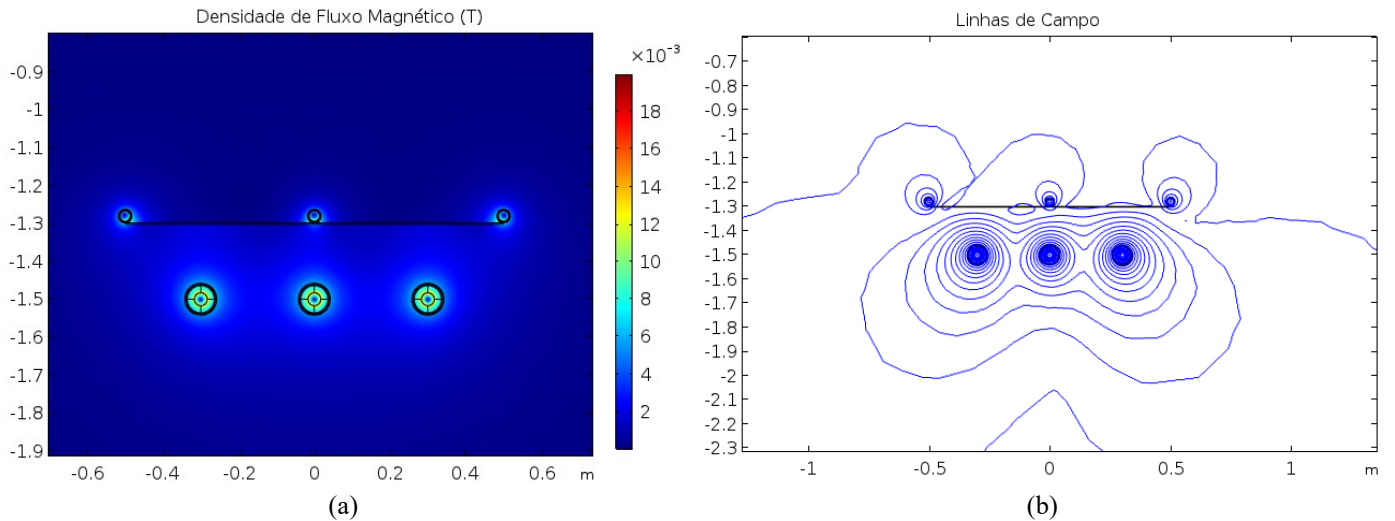


Figura 4.44 - Posicionamento do sistema de blindagem composto por *loops* com alto acoplamento e por chapa plana: (a) distribuição da densidade de fluxo magnético e (b) linhas de campo.

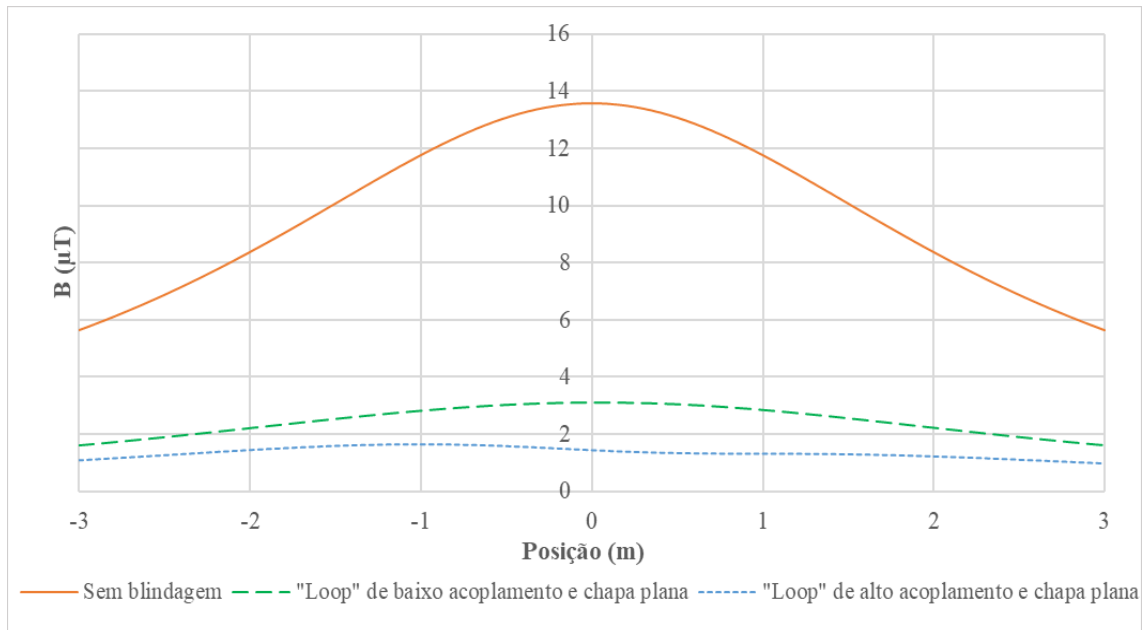


Figura 4.45 - Perfis de campo magnético calculados para o sistema subterrâneo no arranjo triangular sem blindagem e para as combinações das técnicas de mitigação de *loops* de compensação e chapa plana.

Utilizando os valores máximos obtidos nos perfis de campo, determina-se os fatores de redução de 4,38 e 8,35 para o sistema de blindagem composto pela chapa plana e pelos dos *loops* de baixo e alto acoplamento. Nas duas configurações, o nível de mitigação do campo é superior aos valores obtidos para a blindagem com a chapa plana e para algumas configurações de *loops* passivos com maiores fatores de acoplamento.

Logo, a combinação dessas técnicas pode possibilitar o desenvolvimento de blindagens sem a necessidade do uso do núcleo magnético ou, ao menos, com menores fatores de acoplamento, levando a projetos de núcleos magnéticos mais reduzidos e a utilização de condutores nos *loops* com menores seções transversais.

Observando a Figura 4.45, pode-se perceber que o perfil de campo calculado para a blindagem com os *loops* de alto acoplamento e chapa plana apresenta uma distribuição assimétrica dos valores de campo ao longo do eixo horizontal. Apesar da simetria da fonte e do sistema de blindagem, os valores do campo resultante apresentam a assimetria do campo em relação ao lado direito e esquerdo, podendo ser vista também nas linhas de campo da Figura 4.44(b). Esse mesmo fenômeno foi observado em [7] e em [30] na avaliação do campo magnético nas proximidades de blindagens metálicas (chapas e canaletas). Uma discussão mais detalhada sobre a assimetria no campo será apresentada na próxima seção deste capítulo.

Analisando o desempenho térmico dos sistemas de blindagem, pode-se perceber que a fase central do sistema subterrâneo alcança a temperatura de 90,2°C e de 101,6°C nas configurações com *loops* de baixo e alto acoplamento. A Figura 4.46 apresenta as distribuições das temperaturas no entorno do sistema subterrâneo com a presença dos sistemas de blindagem formados pelos *loops* de compensação e pela chapa plana.

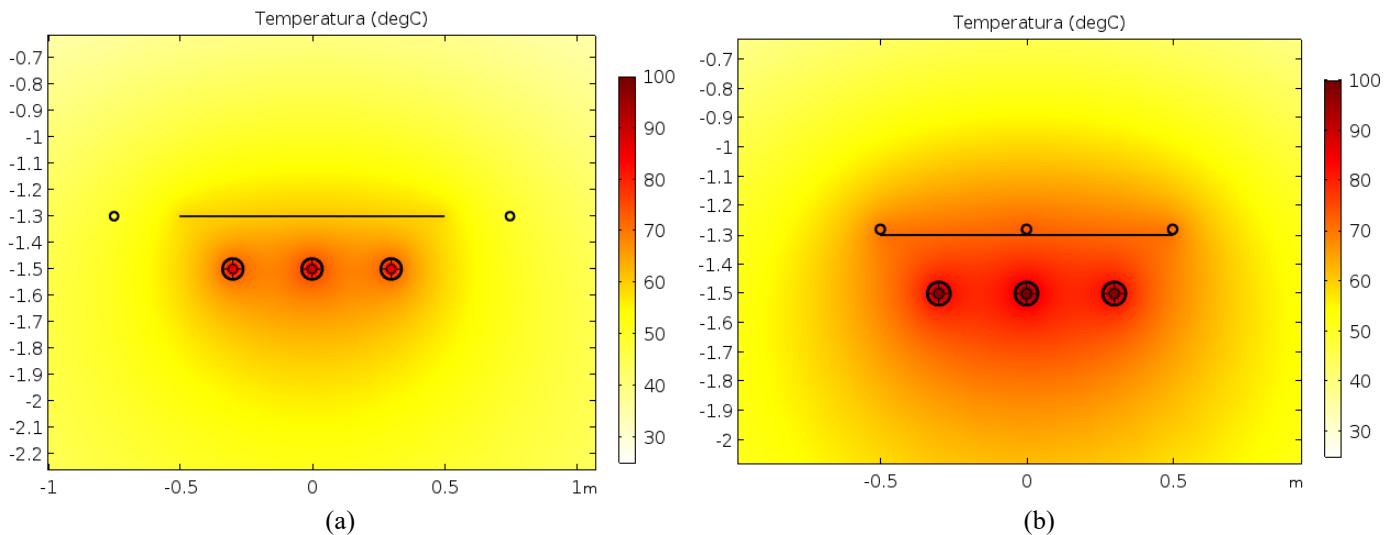


Figura 4.46 - Distribuição da temperatura na presença do sistema de blindagem formado por combinações das técnicas: (a) *loops* de baixo acoplamento e chapa plana e (b) *loops* de alto acoplamento e chapa plana.

Para a configuração do sistema com os *loops* de alto acoplamento, a elevação adicional de temperatura é consideravelmente inferior à calculada para alguns arranjos com uso do núcleo magnético, como no caso da “Configuração 2 (FA: 90%)”. Todavia, o uso desse sistema de blindagem promove a elevação adicional da temperatura, resultando, assim, na perda de 6,9% na capacidade de transmissão de potência da linha subterrânea.

4.2.5. Assimetria do Campo Magnético

Nesta etapa do estudo, foi analisada a assimetria dos valores calculados do campo magnético para alguns sistemas de blindagem. Essa discrepância entre os valores do lado esquerdo e direito da curva do perfil de campo foi observada em outros trabalhos da literatura, como na diretriz elaborada pelo Cigrè acerca de estudos sobre técnicas de mitigação para campos magnéticos de baixa frequência [7]. Contudo, a explicação a respeito das causas desse fenômeno não foi encontrada, sendo, geralmente, destacada a assimetria da curva sem a realização de análises sobre os possíveis impactos no projeto do sistema de blindagem.

A modelagem da fonte de campo e do sistema de blindagem, que são geometricamente simétricos com relação ao eixo vertical (eixo y), causa a percepção de que os valores da densidade de fluxo magnético serão espacialmente simétricos, de modo que vários trabalhos comumente apresentam apenas um dos eixos do perfil de campo (por exemplo, lado referente as posições positivas da curva). No entanto, a presença de sistemas de blindagem pode levar a assimetrias do campo magnético, justificando, assim, a análise de todo o perfil de campo da faixa de interesse para a determinação da eficácia da técnica de mitigação.

Para a análise da assimetria do campo foram avaliadas a configuração da chapa em “H” e a combinação das técnicas de blindagem dos *loops* com a chapa plana. Nas duas configurações foram consideradas placas de cobre de 5 milímetros de espessura e dispostas a 10 centímetros do sistema subterrâneo. A consideração de placas com maiores espessuras e mais próximas da fonte de campo teve o objetivo de se alcançar correntes induzidas de maiores intensidades, permitindo a visualização mais nítida da assimetria. No arranjo com os *loops* de compensação que utilizam o transformador de corrente, o fator de acoplamento considerado foi de 25%.

A Figura 4.47 apresenta as configurações de técnicas de mitigação analisadas e a distribuição da densidade de fluxo magnético no entorno dos sistemas de blindagem. Diferentemente de outras análises realizadas nesse capítulo, o sistema subterrâneo foi considerado estando a 1 metro de profundidade.

A partir das simulações, pode-se perceber que a assimetria do campo está relacionada com a sequência de fase no sistema subterrâneo: positiva (ABC)⁷ ou negativa (ACB)⁸. A definição da ordem de rotação dos ângulos das correntes na sequência positiva resultou em uma determinada curva de perfil de campo. Caso seja definida a sequência negativa, o perfil campo apresenta valores espelhados, ou seja, os valores de campo nas posições positivas foram invertidos com os valores de campo nas posições negativas. Todavia, é interessante destacar que a transposição das fases da linha do sistema subterrâneo, tanto considerando a sequência positiva (ABC, BCA e CAB) quanto a negativa (ACB, BAC, CBA), não afeta os valores da densidade de fluxo magnético. Além disso, nota-se que, para pontos mais próximos da fonte (menor altura com relação ao nível do solo), a assimetria do campo fica mais perceptível.

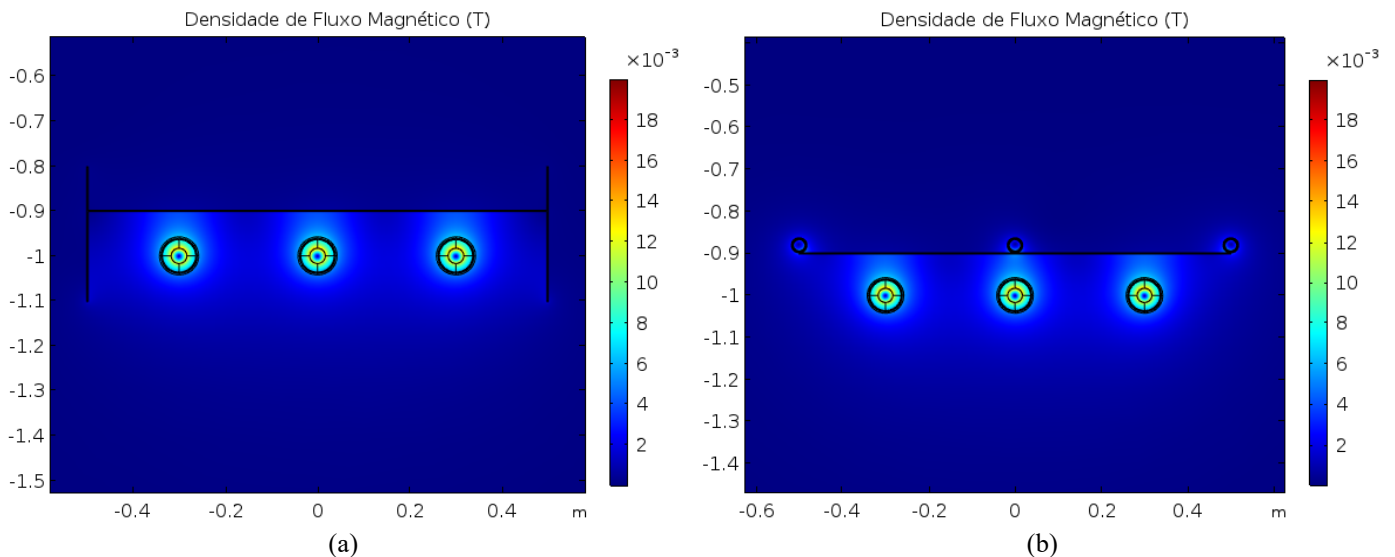


Figura 4.47 - Distribuição da densidade do fluxo magnético no entorno do sistema de blindagem: (a) chapa em “H” e (b) loops de alto acoplamento e chapa plana.

⁷ Ângulos de fase da sequência positiva (ABC): fase A = 0° , fase B = -120° e fase C = 120° .

⁸ Ângulos de fase da sequência negativa (ACB): fase A = 0° , fase B = 120° e fase C = -120° .

Para evidenciar a assimetria existente do campo magnético foram calculados os perfis de campo para faixas de interesse com alturas de 0 metro (nível do solo) e 1 metro acima do nível do solo, considerando as sequências de fase positiva e negativa. As Figuras 4.48 a 4.51 apresentam os perfis de campo calculados para os sistemas de blindagem compostos pela chapa em “H” e pela chapa plana com os *loops* de compensação.

Observando os perfis de campo calculados, pode-se notar que a determinação da sequência de fases da corrente na linha resulta na inversão da curva. Contudo, os valores máximos das densidades de fluxo magnético calculados para sequência positiva e negativa são iguais, variando apenas a posição do ponto de maior valor do campo. Sendo assim, justifica-se a utilização da equação (2.7), uma vez que ela determina o parâmetro da atenuação a partir do valor máximo do campo na faixa de interesse, ou seja, não varia com a sequência de fases.

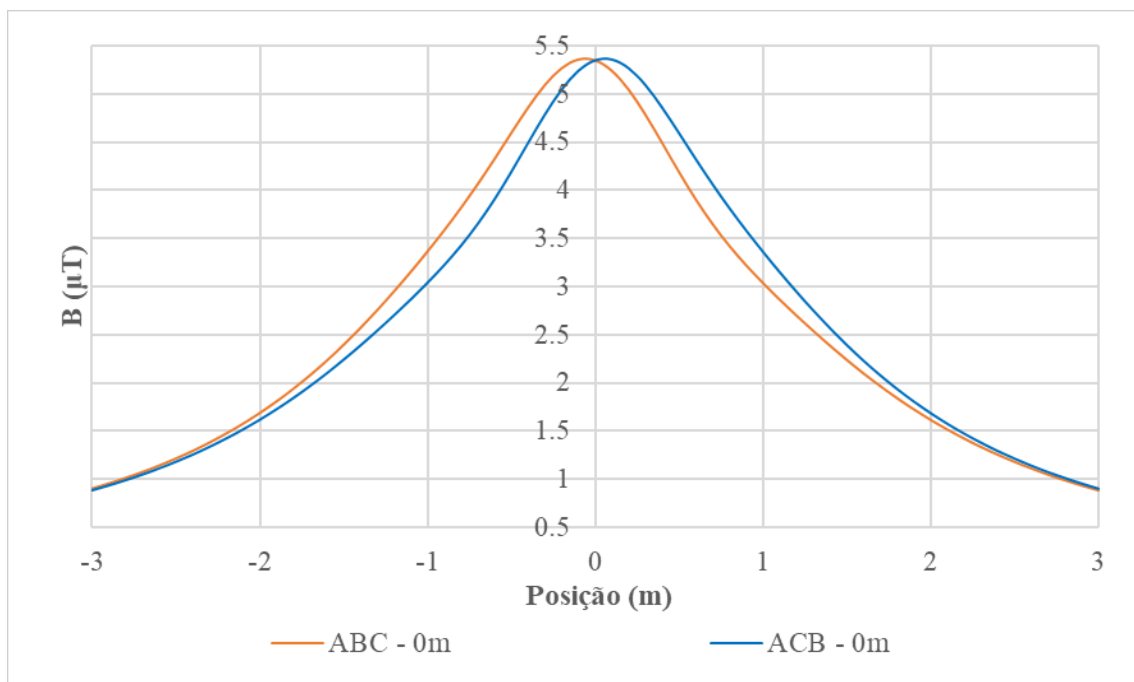


Figura 4.48 - Perfis de campo calculados para a blindagem com a chapa “H”, considerando a faixa de interesse ao nível do solo.

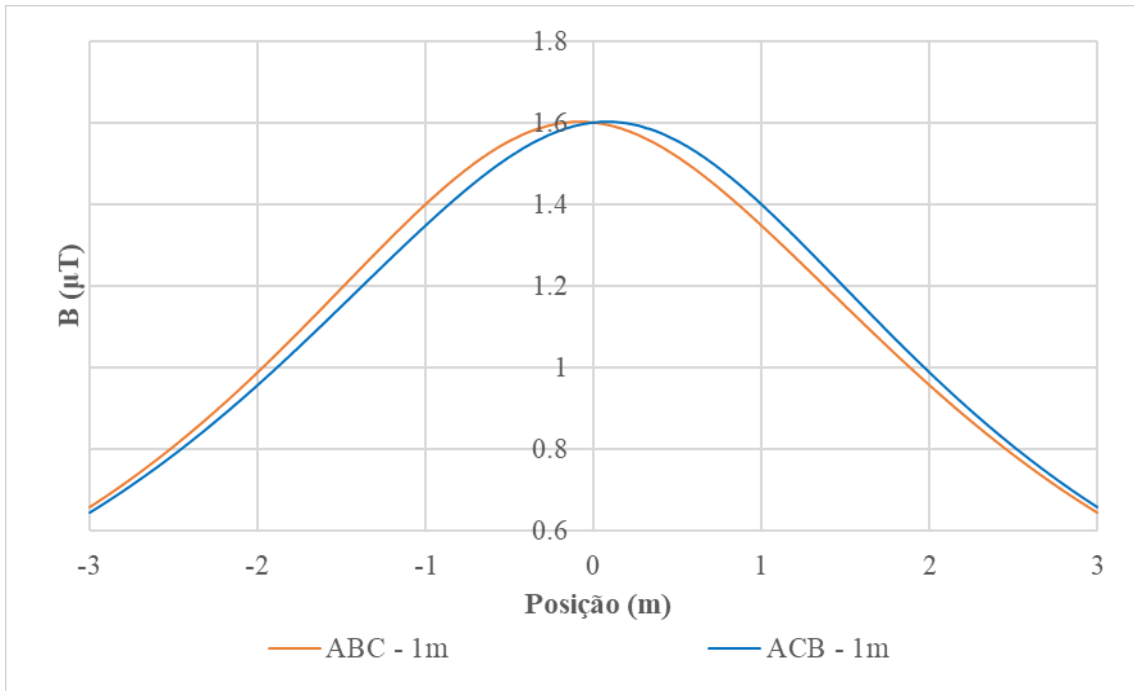


Figura 4.49 - Perfis de campo calculados para a blindagem com chapa “H”, considerando a faixa de interesse com altura de 1 metro.

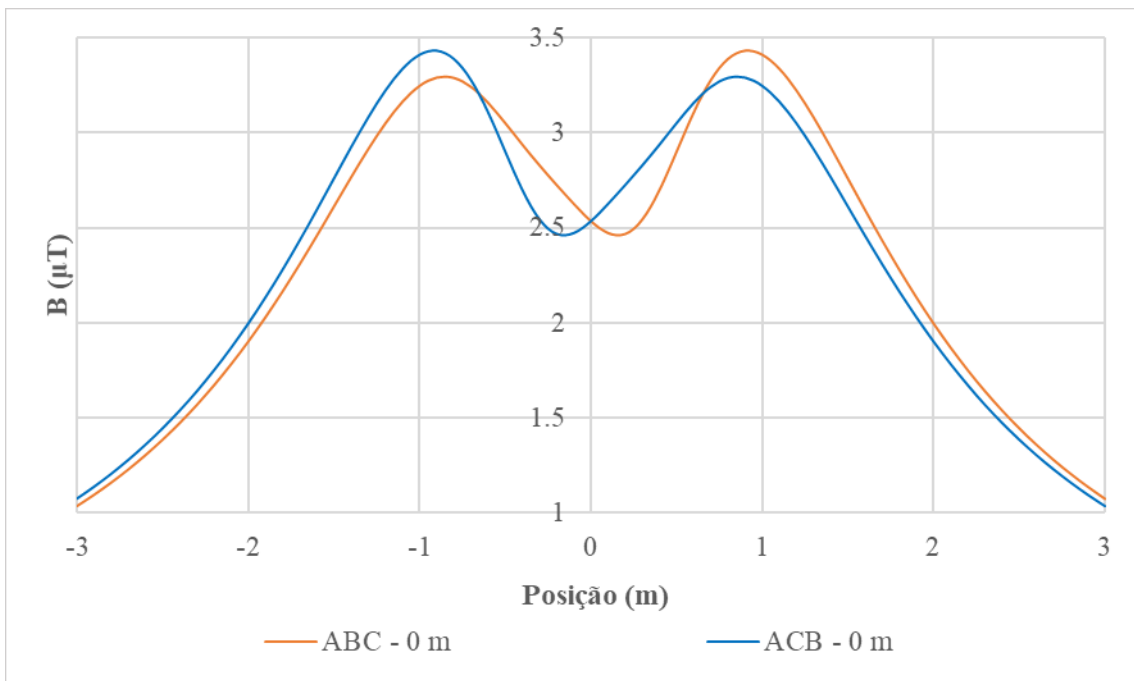


Figura 4.50 - Perfis de campo calculados para o sistema de blindagem composto pelos *loops* de alto acoplamento e pela chapa plana, considerando a faixa de interesse ao nível do solo.

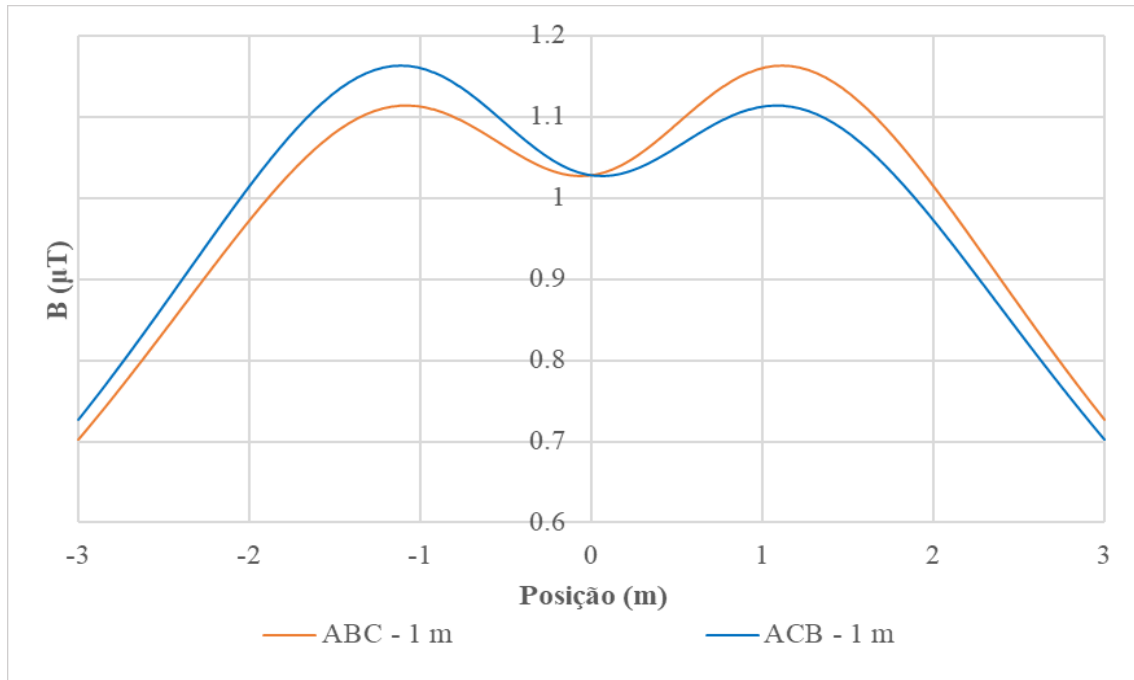


Figura 4.51 - Perfis de campo calculados para o sistema de blindagem composto pelos *loops* de alto acoplamento e pela chapa plana, considerando a faixa de interesse com altura de 1 metro.

A influência da definição das seqüências positiva ou negativa, como esperado, pode ser observada na representação das linhas de campo nas proximidades dos sistemas de blindagem. As Figuras 4.52 e 4.53 apresentam os gráficos com a distribuição das linhas de campo para as blindagens com a chapa “H” e com os *loops* de compensação e chapa plana, respectivamente.

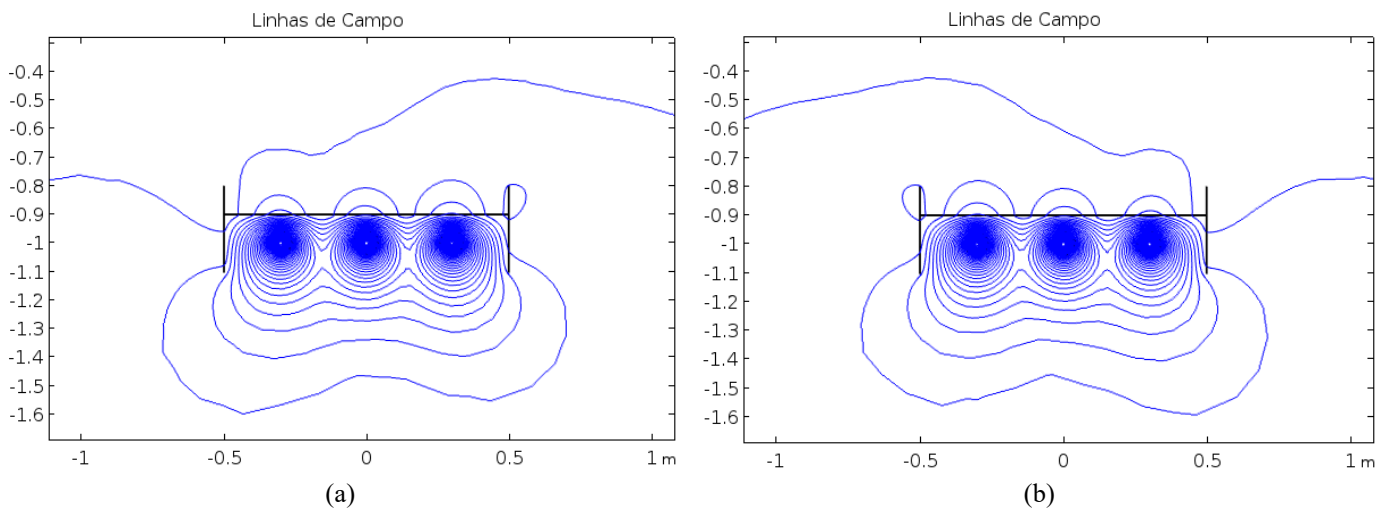


Figura 4.52 - Distribuição das linhas de campo magnético nas proximidades da blindagem com a chapa “H”: (a) seqüência de fase positiva e (b) seqüência de fase negativa.

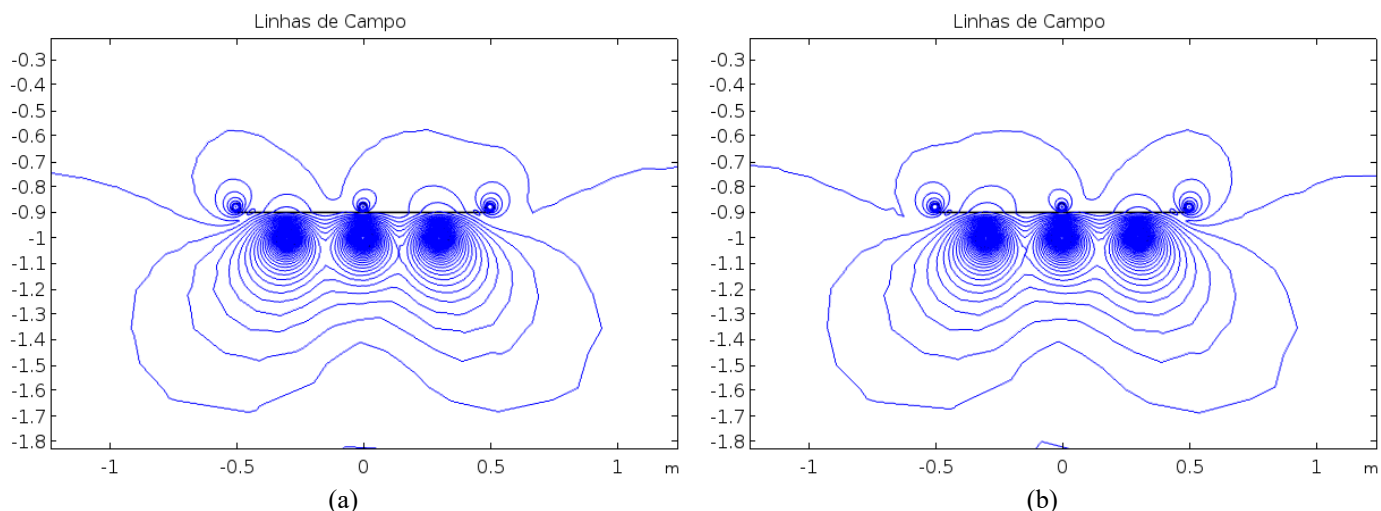


Figura 4.53 - Distribuição das linhas de campo magnético nas proximidades da blindagem composta pelos *loops* de compensação e chapa plana: (a) sequência de fase positiva e (b) sequência de fase negativa.

É interessante destacar que a assimetria do campo magnético está relacionada com a presença do sistema de blindagem. Para os casos analisados sem a presença de blindagem, os perfis de campo resultantes originados por diferentes arranjos de cabos subterrâneos, nos quais os cabos podem estar espaçados ou se tocando, apresentam valores simétricos de campo ao longo das posições na faixa de interesse. Ou seja, a sequência de fases não influencia nos valores da densidade de fluxo magnético. Contudo, na presença dos sistemas de mitigação que possuem a circulação de correntes induzidas (chapas metálicas e *loops* de compensação), pode-se observar a assimetria no perfil de campo resultante.

Logo, a assimetria do campo magnético pode estar associada ao cálculo das correntes induzidas nas chapas e nos *loops* de compensação e, conseqüentemente, na determinação do campo magnético originado por essas correntes. Todavia, carece de mais análises com relação a assimetria do campo para avaliar se a existência se deve por alguma particularidade física ou pelo cálculo numérico dessas grandezas. Vale destacar que, para todas as simulações realizadas nesse item, a malha foi refinada de maneira homogênea ao longo de todo o domínio para minimizar os possíveis distúrbios no cálculo do método de elementos finitos. Apesar disso, a assimetria existe nos perfis de campo calculados para os sistemas de blindagem com chapas e *loops* de compensação.

4.3. Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os resultados de um estudo de técnicas de mitigação do campo magnético de baixa frequência gerado por cabos subterrâneos. Os resultados foram obtidos a partir da metodologia de cálculo apresentada no Capítulo 3 e com a utilização do *software* COMSOL *Multiphysics*[®]. É importante lembrar que nesse estudo o problema foi modelado em duas dimensões, de modo que os cabos subterrâneos e os sistemas blindagens foram considerados infinitamente longos, desprezando-se, assim, os efeitos das terminações.

As técnicas de atenuação de campo analisadas foram o rearranjo dos condutores, os *loops* de compensação e a blindagem com chapas metálicas. Para o projeto das configurações de blindagem foi representado um trecho convencional de um sistema trifásico subterrâneo. Na análise do desempenho dos sistemas de blindagem, foram quantificados o nível de mitigação do campo (fator de redução) e o impacto térmico da presença da blindagem no entorno da linha (perda na transmissão de potência). A Tabela 4.3 apresenta um resumo dos resultados obtidos no estudo do projeto de blindagens em duas dimensões.

Tabela 4.3 - Resumo dos projetos de blindagem em duas dimensões considerando o fator de redução e perda na capacidade de transmissão de potência.

Blindagem	Fator de Redução	Perda na Capacidade de Transmissão de Potência
<i>Loops</i> Baixo Acoplamento	1,79 – 4,10	0,2% – 0,4%
<i>Loops</i> Alto Acoplamento	6,66 – 16,18	6,0% – 13,9%
<i>Loops</i> Alto Acoplamento (HMCPL)	20,06	5,6%
Chapa Metálica Plana	2,58 – 2,78	1,2% – 0,3%
Chapa Metálica em “U” Invertido	7,00 – 9,06	1,3% – 0,2%
Chapa Metálica em “H”	10,60 – 13,32	0,1% – 0%
Canaleta de Aço	24,12 *	15,5% **
Tubo de Aço	33,76 *	16,5% **
<i>Loops</i> de Compensação e Chapa Plana	4,38 – 8,35	0,3% – 6,9%

* O FR foi determinado a partir do sistema subterrâneo disposto no arranjo triangular com os cabos se tocando.

** A perda na capacidade de transmissão de potência foi determinada a partir do sistema subterrâneo disposto no arranjo planar com os cabos espaçados em 30 centímetros (200 MVA).

Vale ressaltar que, para os resultados apresentados na Tabela 4.3, os desempenhos das blindagens são referentes aos parâmetros das configurações projetadas, como: distância para a linha subterrânea, espessura, largura das placas, tipo de material, número de condutores dos *loops*, fator de acoplamento, dentre outros. Sendo assim, para as técnicas de mitigação analisadas, diferentes fatores de redução e perdas na ampacidade podem ser obtidos com a alteração destes parâmetros. Contudo, o estudo realizado possibilita uma estimativa do desempenho desses sistemas de blindagem na atenuação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas.

Dentre as blindagens avaliadas, as configurações fechadas (tubo e canaleta) e os *loops* no arranjo do HMCPL apresentam os maiores fatores de redução, atenuando o campo em mais de 20 vezes. Contudo, ambas as blindagens apresentam dificuldades na sua instalação por serem formadas por configurações complexas, tornando, assim, recomendadas para situações nas quais é necessária uma atenuação praticamente total do campo magnético. A simplificação do arranjo da canaleta com a disposição da tampa sobre a base resulta em um FR de 13,08, mas com impacto térmico similar ao da canaleta com a tampa soldada.

Além da dificuldade na instalação, as blindagens fechadas apresentam os maiores impactos térmicos e, conseqüentemente, as maiores reduções na capacidade de transmissão do sistema subterrâneo, superiores a 15%. Vale lembrar que apenas a aproximação das fases no interior da blindagem acarreta na elevação de temperatura dos condutores. Com relação aos *loops* de compensação, os sistemas de alto acoplamento resultam na maior perda da capacidade de transmissão de potência, sendo calculada uma perda próxima a 14% para a utilização da configuração com fator de acoplamento de 90%. Uma alternativa estudada para minimizar o impacto térmico foi a utilização de múltiplos condutores para formar os *loops*, como proposto no arranjo do HMCPL.

Dentre as técnicas de mitigação analisadas, vale destacar o desempenho da blindagem com as chapas metálicas abertas. Além de se obter um fator de redução elevado, o impacto térmico foi menor, provocando, assim, uma menor redução da capacidade de transmissão de corrente do sistema na comparação com os *loops* de compensação. O melhor desempenho térmico foi obtido pela chapa em “H” de cobre, chegando a funcionar como um dissipador térmico para o sistema subterrâneo. Além do bom desempenho, as chapas metálicas apresentam vantagens em termos de facilidade e de praticidade para a instalação nas proximidades de linhas subterrâneas.

Outros tipos de blindagem com menores FR, mas com praticidade de instalação, foram detalhadas no capítulo, como o sistema de blindagem composto pela combinação de *loops* de compensação e da chapa plana horizontal. A combinação de técnicas de mitigação é uma alternativa interessante para o projeto de blindagem em situações específicas, principalmente quando o uso de blindagens com maiores FR não podem ser praticadas.

A finalidade do projeto de blindagem em 2D foi realizar um estudo preliminar para investigar as características das diferentes técnicas de mitigação e da combinação entre essas alternativas. A partir desse estudo e da familiaridade com a ferramenta de cálculo de campo, tornou-se possível a escolha das blindagens que foram avaliadas nos projetos em três dimensões. No Capítulo 5, é apresentado o aperfeiçoamento do modelo computacional para a representação do problema em 3D. Dessa forma, serão apresentados os projetos dos sistemas de blindagem com comprimento finito, considerando, assim, as terminações das placas e, conseqüentemente, o impacto causado no desempenho da blindagem.

É interessante ser destacado que, para realizar as simulações apresentadas nesse capítulo, pode ser utilizado um computador (*notebook*) doméstico, com pelo menos 4 GB de memória RAM e espaço suficiente para a instalação do *software* COMSOL *Multiphysics*[®]. Nesse tipo de máquina é possível malhar toda a região do domínio com elementos reduzidos, garantindo convergência para o problema e precisão nos resultados calculados de densidade de fluxo magnético e temperatura. A simulação do problema em 2D não apresenta elevado custo computacional, podendo ser realizada em um computador doméstico com o tempo de simulação na ordem de segundos.

5. PROJETO DE SISTEMAS DE BLINDAGEM: ANÁLISE EM TRÊS DIMENSÕES

5.1. Introdução

Nesse capítulo, é apresentado um estudo sobre as vantagens do aperfeiçoamento computacional na representação do sistema de blindagem em três dimensões (3D). Dessa forma, pode-se modelar o problema de modo mais realista, com as representações das terminações das blindagens e alterações nos espaçamentos entre os condutores. Tais situações não foram contempladas no estudo anterior, projeto de sistemas de blindagem em duas dimensões (2D), apresentado no Capítulo 4.

Inicialmente, para a validação do cálculo em três dimensões, os resultados obtidos a partir do modelo 3D foram confrontados com os valores previamente conhecidos do modelo 2D. A partir dessas comparações, são apresentadas as análises da modelagem de chapas metálicas em três dimensões, dando ênfase à importância da representação finita das terminações das blindagens. A blindagem com chapas metálicas foi escolhida para o estudo 3D porque é a técnica mais utilizada em aplicações reais, principalmente pela maior praticidade na instalação.

Para a avaliação do fator de redução e do impacto térmico causado na linha subterrânea, um trecho de um sistema trifásico de transmissão subterrâneo convencional foi modelado. Os detalhes do arranjo são aqueles anteriormente mostrados na Figura 4.1 e os parâmetros construtivos dos cabos de alta tensão estão descritos na Tabela 3.2. Todas as simulações foram realizadas pelo *software* COMSOL *Multiphysics*[®].

5.2. Validação do Cálculo em 3D

Antes de analisar o projeto de sistemas de blindagens em três dimensões, foi validado o cálculo 3D para os problemas magnético e térmico. As validações dos cálculos do campo magnético e da temperatura no modelo 3D foram realizadas a partir das comparações com os resultados determinados anteriormente no estudo 2D. Sendo assim, para confrontar os valores da densidade de fluxo magnético e da temperatura encontrados

no modelo 2D e compará-los aos resultados do estudo em três dimensões, os cabos subterrâneos e a blindagem foram consideradas infinitamente longos. Essa representação reproduziu na simulação 3D as simplificações existentes no modelo 2D.

Uma das condições fundamentais para a simulação do problema é a corrente percorrer um caminho fechado, ou seja, não existir descontinuidade na circulação da mesma ao longo de todo o domínio do problema. Portanto, para representação do sistema subterrâneo, as extremidades dos condutores devem ser conectadas nas extremidades do domínio. Na representação 2D, essa condição é atendida, uma vez que tanto as fontes de campo como as possíveis blindagens são consideradas infinitamente longas e conectadas nas suas respectivas terminações no infinito. Já na representação 3D, para conseguir respeitar a condição de circulação da corrente, necessita-se conectar as extremidades dos condutores as superfícies externas que fecham o domínio da modelagem. Assim, a corrente que circula no condutor “retorna” pela extremidade do domínio da modelagem como ilustra a Figura 5.1.

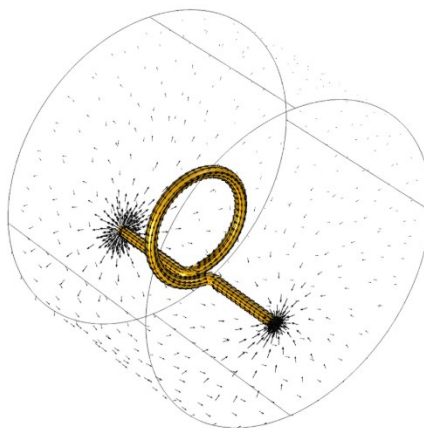


Figura 5.1 - Circulação da corrente no condutor com o retorno pela extremidade do domínio 3D. Retirado de [52].

Em virtude do condutor estar conectado às paredes do domínio, não é possível a representação das terminações dos cabos do sistema de transmissão subterrâneo. Contudo, pode-se representar as extremidades das blindagens e, conseqüentemente, os seus efeitos na eficácia do sistema de mitigação. Essa modelagem é importante em um projeto de blindagem a ser colocada em uma determinada região de interesse. A região pode estar sendo exposta ao campo magnético originado da fonte que percorre toda essa área, como cabos subterrâneos ou linhas aéreas. Nesse caso, o comprimento da fonte de

campo é muito superior ao da região de interesse, justificando a representação da fonte infinitamente longa e a desconsideração dos efeitos das extremidades dos condutores.

A seguir, são apresentadas as comparações entre as simulações dos cabos subterrâneos na ausência e na presença do sistema de blindagem. Como exposto anteriormente, para a verificação do cálculo 3D, considerou-se os cabos e a blindagem com comprimento infinito.

5.2.1. Sem Blindagem

O sistema subterrâneo considerado encontra-se o detalhado na Figura 4.1, com os mesmos cabos de alta tensão apresentados na Tabela 3.2. O perfil de campo analisado corresponde ao campo magnético em um eixo perpendicular à linha, situado a 1 metro acima da superfície do solo e analisado para uma largura de três metros. Para a representação do problema em três dimensões, foi considerado um comprimento de 10 metros do domínio e, em decorrência, do trecho subterrâneo. A Figura 5.2 ilustra o domínio modelado, sendo avaliado o campo magnético em toda a região de interesse em que foi calculado o campo. Para reduzir o esforço computacional, foi novamente considerada a função de fronteira infinita nas laterais do domínio, como discutido no Capítulo 3.

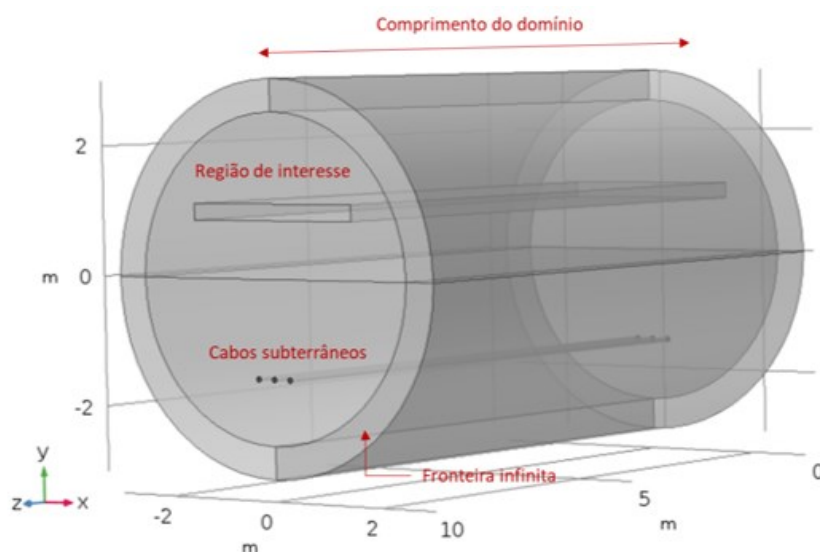


Figura 5.2 - Domínio do problema modelado em três dimensões para o sistema subterrâneo no arranjo planar horizontal.

A Figura 5.3 apresenta a comparação dos valores de densidade de fluxo magnético calculados para o perfil de campo do trecho de linha na ausência do sistema de blindagem. O perfil de campo corresponde à distribuição do campo no plano determinado pelo eixo xy . Para a apresentação desse perfil no problema 3D foi necessário definir a posição do eixo z (comprimento) no qual os valores de campo foram calculados. Para a comparação dos valores calculados nos problemas 2D e 3D foi calculado o perfil do campo no centro do domínio 3D, correspondente a metade do comprimento do trecho subterrâneo (5 m).

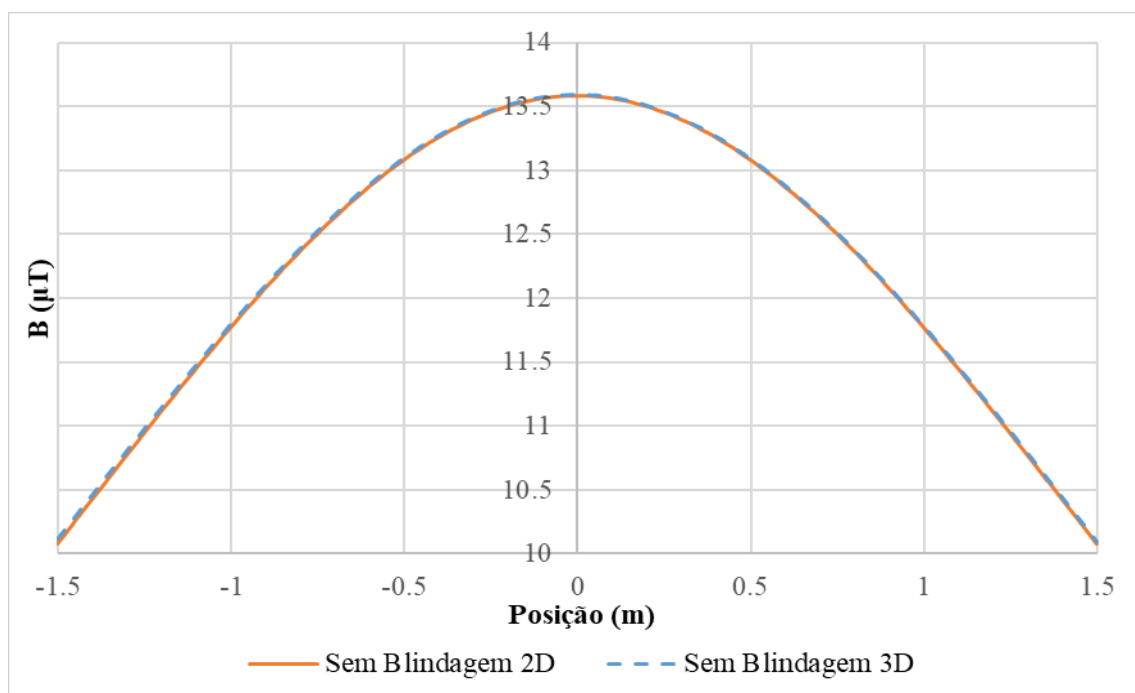


Figura 5.3 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema sem blindagem considerando a modelagem em duas (2D) e três (3D) dimensões.

Observando as curvas do gráfico apresentadas na Figura 5.3, pode-se perceber que, como esperado, os valores calculados para o problema sem blindagem 2D e 3D são bastante similares, com diferenças inferiores a 0,5% entre os valores dos perfis de campo. Como as terminações dos condutores no modelo 3D estão conectadas às bordas do domínio, de maneira similar a simplificação do modelo 2D, os valores de densidade de fluxo magnético devem ser similares. Além disso, no problema 3D, os perfis de campo apresentam a mesma tendência ao longo de todo comprimento da linha subterrânea, pois a fonte de campo é simétrica na direção do eixo z e não existe nenhuma blindagem causando assimetrias ao longo do comprimento da linha. A Figura 5.4 apresenta a

distribuição da densidade do fluxo magnético na região de interesse ao longo de todo o comprimento da linha subterrânea.

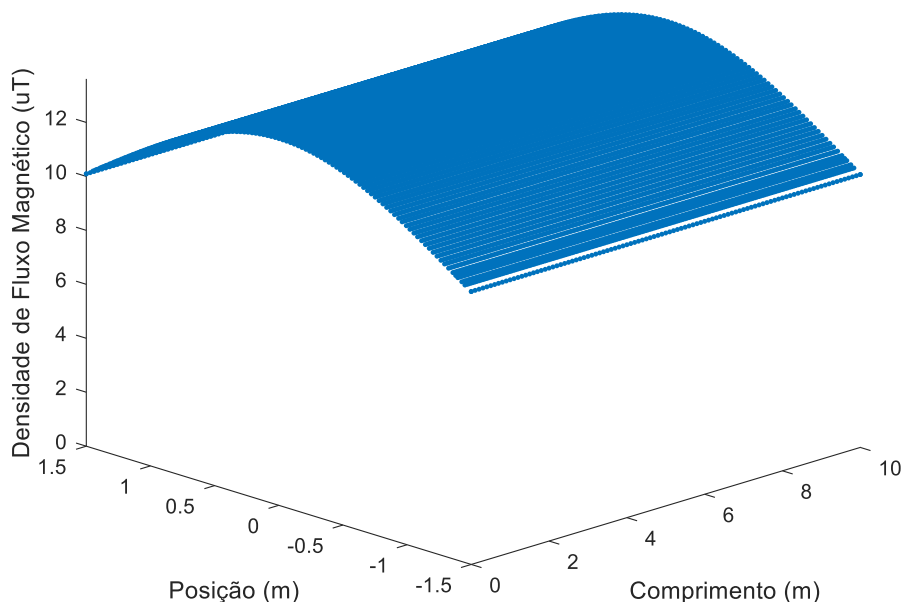


Figura 5.4 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético na região de interesse ao longo do comprimento da linha subterrânea no arranjo planar horizontal.

Além da comparação para os valores de campo magnéticos gerados pela linha subterrânea no arranjo planar horizontal, também foi analisada a configuração dos cabos em disposição triangular. O espaçamento entre os cabos foi considerado de 0,5 milímetro para aumentar a qualidade dos elementos na malha do problema 3D. Esse afastamento também foi modelado na simulação 2D para a comparação dos resultados. Vale destacar que, na comparação com os cabos se tocando, o afastamento de 0,5 milímetro resulta em uma diferença inferior a 1% entre os valores de campo calculados na região de interesse.

A Figura 5.5 mostra a comparação dos valores de densidade de fluxo magnético calculados para o perfil de campo do trecho de linha no arranjo triangular e na ausência do sistema de blindagem. Novamente, o perfil de campo da simulação em 3D foi calculado na metade do trecho subterrâneo.

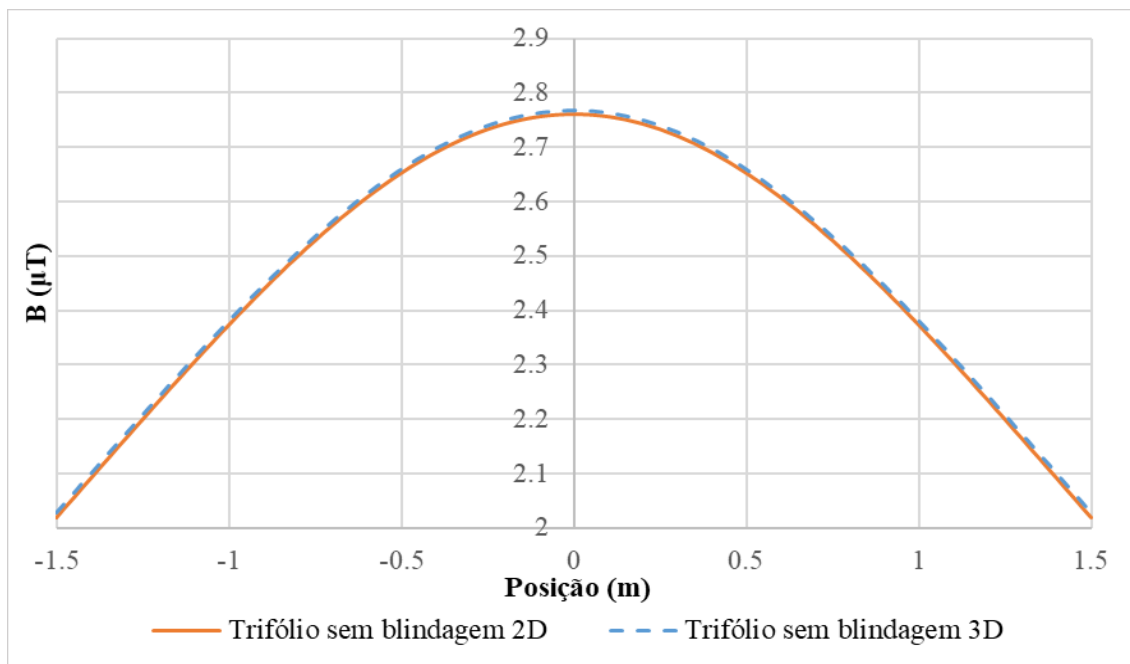


Figura 5.5 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema sem blindagem considerando a modelagem em duas (2D) e três (3D) dimensões.

Analisando a Figura 5.5 pode-se observar que, como esperado, os valores calculados para os problemas 2D e 3D são similares, com diferenças inferiores a 1% entre os valores dos perfis de campo. Na Figura 5.6 é apresentada a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo da extensão longitudinal da linha em arranjo triangular.

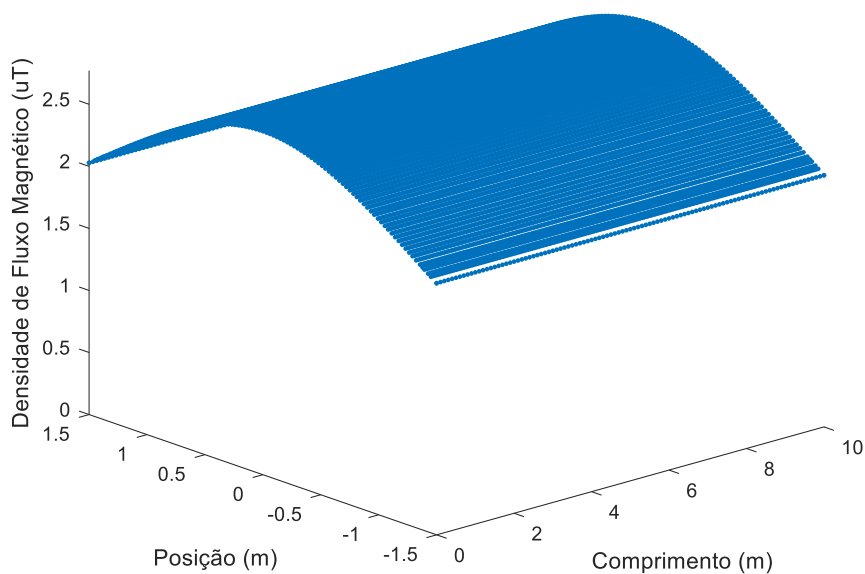


Figura 5.6 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético na região de interesse ao longo do comprimento da linha subterrânea no arranjo triangular.

Após a comparação dos valores de campo magnético, foi verificado o cálculo térmico no problema 3D. Para isso, foram confrontadas as temperaturas calculadas nos condutores das três fases para os problemas modelados em duas e três dimensões. A Tabela 5.1 apresenta as temperaturas calculadas para o sistema subterrâneo disposto nos arranjos planar horizontal e triangular. É importante destacar que, devido à homogeneidade da fonte de campo, a temperatura nos condutores do sistema subterrâneo apresenta valor constante ao longo de todo o comprimento do trecho.

Tabela 5.1 - Comparação dos valores da temperatura calculados nos condutores das três fases do sistema subterrâneo (arranjos planar horizontal e triangular) para os problemas em duas e três dimensões.

Planar Horizontal	Problema 2D (°C)	Problema 3D (°C)	Diferença (%)
Fase A	85,45	85,35	0,11
Fase B	89,70	89,63	0,05
Fase C	85,45	85,35	0,11
Triangular	Problema 2D	Problema 3D	Diferença (%)
Fase A	111,41	111,19	0,27
Fase B	111,07	110,81	0,23
Fase C	111,41	111,19	0,27

Com base nos resultados apresentados nessa seção, pode-se inferir que o cálculo realizado na modelagem em três dimensões apresenta concordância com a metodologia validada para o projeto de blindagem em duas dimensões. A próxima etapa da verificação do cálculo 3D foi a avaliação do problema considerando a blindagem infinitamente longa, assim como os cabos subterrâneos.

5.2.2. Blindagem Infinita

Depois da comparação dos valores de campo sem a presença de blindagem, foram simuladas as configurações de blindagem infinitamente longas, sendo avaliadas as configurações com chapas metálicas. Novamente, os valores simulados das configurações 3D infinitas foram comparados com os resultados previamente calculados pela modelagem 2D.

As terminações das blindagens e dos cabos subterrâneos foram conectadas nas bordas do domínio 3D, como mostrado na blindagem com a chapa “H” da Figura 5.7. Dessa forma, o modelo analisado para o estudo da blindagem infinita apresenta simplificações similares às realizadas no modelo 2D. Os valores da densidade de fluxo magnético e da elevação de temperatura foram comparados para a verificação dos cálculos para a resolução dos problemas magnético e térmico em três dimensões.

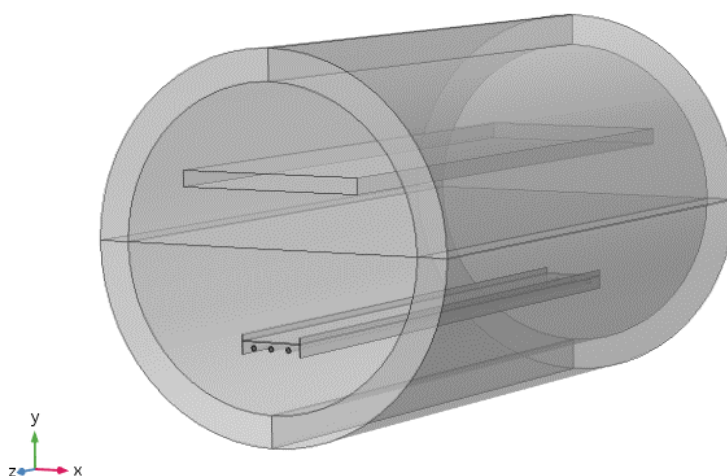


Figura 5.7 - Domínio do problema modelado em três dimensões para o sistema subterrâneo com a blindagem infinita da chapa “H”.

Os sistemas de blindagens analisados são formados por placas de alumínio dos tipos chapas plana e em “H”. As placas modeladas têm espessura de 5 milímetros, largura horizontal de 1 metro e estão dispostas a 10 centímetros do sistema subterrâneo. No caso da chapa “H”, as placas verticais têm altura de 30 centímetros. A Figura 5.8 ilustra na visão transversal as dimensões das chapas analisadas.

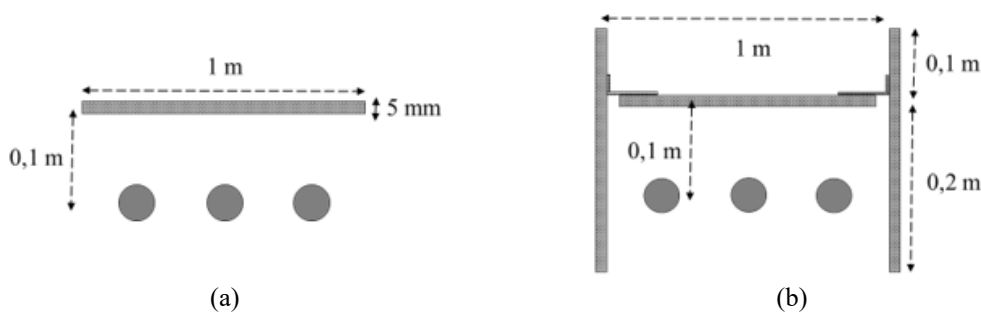


Figura 5.8 - Visão transversal das dimensões das chapas: (a) plana e (b) em “H”.

A Figura 5.9 apresenta as comparações dos perfis de campo calculados para as blindagens com a chapa plana e em “H” considerando a modelagem do problema 2D e 3D. Nas Figuras 5.10 e 5.11 são mostradas as distribuições da densidade de fluxo magnético ao longo de toda a linha para as blindagens com a chapa plana e em “H”, respectivamente.

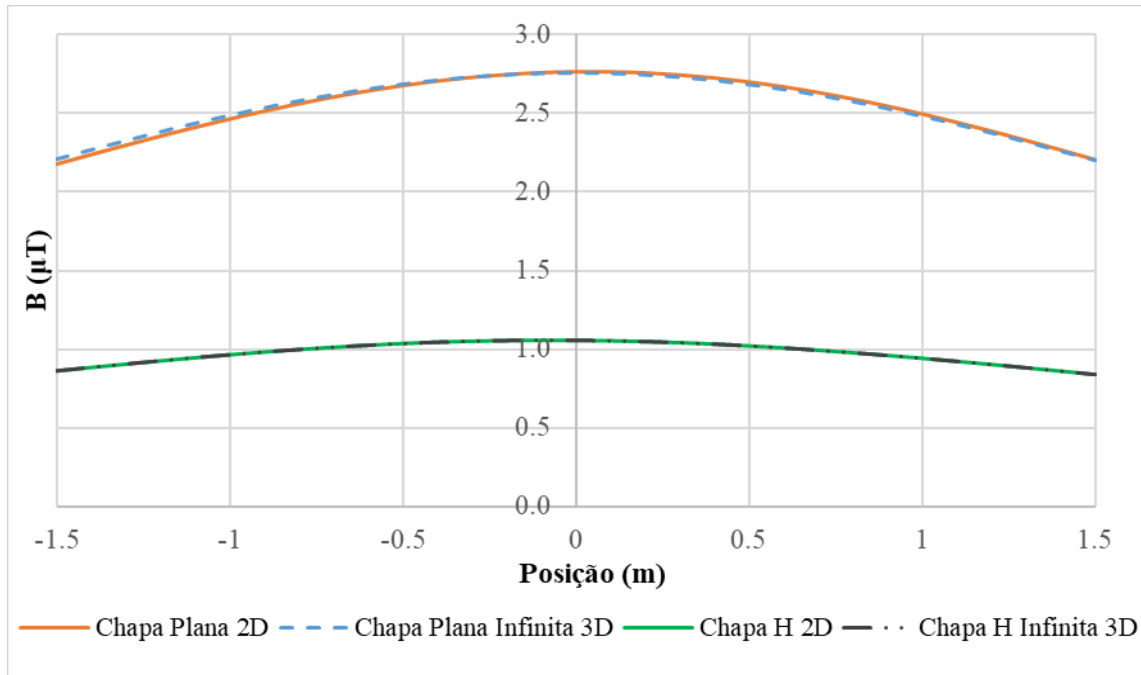


Figura 5.9 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema com blindagem da chapa plana e em “H” considerando a modelagem em duas (2D) e três (3D) dimensões.

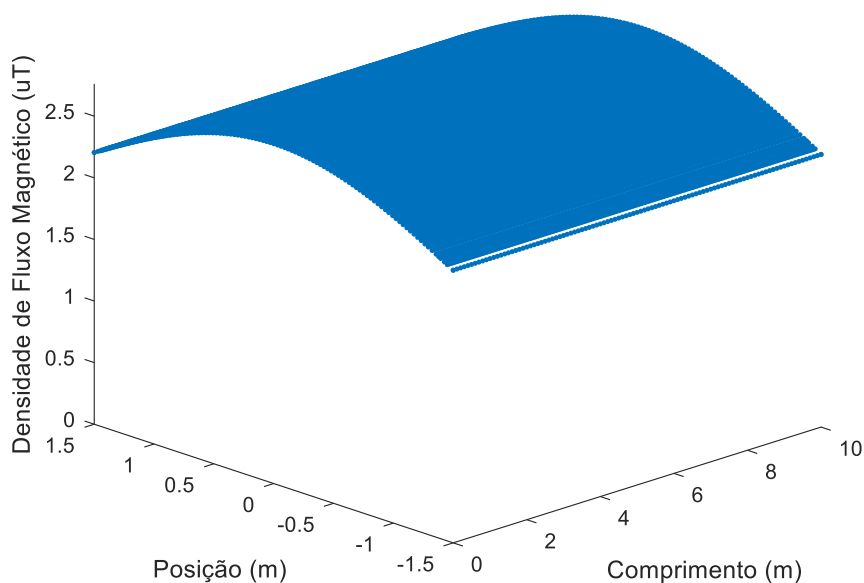


Figura 5.10 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento do trecho subterrâneo na blindagem com chapa plana infinita.

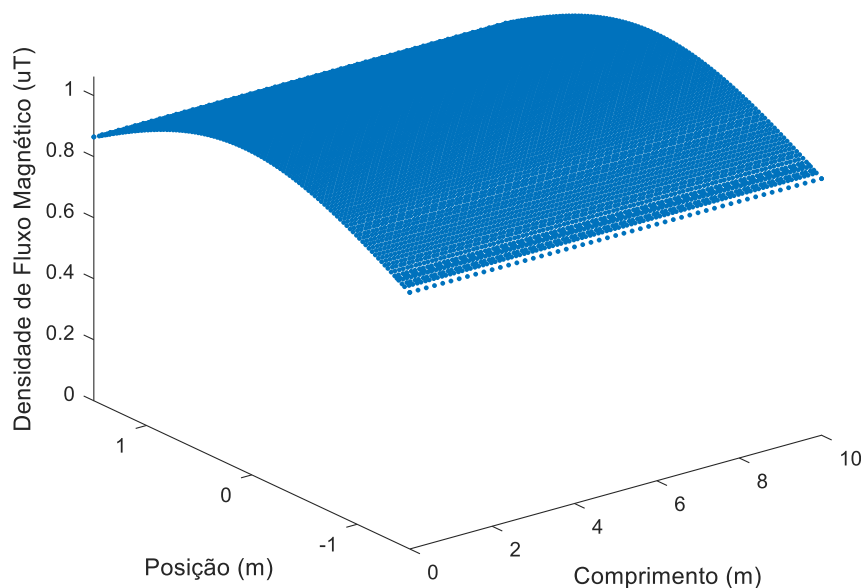


Figura 5.11 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento do trecho subterrâneo na blindagem com chapa plana infinita.

Observando os resultados apresentados, pode-se evidenciar que, em virtude da modelagem da blindagem com o comprimento infinito, os valores calculados do campo magnético para os problemas 2D e 3D são similares, com diferenças inferiores a 1,5% entre os valores dos perfis de campo. Essa diferença é creditada pela menor qualidade da malha utilizada na simulação do problema 3D. Além disso, destaca-se que, em razão da simetria provocada pela presença da blindagem ao longo de todo o comprimento, os valores da densidade de fluxo apresentam distribuição homogênea em toda a extensão longitudinal do sistema subterrâneo.

Nas configurações metálicas abertas, a mitigação do campo magnético ocorre a partir da indução de correntes nas chapas. As correntes de compensação geram um campo magnético que se opõe ao campo originado pela linha subterrânea, provocando, assim, a atenuação do campo resultante. A partir da simulação 3D pode-se visualizar a distribuição da densidade de corrente ao longo das placas metálicas. As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam a distribuição da densidade de corrente para as chapas plana e em “H”, respectivamente. Além de mostrar as densidades de corrente, os gráficos apresentam a direção e sentido do fluxo da corrente nas chapas com comprimento infinito.

Para conseguir gerar um campo magnético oposto ao originado pela linha, a corrente nas placas tem a mesma direção (eixo z) da corrente que circula nas fases do sistema subterrâneo, mas com sentido contrário. Além disso, pode ser observado que as

maiores densidades ocorrem nas regiões das chapas nas quais os cabos subterrâneos estão posicionados abaixo. Dessa maneira, percebe-se que a distribuição da corrente nas chapas se assemelha à distribuição na fonte geradora de campo. Vale destacar que, devido a consideração da blindagem infinita, o retorno da corrente nas chapas também ocorre nas extremidades do domínio.

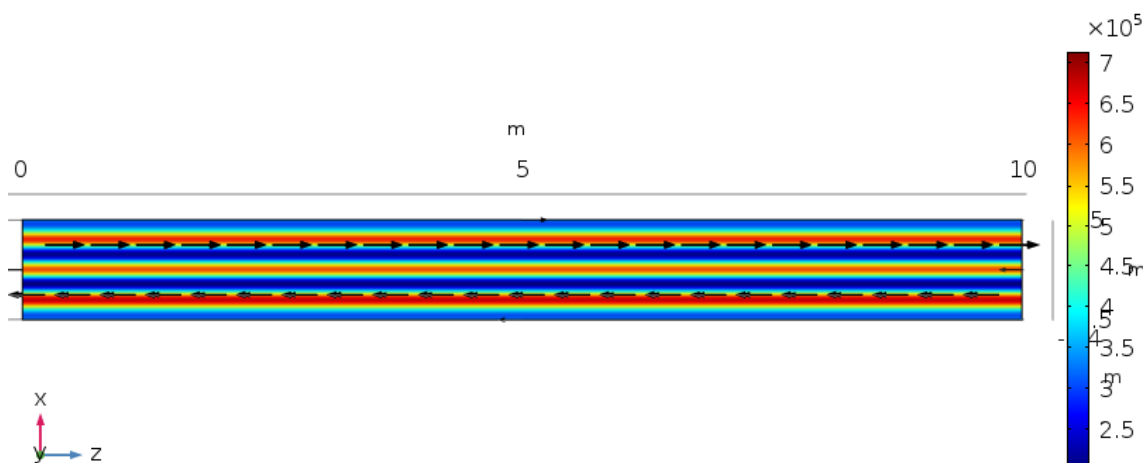


Figura 5.12 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa plana infinita.

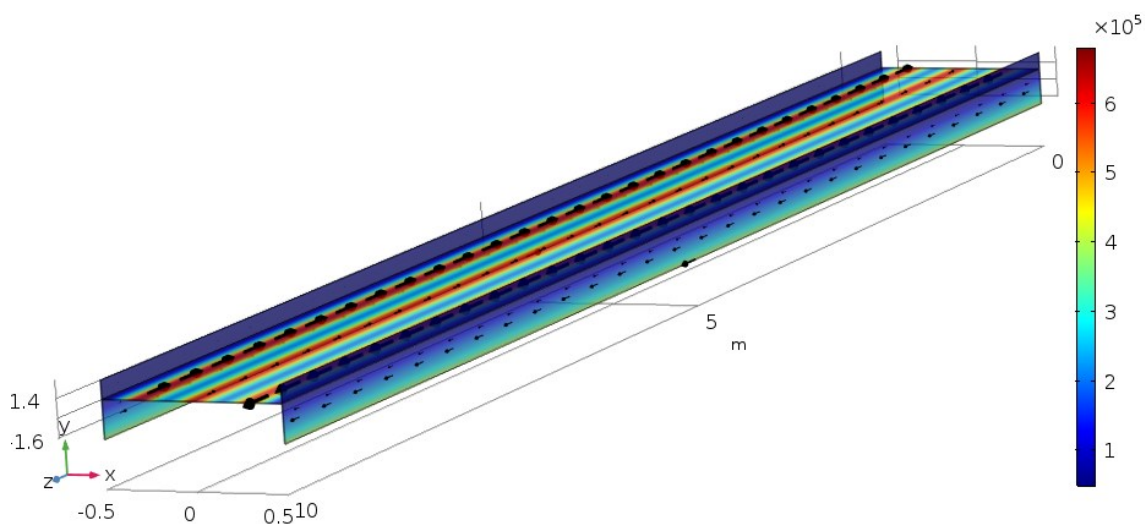


Figura 5.13 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa em "H" infinita.

Além da resolução do problema magnético, foram confrontados os resultados da temperatura nas simulações 2D e 3D para verificação do cálculo térmico. Para isso, foram calculadas as temperaturas nos três condutores da linha subterrânea e na chapa metálica (plana e em “H”). A comparação dos valores das temperaturas nos problemas 2D e 3D é

apresentada na Tabela 5.2. Nas Figuras 5.14 e 5.15 são apresentadas as distribuições homogêneas da temperatura ao longo dos condutores dos cabos com chapas infinitas.

Tabela 5.2 - Comparação dos valores da temperatura calculados nos condutores das três fases do sistema subterrâneo e na blindagem infinita para os problemas em duas e três dimensões.

Chapa Plana	Problema 2D (°C)	Problema 3D (°C)	Diferença (%)
Fase A	91,14	91,03	0,12
Fase B	93,33	93,22	0,12
Fase C	91,06	90,95	0,12
Blindagem	70,04	69,95	0,12
Chapa H	Problema 2D (°C)	Problema 3D (°C)	Diferença (%)
Fase A	89,14	89,05	0,11
Fase B	91,34	91,25	0,10
Fase C	89,22	89,13	0,10
Blindagem	67,90	67,83	0,10

Ressalta-se que, para todos os casos de blindagens analisados, as temperaturas calculadas para o problema 3D são ligeiramente inferiores aos valores obtidos no caso 2D. Esse mesmo padrão pode ser observado nos resultados térmicos da comparação do problema sem blindagem modelados em duas e três dimensões.



Figura 5.14 - Distribuição da temperatura (°C) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa plana infinita.



Figura 5.15 - Distribuição da temperatura (°C) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa em “H” infinita.

5.3. Estudo de Técnicas de Blindagem em 3D

Após a validação do cálculo em três dimensões, foram analisados o efeito das extremidades das blindagens nos projetos dos sistemas de mitigação. Em algumas situações reais, o comprimento da fonte de campo magnético é consideravelmente superior ao da região de interesse na qual o campo necessita ser atenuado. Dessa forma, as blindagens projetadas têm menor comprimento que a fonte, necessitando, assim, da representação das suas extremidades (terminações). A modelagem dessas terminações não pode ser realizada em estudos de blindagem em duas dimensões, como descrito no Capítulo 4.

Para avaliar o efeito das terminações das blindagens, as chapas metálicas nas configurações plana e em “H” foram simuladas em 3D. Não foram avaliadas todas as técnicas de mitigação discutidas no capítulo anterior devido ao maior custo computacional e, conseqüentemente, aumento do tempo de simulação requisitado para a resolução dos problemas em 3D.

A seguir, são apresentados os desempenhos das blindagens de chapas metálicas com diferentes comprimentos. Inicialmente, são avaliadas chapas com comprimentos de 4 e 6 metros, dispostas sobre um trecho de uma linha subterrânea com 10 metros de comprimento. Em seguida, são analisados os comprimentos das chapas maiores, necessitando da modelagem de trechos mais extensos dos cabos subterrâneos. Por fim, é

projetado um sistema de blindagem para a mitigação do campo em uma determinada região específica de interesse.

Vale lembrar que o domínio foi modelado com o mesmo comprimento do trecho subterrâneo, representando uma região específica que necessita ser blindada e que é percorrida por fonte de campo que se estende para as terminações do domínio.

5.3.1. Chapas de Quatro Metros de Comprimento

Nessa fase do estudo, foram simuladas as blindagens das chapas de alumínio plana e em “H” com 4 metros de comprimento. As dimensões das placas são as mesmas utilizadas na seção de validação, sendo apresentadas as dimensões das chapas na Figura 5.8.

Para o estudo da eficácia de blindagem, foram avaliados os perfis de campo magnético em três diferentes posições ao longo do comprimento da linha subterrânea. Dessa maneira, foi possível quantificar o desempenho na mitigação do campo em diferentes pontos ao longo da extensão da blindagem finita. A Figura 5.16 apresenta o posicionamento dos trechos em que foram calculadas as densidades de fluxo magnético, sendo avaliados os trechos no centro, na extremidade e na região externa à blindagem. Em cada um desses trechos, foi calculado o FR a partir da equação (2.7), determinando, assim, a eficácia da blindagem em diferentes regiões da placa e do seu entorno.

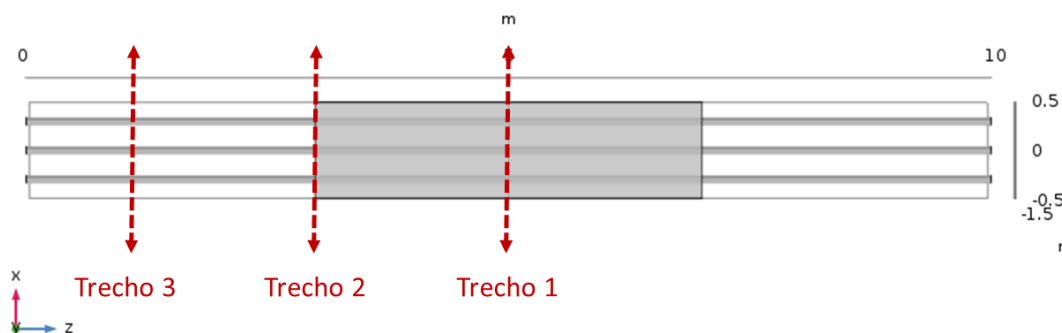


Figura 5.16 - Trechos ao longo do comprimento da linha onde foram calculados os perfis de campo para a chapa plana e em “H” com comprimento de 4 metros.

A Figura 5.17 apresenta os perfis de campo calculados para os três trechos considerando a blindagem com a chapa plana de 4 metros. Além disso, foram comparados

os perfis de campo obtidos com o calculado para a chapa plana infinita. Na Figura 5.18 foi apresentada a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo de toda a extensão longitudinal da linha subterrânea.

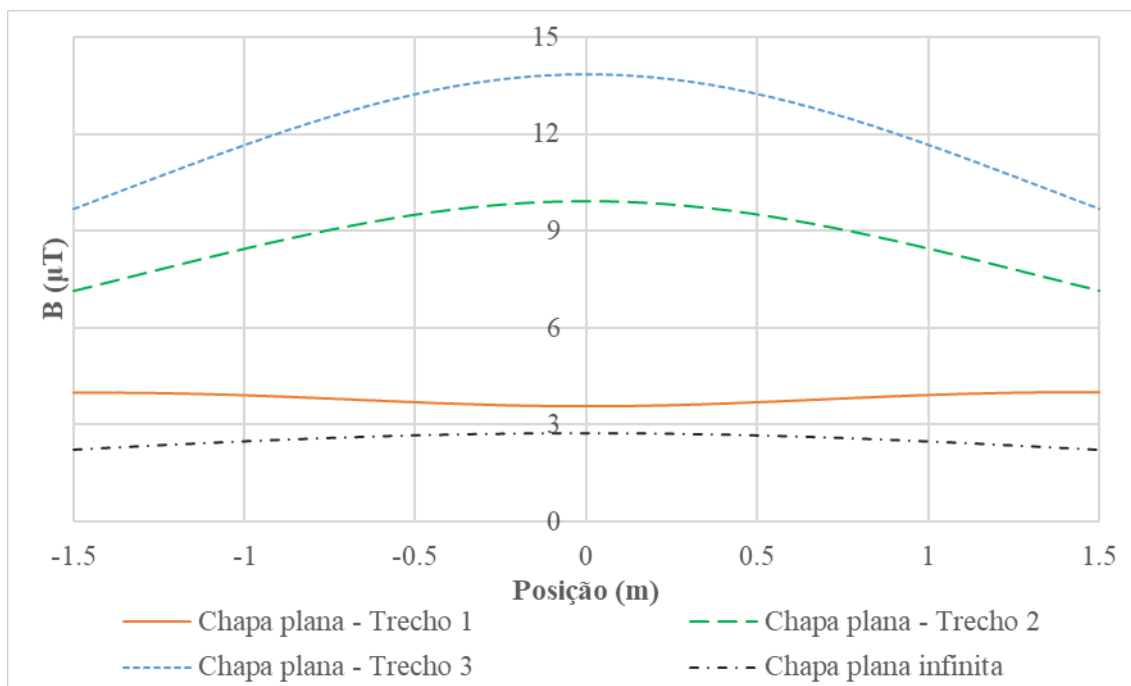


Figura 5.17 - Perfis de campo calculados para os três trechos da chapa plana com 4 metros e para a chapa plana infinita.

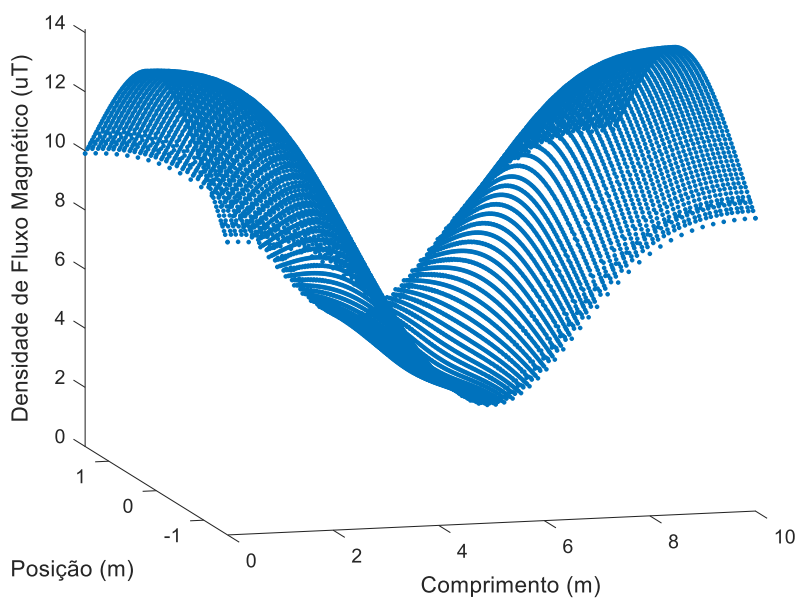


Figura 5.18 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa plana com 4 metros.

Observando a Figura 5.17, pode-se constatar que a eficácia na atenuação do campo varia ao longo do comprimento da blindagem. Analisando apenas a região central da blindagem (trecho 1), o fator de redução calculado é de 3,45. Todavia, ao avaliar o campo na extremidade da placa (trecho 2), a atenuação alcançada é de apenas 1,40. Na região externa a blindagem (trecho 3), é obtido o campo com a intensidade similar ao originado pela linha subterrânea, ou seja, sem efeito de mitigação. A variação da efetividade da blindagem por toda a extensão longitudinal pode ser visualizada na distribuição da densidade de fluxo do campo apresentada na Figura 5.18.

A representação da blindagem com comprimento finito faz com que as correntes induzidas nas placas formem um laço fechado, como mostra a Figura 5.19. Nas placas finitas, a distribuição das correntes difere das calculadas nas blindagens infinitas (Figuras 5.12 e 5.13), apresentando nas extremidades das placas maior densidade e direção perpendicular às correntes nos cabos. Portanto, a distribuição da corrente nesse laço fechado, junto com a disposição da blindagem somente em uma parte da fonte de campo, faz com que a atenuação provocada pelo sistema de mitigação não seja constante ao longo de toda a blindagem.

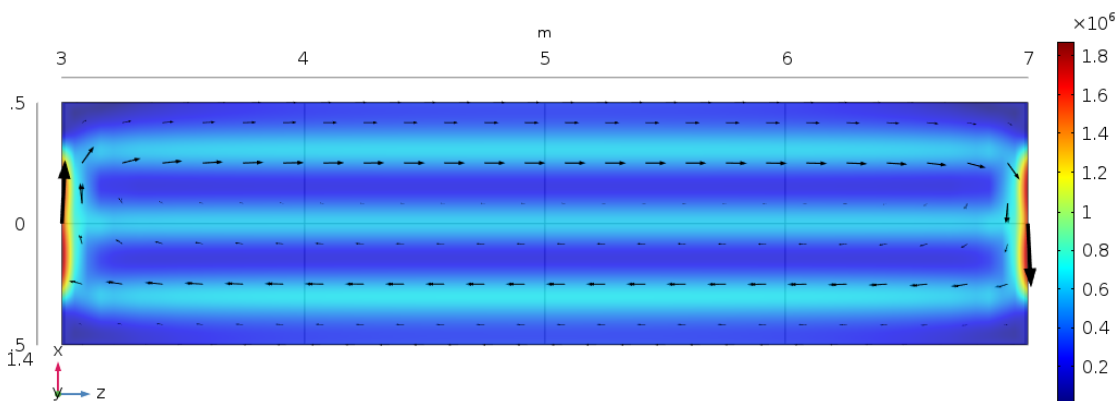


Figura 5.19 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa plana de 4 metros de comprimento.

Após o estudo da chapa plana, foi analisada a blindagem da chapa em “H” com 4 metros de comprimento. Os valores calculados dos perfis de campo nos três trechos e a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo da linha foram apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21, respectivamente.

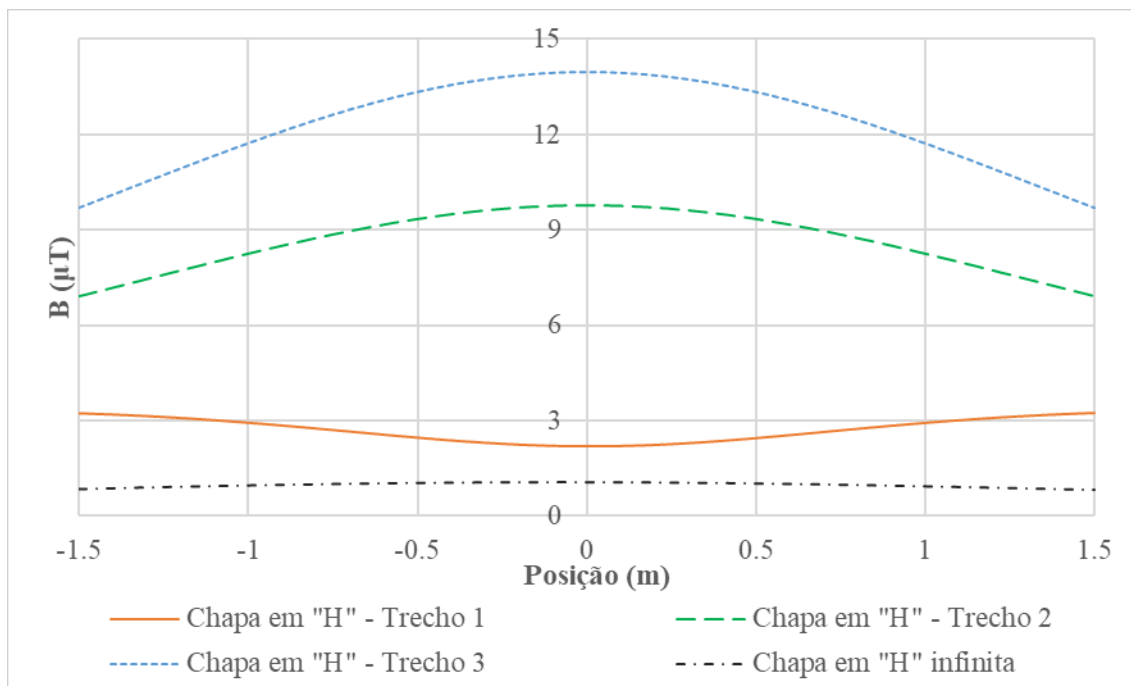


Figura 5.20 - Perfis de campo calculados para os três trechos da chapa em “H” com 4 metros e para a chapa em “H” infinita.

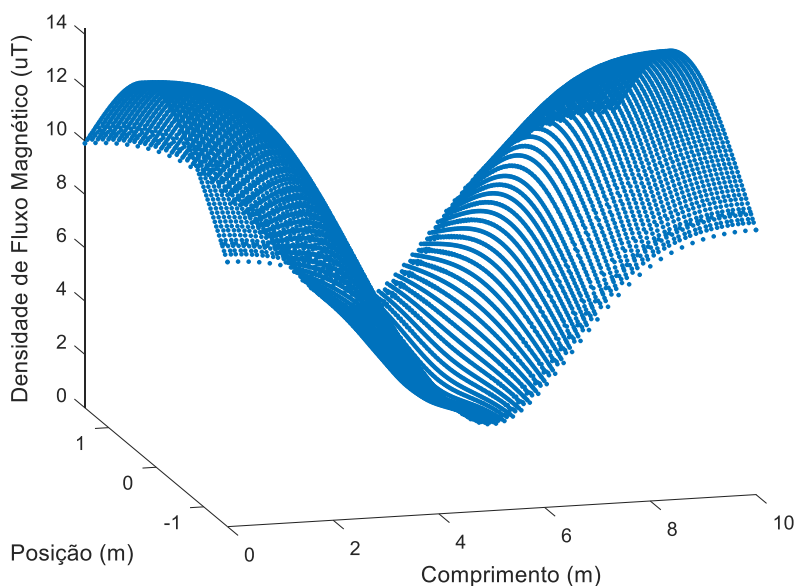


Figura 5.21 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa em “H” com 4 metros.

Analisando os resultados obtidos para a chapa em “H” com 4 metros, pode-se calcular os fatores de redução de 4,28 e 1,43 para a região central (trecho 1) e para a extremidade das placas (trecho 2), respectivamente. Os resultados encontrados reforçam a evidência já demonstrada que existe a variação da atenuação do campo ao longo do comprimento finito da blindagem, sendo imperceptível o efeito de mitigação na região

externa da chapa (trecho 3). De maneira similar à observada na chapa plana, as distribuições das correntes da chapa em “H” formam laços fechados nas placas horizontal e verticais, como ilustrado na Figura 5.22.

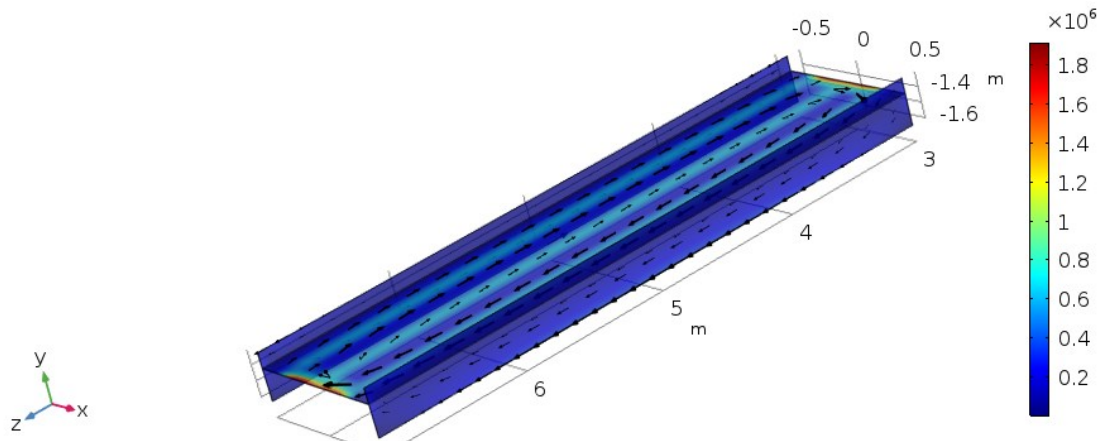


Figura 5.22 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa em “H” de 4 metros de comprimento.

Vale destacar que, para as chapas com 4 metros de comprimento, os FR obtidos na metade das placas são inferiores aos calculados nas blindagens infinitas (FR de 4,93 e 12,84 para chapa plana e em “H”, respectivamente). A diminuição desse parâmetro pode ser creditada aos valores mais elevados da densidade de fluxo magnético que foram calculados nas extremidades laterais dos perfis de campo. Logo, além da variação do desempenho da blindagem ao longo do comprimento da placa, pode-se inferir que a representação das terminações das chapas afeta nos valores de campo encontrados nas extremidades laterais. Diante disso, faz-se necessária a análise da influência do comprimento da blindagem na eficácia da mitigação do campo.

5.3.2. Chapas de Seis Metros de Comprimento

Para a avaliação do comprimento da blindagem, foram simuladas as chapas metálicas com 6 metros de extensão. Os perfis de campo foram calculados para quatro posições ao longo do sistema subterrâneo. Devido ao maior comprimento da placa, foi selecionada mais uma posição para o cálculo dos perfis de campo na comparação com as chapas de 4 metros. Os valores de campo foram novamente avaliados no centro, na

extremidade e na região externa das chapas. Os posicionamentos dos trechos foram detalhados na Figura 5.23, sendo quantificados os FR em cada trecho.

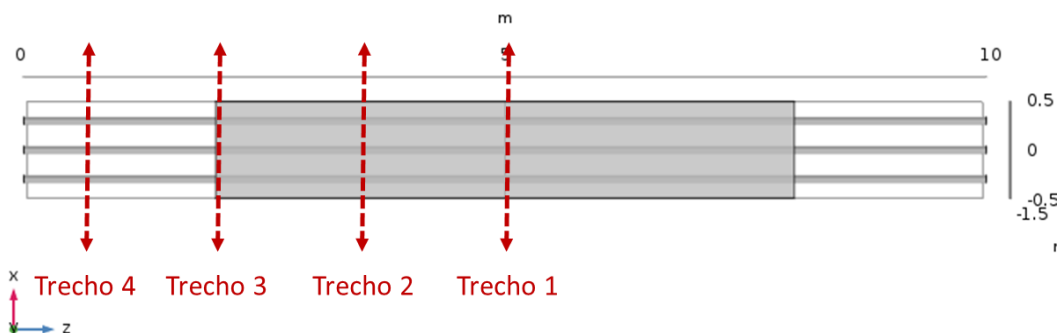


Figura 5.23 - Trechos ao longo do comprimento da linha onde foram calculados os perfis de campo para a chapa plana e em “H” com comprimento de 6 metros.

Os perfis de campo e a distribuição da densidade de fluxo magnético foram calculados ao longo da linha subterrânea para as blindagens das chapas plana e em “H”. Os resultados obtidos para as chapas com 6 metros de comprimento são apresentados nas Figuras 5.24 a 5.27.

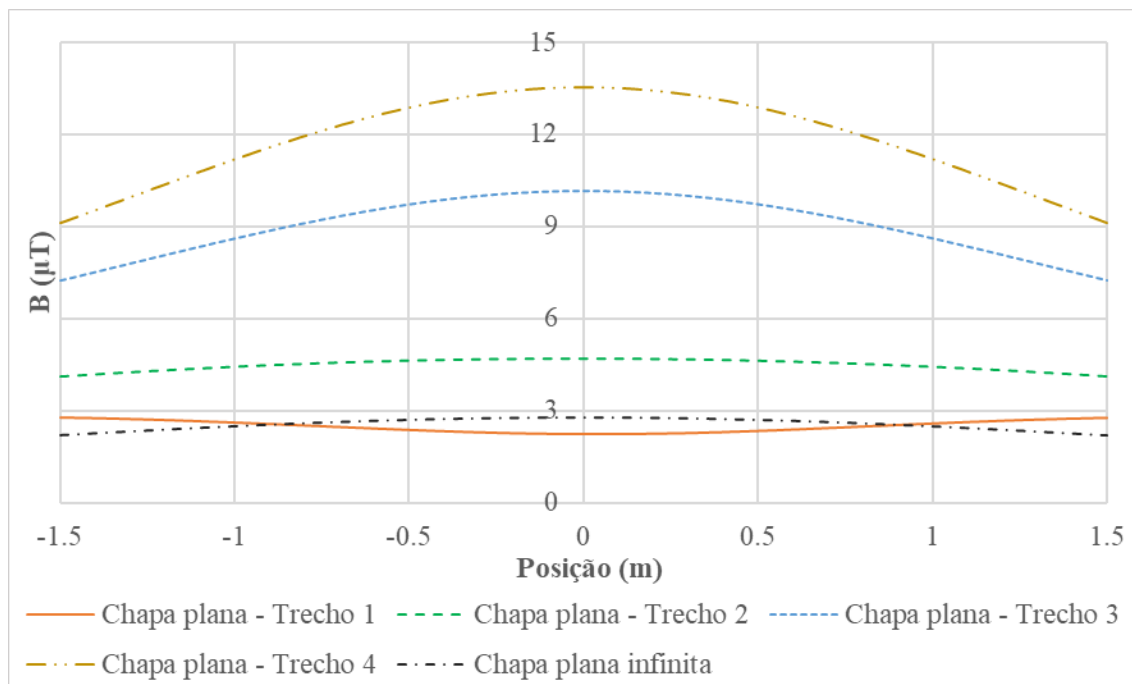


Figura 5.24 - Perfis de campo calculados para os quatro trechos da chapa plana com 6 metros e para a chapa plana infinita.

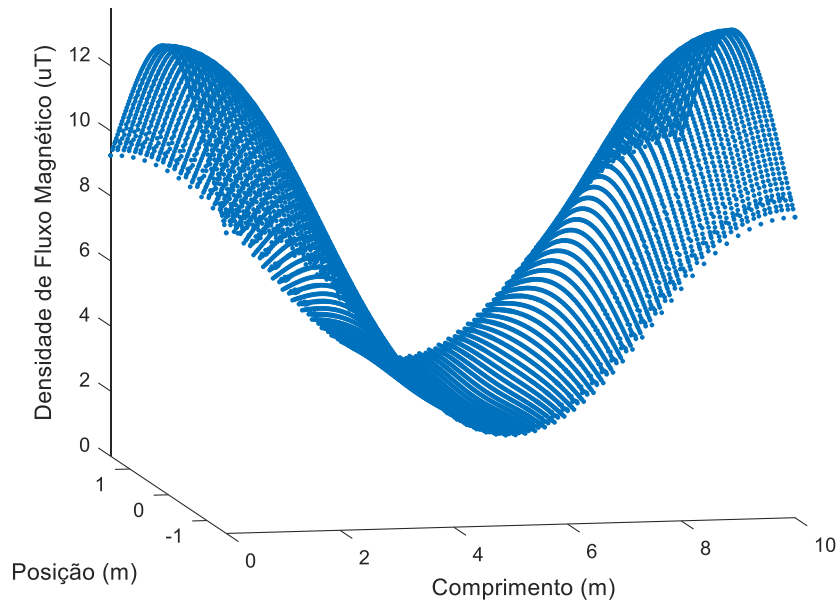


Figura 5.25 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa plana com 6 metros.

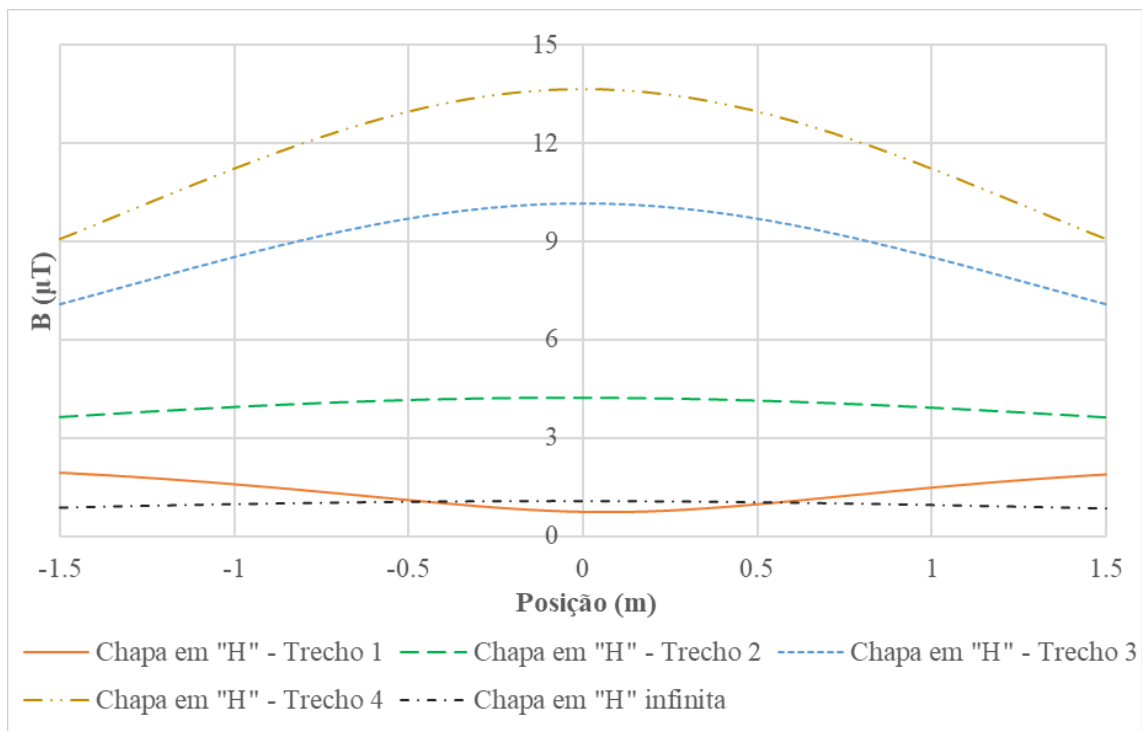


Figura 5.26 - Perfis de campo calculados para os quatro trechos da chapa em "H" com 6 metros e para a chapa plana infinita.

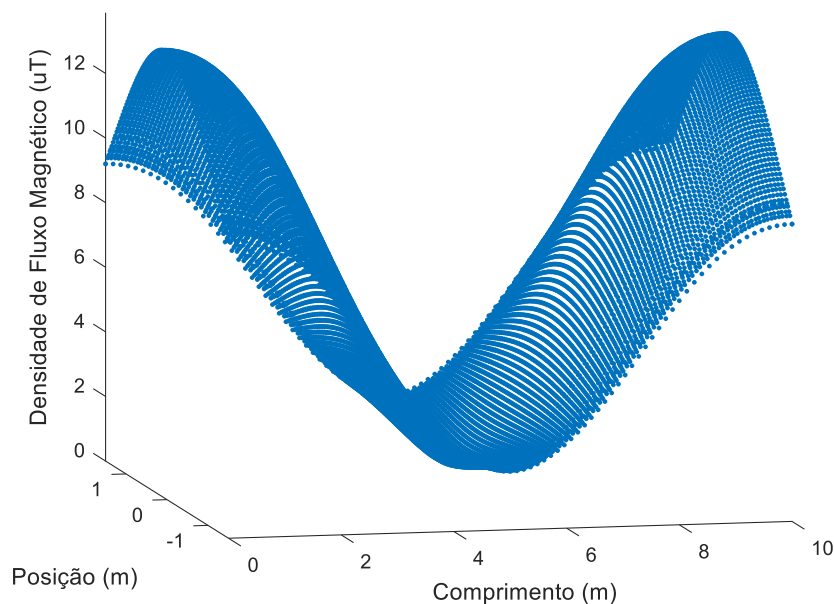


Figura 5.27 - Distribuição 3D da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento da linha subterrânea com a blindagem da chapa em “H” com 6 metros.

Analisando os resultados apresentados para as chapas com 6 metros, pode-se observar que a atenuação do campo de maior magnitude ocorre na metade das placas (FR de 4,88 e 7,07 para chapas plana e em “H”) e vai diminuindo à medida que aproxima das extremidades (FR de 1,32 e 1,35 para chapas plana e em “H”). Comparando as blindagens com 4 e 6 metros, nota-se que o aumento do comprimento da chapa resultou na maior atenuação do campo magnético no meio da placa (trecho 1). Contudo, os valores dos FR ainda são inferiores aos obtidos para as chapas infinitas, 4,93 e 12,84 para as chapas plana e em “H”. Essa diferença entre os fatores de redução se deve aos valores do campo magnético nas extremidades laterais das placas.

É interessante destacar que, caso seja analisado apenas o ponto central (posição de 0 metro), a mitigação proporcionada pelas chapas com 6 metros é superior à alcançada pelas placas infinitas. Além disso, para as posições acima das placas metálicas (no entorno de -0,5 a 0,5 metro), nota-se que os valores de campo são similares ou até mesmo inferiores na comparação das chapas de 6 metros com as blindagens infinitas. Todavia, para pontos lateralmente externos as placas ou regiões ao longo do comprimento da placa, a representação da terminação afeta consideravelmente o desempenho da blindagem. Maiores informações a respeito desse fenômeno e da variação no nível de mitigação do campo ao longo do comprimento da chapa são encontradas na seção 5.3.3 deste capítulo.

Assim como na blindagem com 4 metros de comprimento, a corrente também forma laços fechados nas chapas com 6 metros. Além desse fato, as maiores densidades de corrente foram observadas nas terminações finitas das chapas. Destaca-se que as densidades nas extremidades têm valores similares tanto nos dois tipos de chapas quanto nos dois comprimentos analisados. As distribuições das densidades de corrente nas chapas plana e em “H” com 6 metros de comprimento encontram-se nas Figuras 5.28 e 5.29, respectivamente.

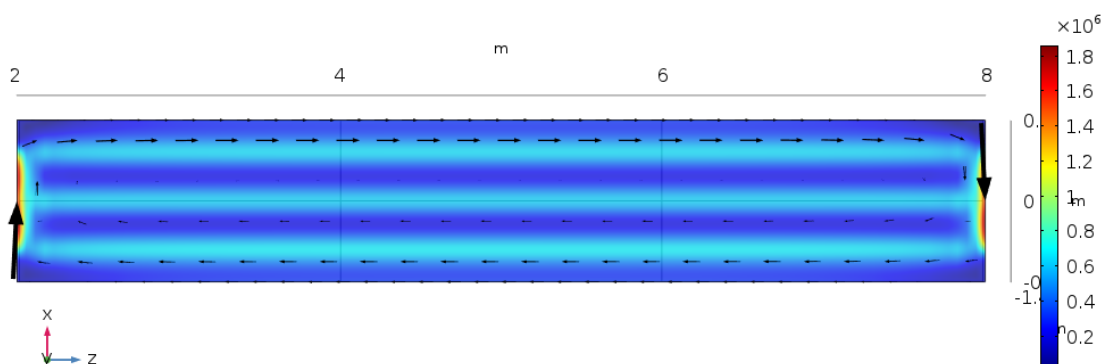


Figura 5.28 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa plana de 6 metros de comprimento.

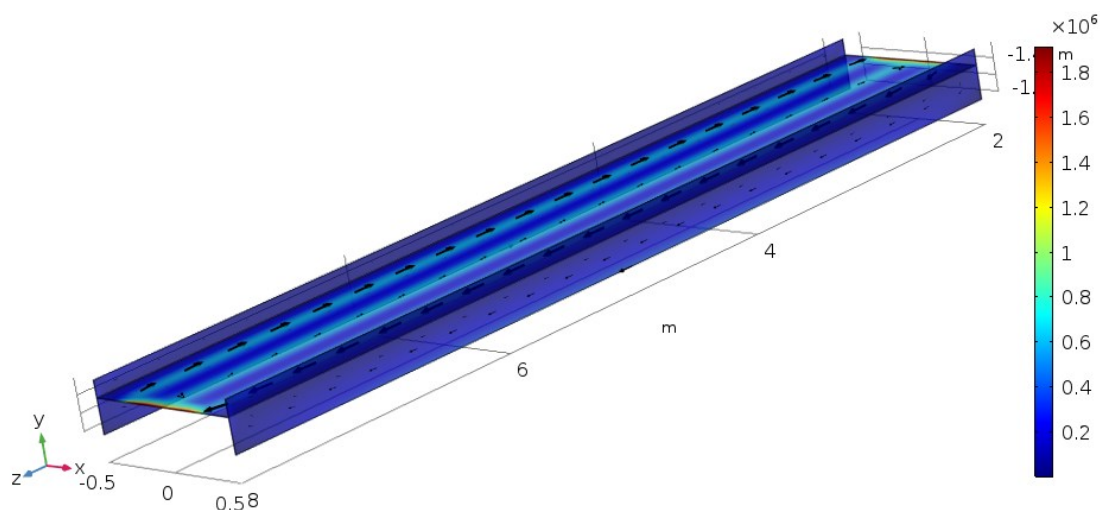


Figura 5.29 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa em “H” de 6 metros de comprimento.

5.3.3. Variação do Comprimento da Blindagem

Para avaliar a influência do comprimento das placas na eficácia das blindagens, foram simuladas chapas planas com dimensões longitudinais de 4, 6, 10, 12 e 15 metros.

O comprimento do trecho subterrâneo e, por esta razão, do domínio do problema 3D, foram acrescidos para simbolizar o comprimento infinito da fonte de campo, sendo usados domínios de 20 e 25 metros para as maiores chapas.

Ao analisar a atenuação do campo ao longo da chapa, constata-se no centro da placa uma região em que o campo resultante é inferior ao obtido na configuração infinita, como comprovam as Figura 5.24 e 5.26. Esse fenômeno fica mais perceptível no estudo dos maiores comprimentos das placas, sendo avaliadas as chapas plana com comprimento de 4 a 15 metros. As dimensões transversais foram mantidas constantes e os valores são detalhados na Figura 5.8(a).

A Figura 5.30 apresenta a vista superior da superfície de uma chapa plana de comprimento finito “L”. Para a análise do desempenho da blindagem, foi calculado o campo magnético na metade da largura da placa e ao longo de todo o comprimento, como detalhado na faixa de interesse da Figura 5.30.

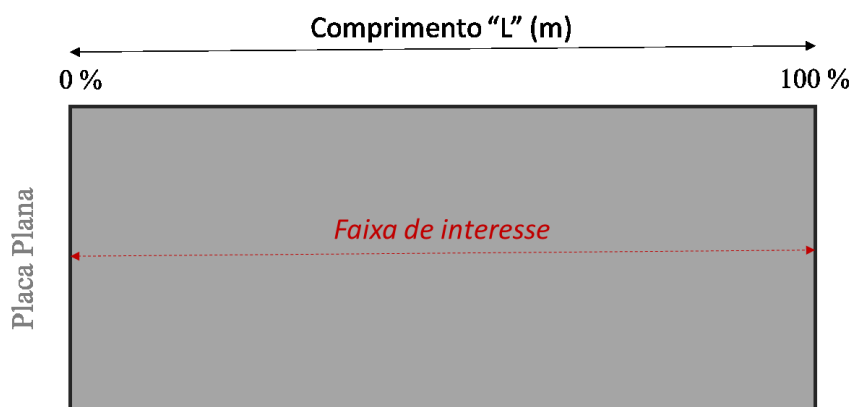


Figura 5.30 - Vista superior da chapa plana de comprimento “L” e da faixa de interesse na qual foi calculada a densidade de fluxo magnético.

As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam os valores do campo magnético calculados na faixa de interesse para as chapas planas com comprimento de 4, 6, 10, 12 e 15 metros. Vale ser destacado que, para facilitar a comparação do desempenho das diferentes chapas, foi normalizada a extensão longitudinal da placa, sendo apresentadas as curvas para a faixa de 0 a 100% do comprimento “L” de cada chapa plana.

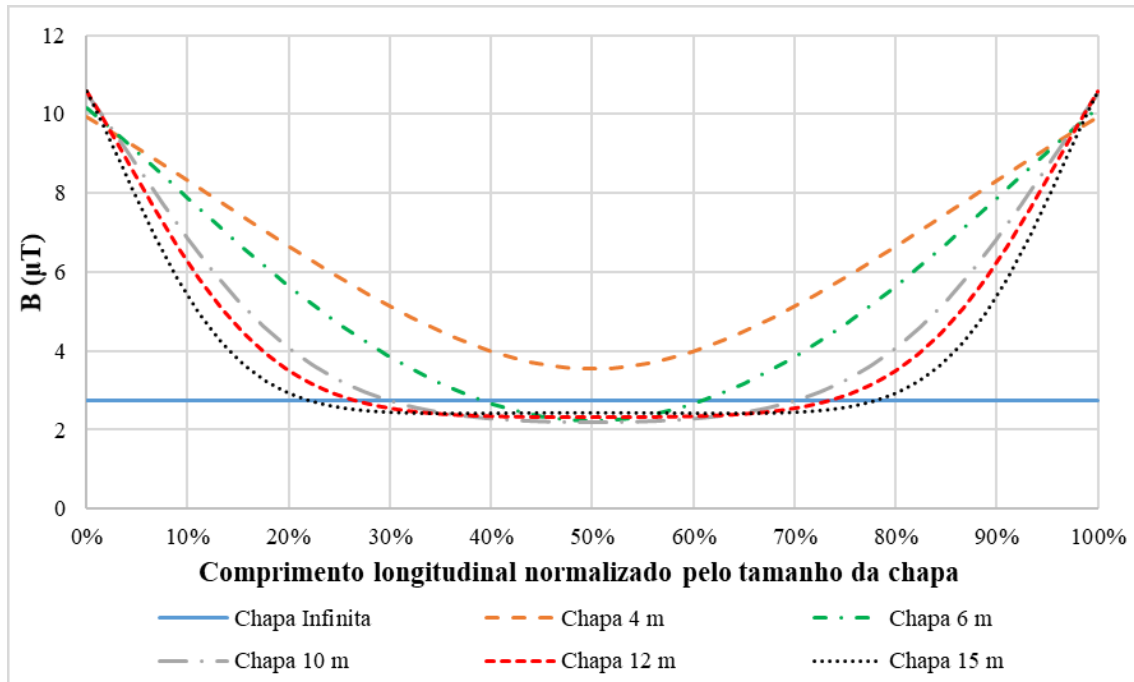


Figura 5.31 - Densidade de fluxo magnético calculada na faixa de interesse para as chapas plana com comprimentos de 4, 6, 10, 12 e 15 metros e comprimento infinito.

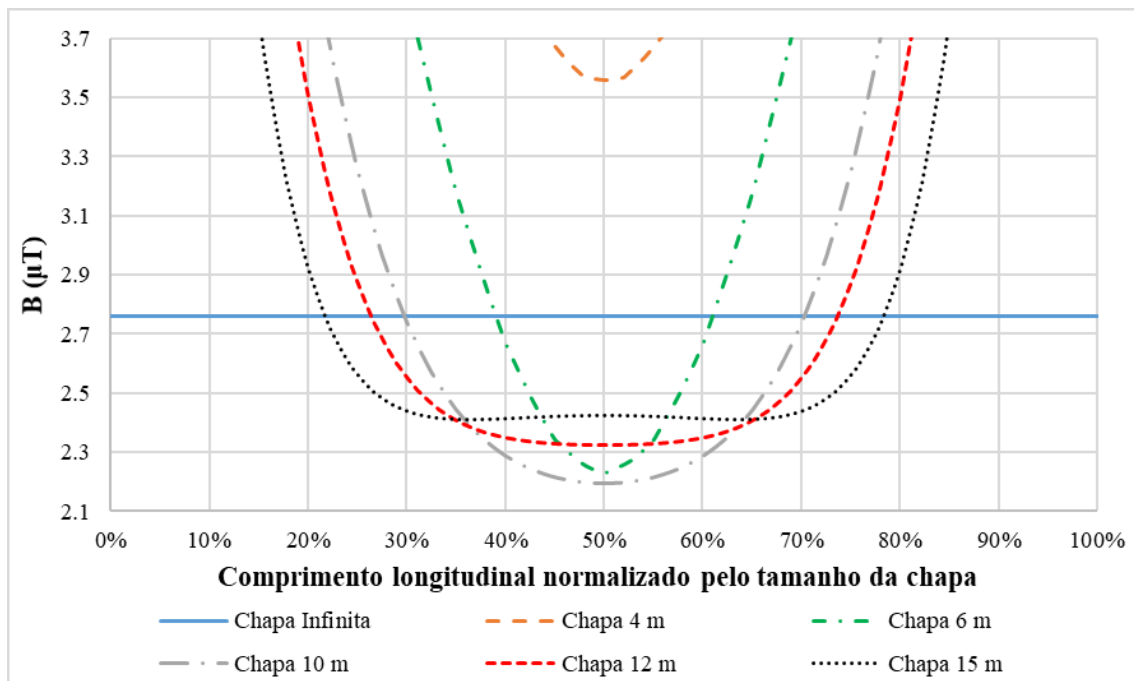


Figura 5.32 - Detalhamento da densidade de fluxo magnético calculada na faixa de interesse para as chapas plana com comprimentos de 4, 6, 10, 12 e 15 metros e comprimento infinito.

Considerando os resultados apresentados nas Figura 5.31 e Figura 5.32, observa-se a existência de uma faixa na qual a atenuação proporcionada pela chapa finita é superior à obtida pela chapa infinita. Essa maior redução se deve tanto ao comprimento

da placa quanto a presença das correntes induzidas nas terminações das blindagens. Como discutido anteriormente, na blindagem infinita, a distribuição das correntes induzidas se assemelha à da fonte do campo (Figuras 5.12 e 5.13), não existindo, assim, a maior intensidade da corrente nas extremidades das chapas. Ao considerar o comprimento finito, existe uma maior densidade de corrente nas bordas, de modo que os campos produzidos por essa parcela da corrente, juntamente com a distribuição da corrente em toda a chapa, resultam em maior atenuação na região central da placa. Todavia, à medida que se aproxima das terminações da placa, a eficiência na mitigação do campo vai reduzindo, acarretando em um campo resultante superior ao encontrado na chapa infinita.

Apesar da densidade de corrente nas extremidades, a blindagem com a chapa de 4 metros apresenta em toda extensão um desempenho pior que a blindagem infinita devido ao comprimento reduzido. Ao aumentar a placa para 6 metros, a dimensão da chapa e a densidade de corrente nas bordas resultam em um valor mínimo de campo, inferior ao da chapa infinita. Na chapa com 10 metros, são observados valor mínimo de campo ainda menor e aumento na extensão da faixa onde o campo é inferior ao obtido na chapa infinita.

No entanto, as chapas mais extensas (12 e 15 metros) apresentam os valores mínimos de campo superiores ao valor calculado para a placa de 6 metros. Isso pode ser creditado à maior distância das extremidades para o ponto central da placa, diminuindo, assim, o efeito de mitigação do campo originado nas extremidades no campo resultante. Todavia, o acréscimo na dimensão das chapas promove o aumento da faixa em que o campo é inferior ao valor obtido na blindagem infinita. Além disso, pode-se observar uma tendência de aproximação das curvas de campo das blindagens finitas com o valor uniforme da blindagem infinita à medida que o comprimento da chapa é aumentado. Como esperado, o acréscimo da extensão longitudinal da chapa finita faz com que a distribuição da densidade de corrente fique cada vez mais próxima da distribuição na blindagem infinita, resultando em valores similares de atenuação do campo magnético.

A Figura 5.33 apresenta a distribuição da densidade de corrente na chapa plana com 15 metros de comprimento. Ao comparar a magnitude da densidade de corrente com as chapas menores (Figura 5.19 e 5.28), observa-se a similaridade entre os valores nas terminações. Logo, o aumento das placas faz com que o campo produzido pela parcela da distribuição da corrente referente às extremidades seja menos efetivo na atenuação do campo originado pela fonte na região central. As chapas de 10 e 12 metros de

comprimento apresentam uma distribuição de corrente similar à observada na Figura 5.33.

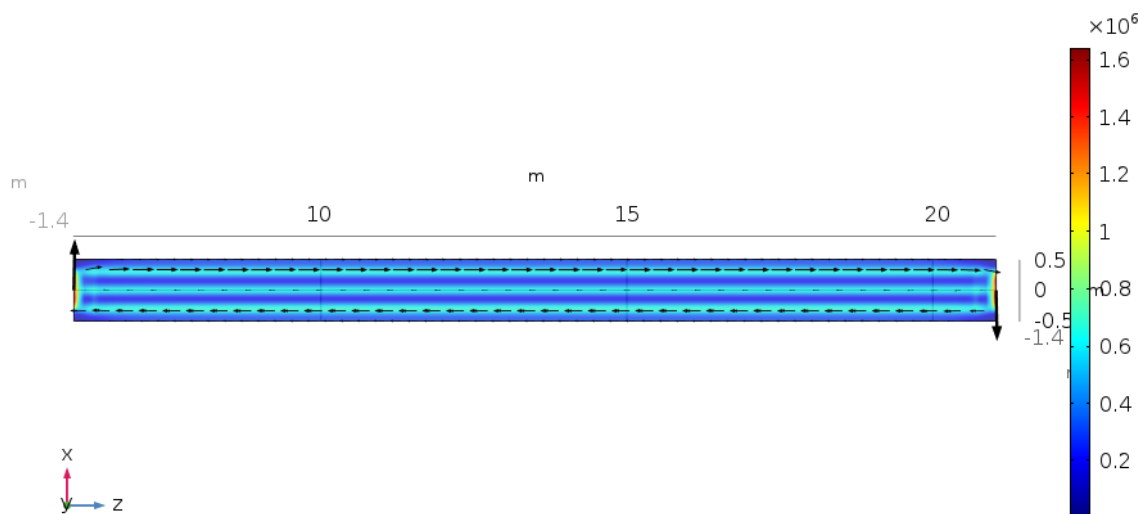


Figura 5.33 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem com a chapa plana de 15 metros de comprimento.

É interessante ressaltar que, ao analisar as densidades de fluxo magnético apresentadas na Figura 5.31, pode-se observar uma simetria nos valores ao longo do comprimento z , ou seja, os valores calculados na faixa de interesse foram simétricos em relação ao centro da chapa (50%). Esse comportamento corrobora a discussão realizada na seção 4.2.5 do capítulo anterior, onde analisou-se a relação da assimetria do campo magnético resultante com a sequência de fases. Ao avaliar o campo magnético ao longo do eixo z , a sequência das fases não influencia na assimetria do campo devido ao cálculo ser restrito ao ponto central e ao posicionamento das fases, que é constante ao longo de todo o domínio. Caso seja avaliado o perfil de campo ao longo do eixo x , poderá ocorrer assimetria do campo, como discutido no Capítulo 4. Contudo, essa assimetria poderá ser observada ao longo de todo o comprimento da blindagem.

Diante do exposto, uma análise mais completa da eficácia da blindagem não deverá levar em consideração apenas o ponto central, pois, além da atenuação de campo não ser uniforme, o comprimento da chapa afeta a eficácia da blindagem. A análise do perfil de campo, como apresentada nas seções anteriores 5.3.1 e 5.3.2, traz mais informações com relação ao desempenho da blindagem em um trecho específico. A Figura 5.34 apresenta os perfis de campo calculados no centro das chapas com os comprimentos de 4, 6, 10, 12 e 15 metros. Mais uma vez, os valores de densidade de fluxo

magnético que formam os perfis de campo foram calculados para uma altura de 1 metro do nível do solo e posicionamento lateral de -1,5 a 1,5 metro.

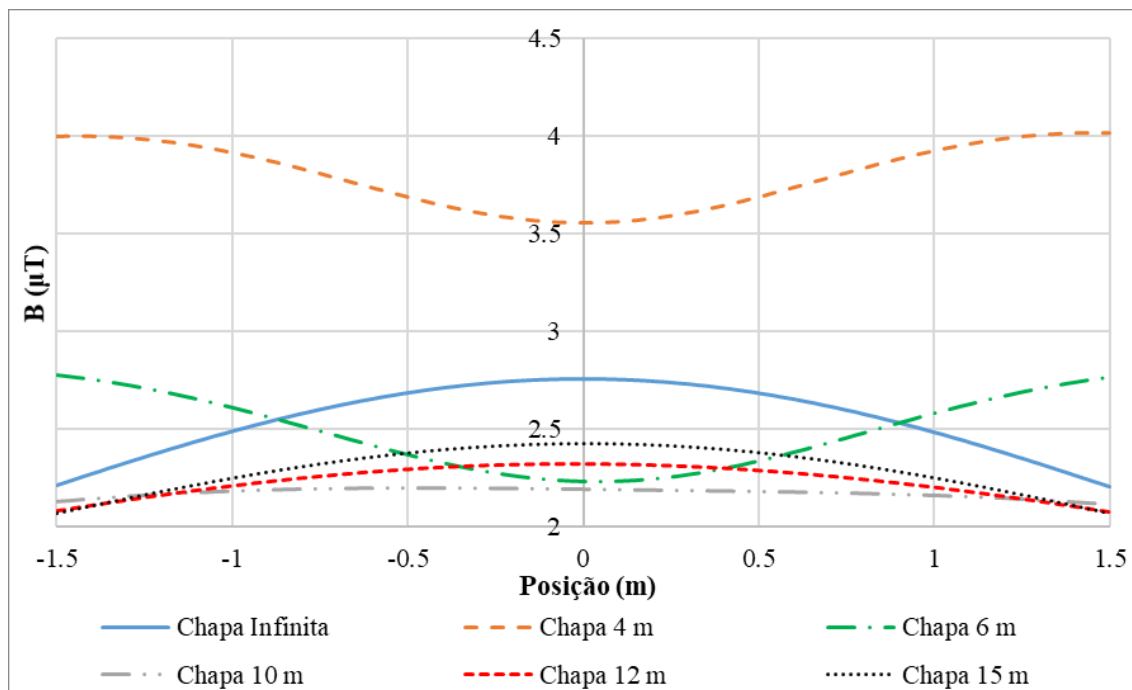


Figura 5.34 - Perfis de campo calculado no centro das chapas plana com os comprimentos de 4, 6, 10, 12, 15 metros e infinito.

Diferentemente da análise do problema 2D, no qual o FR quantifica o nível de eficácia da blindagem e permite a comparação entre as técnicas de mitigação, no problema 3D a utilização única desse parâmetro vinculado ao perfil de campo poderá informar de maneira incorreta a eficiência do sistema de blindagem.

Apesar do cálculo do fator de redução possibilitar a determinação em três dimensões, como apresentado nas equações 2.1 e 2.2, a variação do campo magnético ao longo do sistema de blindagem pode inviabilizar a comparação desse parâmetro. Além disso, faz-se necessária a determinação de uma região de interesse em que o campo magnético precisa ser atenuado para o cálculo do FR.

Em situações reais, além da definição da região de interesse, se estabelece o valor limite da densidade de fluxo magnético que poderá ser encontrado naquela região. A partir dessas informações, projeta-se o sistema de blindagem para reduzir o valor do campo abaixo do valor máximo permitido em toda a região de interesse.

5.3.4. Projeto da Blindagem

Para exemplificar a análise para o projeto de um sistema de blindagem, foi considerada uma região de interesse que possui 6 metros de comprimento, 3 metros de largura e está acima do nível do solo. A Figura 5.35 apresenta as vistas das superfícies lateral e superior da região de interesse descrita. A fonte de campo magnético considerada é o sistema de transmissão trifásico subterrâneo modelado anteriormente nesse capítulo.

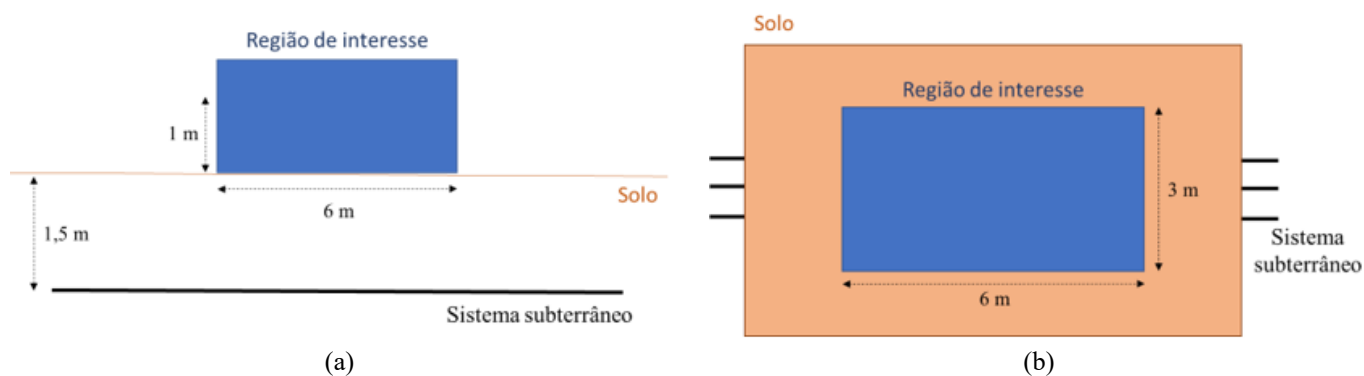


Figura 5.35 - Região de interesse junto com a fonte de campo magnético para análise do projeto de blindagem em 3D: (a) vista lateral e (b) vista superior.

A partir da definição da região de interesse, foi projetado um sistema de blindagem que consegue reduzir o campo magnético na região até o valor limite $3 \mu\text{T}$. Os valores do campo magnético foram calculados na altura de 1 metro do nível do solo. A Figura 5.36 apresenta a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo da região de interesse sem a presença do sistema de blindagem. Os valores calculados mostram que, em toda a região de interesse, o campo foi superior ao valor crítico de $3 \mu\text{T}$, chegando ao valor máximo de $13,58 \mu\text{T}$.

Para a definição da técnica de mitigação a ser utilizada, a estimativa inicial do desempenho da blindagem pode ser realizada a partir de simulações simplificadas, ou seja, do problema 2D. Com base nesses resultados, o problema pode ser modelado em 3D para a determinação do comprimento do sistema de blindagem e, assim, o cálculo mais preciso da eficácia da atenuação do campo magnético e do impacto térmico.

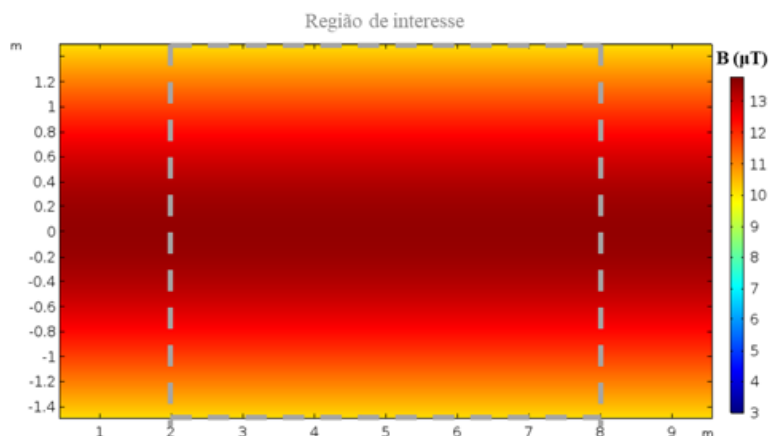


Figura 5.36 - Distribuição da densidade de fluxo magnético sem a presença do sistema de blindagem.

Diante do exposto, a partir da simulação do problema 2D, foi escolhida a blindagem com a chapa plana de alumínio. Essa técnica de mitigação reduz o campo originado pela fonte em aproximadamente 4,9 vezes, resultando em um campo inferior ao limite de $3 \mu\text{T}$. As dimensões modeladas da chapa encontram-se ilustradas na Figura 5.8(a).

Com a definição do tipo e das dimensões da blindagem, foi simulado o problema em três dimensões para a avaliação do desempenho da chapa com diferentes comprimentos. As Figuras 5.37, 5.38 e 5.39 apresentam os resultados da distribuição da densidade de fluxo magnético para as chapas planas com comprimentos de 6, 10 e 12 metros, respectivamente. Para facilitar a visualização dos resultados, nas regiões cujos valores de campo são inferiores a $3 \mu\text{T}$, a densidade de fluxo magnética é preenchida na cor branca.

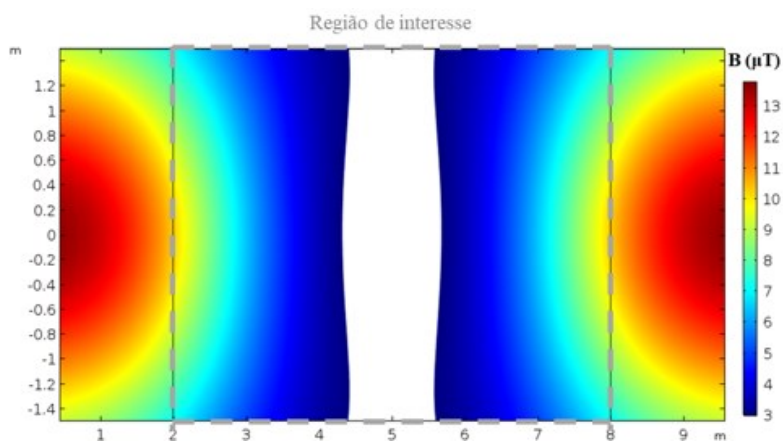


Figura 5.37 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para a blindagem com a chapa plana de 6 metros de comprimento.

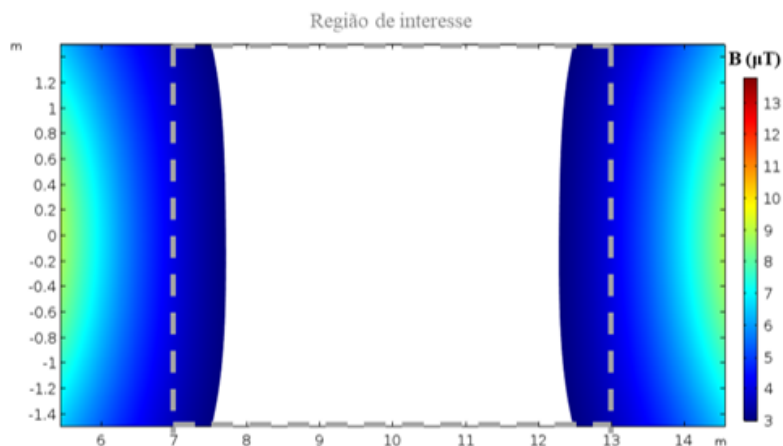


Figura 5.38 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para a blindagem com a chapa plana de 10 metros de comprimento.

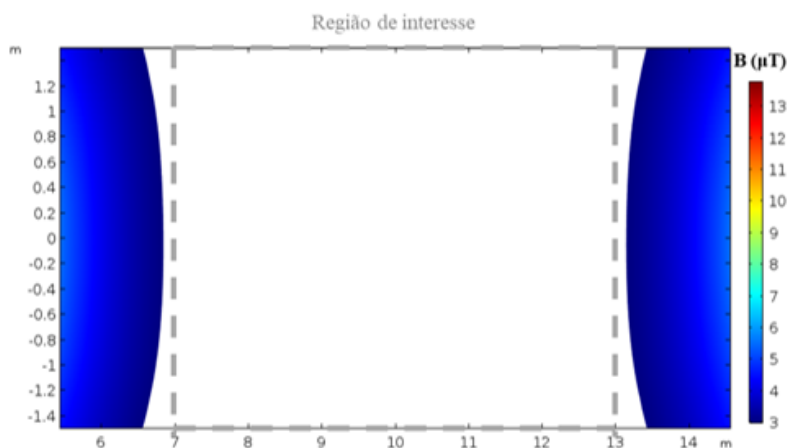


Figura 5.39 - Distribuição da densidade de fluxo magnético para a blindagem com a chapa plana de 12 metros de comprimento.

Analisando os resultados apresentados, constata-se que o uso de uma blindagem com o mesmo comprimento da região de interesse (6 metros) não é capaz de atenuar o campo na medida necessária, alcançando o resultado apenas na área central. Esse desempenho se deve à variação da eficácia da blindagem ao longo do comprimento da faixa, como discutido na seção anterior. Para conseguir atender o critério de atenuação do campo, é necessário aumentar o comprimento da chapa plana.

Para a blindagem com a chapa de 10 metros, apenas as posições das extremidades da região de interesse apresentaram valores de campo ligeiramente superiores ao limite de $3 \mu\text{T}$. Dessa forma, com aumento da chapa para 12 metros é possível reduzir o campo em toda a região de interesse, como mostra a Figura 5.39.

Diante disso, pode-se concluir que o projeto de um sistema de blindagem não deverá analisar o campo em um único ponto de interesse ou na faixa central da placa, mas em toda a região de interesse que necessita da atenuação da densidade de fluxo magnético. Para isso, faz-se necessária a modelagem da blindagem em 3D para a representação dos efeitos das terminações na atenuação do campo e, a partir disso, do verdadeiro desempenho da técnica de mitigação. O cálculo 2D pode ser utilizado como uma ferramenta preliminar do projeto do sistema de blindagem.

5.3.5. Cálculo Térmico

Após a modelagem em 3D e a avaliação do campo magnético, foram analisados os resultados do cálculo térmico para verificar as vantagens proporcionadas pelo aperfeiçoamento da modelagem computacional para 3D. Para a análise do estudo térmico, foram apresentados os resultados das chapas plana e em “H” com comprimentos de 4 e 6 metros. A Tabela 5.3 apresenta comparação das temperaturas calculadas nos condutores subterrâneos e nas placas para as blindagens da chapa plana e em “H”. Além disso, foram apresentadas nas Figuras 5.40 a 5.43 as distribuições da temperatura ao longo do comprimento dos condutores subterrâneos para as blindagens metálicas analisadas.

Tabela 5.3 - Comparação dos valores de temperatura calculados nas três fases do sistema subterrâneo e na blindagem considerando as chapas plana e em “H” com 4 e 6 metros de comprimento.

Temperatura (°C)	Chapa plana com 4 metros	Chapa plana com 6 metros	Chapa plana infinita
Fase A	89,06	90,24	90,95
Fase B	91,79	92,50	93,22
Fase C	89,53	90,32	91,03
Blindagem	68,91	69,32	69,95
Temperatura (°C)	Chapa em “H” com 4 m	Chapa em “H” com 6 m	Chapa em “H” infinita
Fase A	88,05	88,47	89,14
Fase B	90,80	90,96	91,25
Fase C	87,79	88,38	89,05
Blindagem	67,70	67,77	67,83

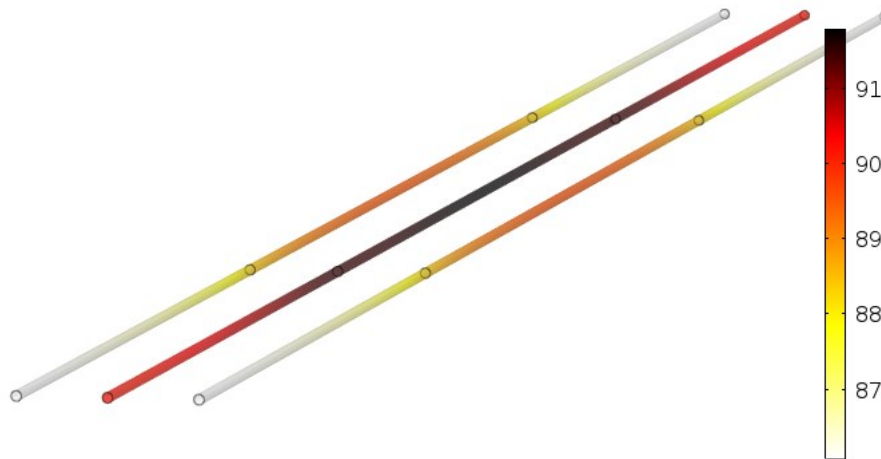


Figura 5.40 - Distribuição da temperatura dos condutores (°C) ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa plana com 4 metros.

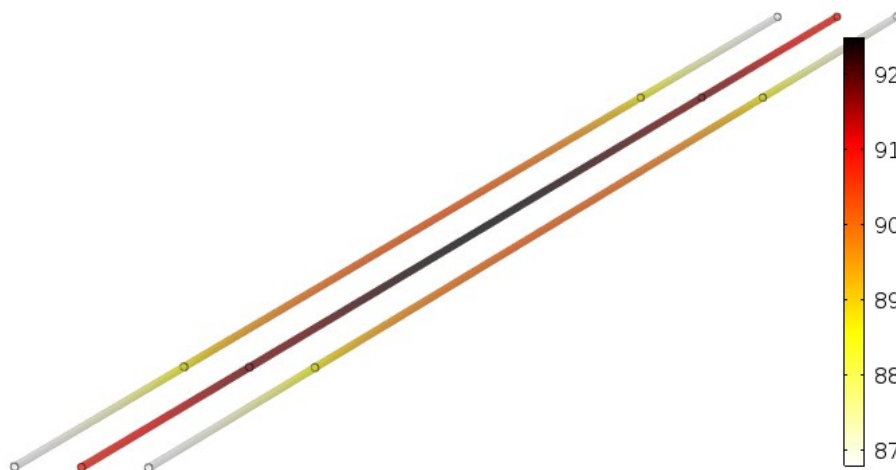


Figura 5.41 - Distribuição da temperatura (°C) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa plana com 6 metros.

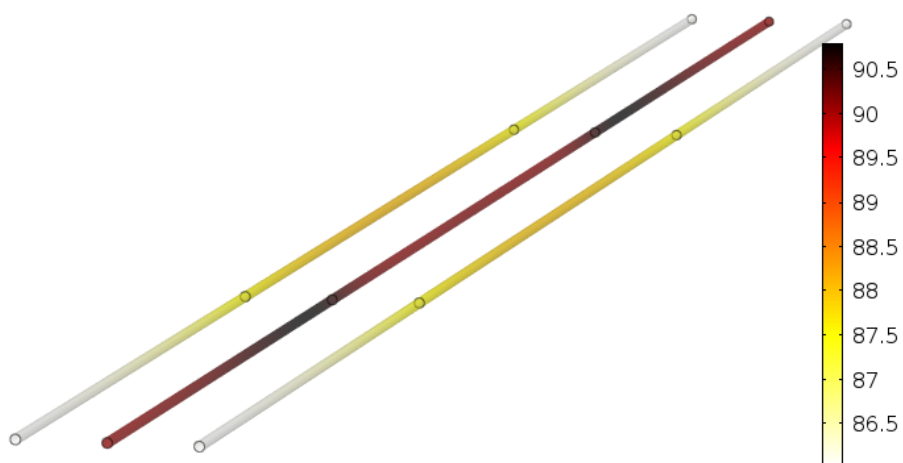


Figura 5.42 - Distribuição da temperatura (°C) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa em "H" com 4 metros.



Figura 5.43 - Distribuição da temperatura ao longo dos condutores do sistema subterrâneo sobre o efeito da blindagem da chapa em “H” com 6 metros.

A modelagem das blindagens com comprimento finito resulta na menor elevação da temperatura na linha. O menor aquecimento, na comparação com o provocado pela chapa infinita, ocorre devido à inserção de uma fonte de calor com menor dimensão na proximidade do sistema subterrâneo. Além disso, o impacto térmico provocado pelo aquecimento da blindagem acontece mais intensamente no trecho da linha que se encontra abaixo das chapas, diferenciando, assim, das configurações infinitas que apresentam o valor constante de temperatura na extensão longitudinal dos condutores (Figura 5.19 e 5.22).

Diferentemente do problema magnético, a representação em 3D apresenta resultados térmicos similares aos obtidos na simplificação 2D. Apesar dos valores de temperatura calculados serem ligeiramente inferiores e existirem pontos quentes (“*hot spots*”) nos cabos subterrâneos, o aperfeiçoamento da modelagem para três dimensões não se faz necessária para a análise térmica desse tipo de fonte de campo magnético. Contudo, caso a fonte de campo apresente diferentes espaçamentos entre os cabos ou trechos com o cruzamento de condutores, a modelagem 3D poderá ser necessária para a avaliação do problema térmico.

5.4. Considerações Finais

Nesse capítulo, foi dada continuidade aos estudos de técnicas de mitigação do campo magnético de baixa frequência, que foram apresentados e discutidos no Capítulo

4. Nos estudos preliminares, foram analisadas diferentes técnicas de blindagem, sendo quantificado o desempenho de cada alternativa a partir da representação simplificada do problema no modelo 2D. A partir desses estudos, pode-se avaliar com o aperfeiçoamento do modelo computacional para três dimensões os efeitos das terminações dos sistemas de blindagem. Os resultados do cálculo do campo magnético e da temperatura foram obtidos a partir do *software* COMSOL *Multiphysics*[®].

Nos estudos realizados no presente capítulo, a fonte de campo magnético modelada foi um trecho de um sistema de transmissão trifásico subterrâneo, similar ao analisado em capítulos anteriores. É importante ressaltar que, apesar do problema ter sido modelado em 3D, os cabos subterrâneos foram considerados infinitamente longos, desprezando-se os efeitos das terminações dos condutores.

Antes de projetar os sistemas de blindagens em três dimensões, foi validado o cálculo 3D do campo magnético e da temperatura. Para isso, foram comparados os resultados obtidos em simulações 3D, nas quais as blindagens foram consideradas infinitamente longas, com resultados previamente conhecidos de problemas 2D.

Nesse projeto, foram avaliadas as blindagens com placas metálicas, sendo modeladas as configurações das chapas de alumínio plana e em “H”. Os comprimentos analisados das chapas foram de 4, 6, 10, 12 e 15 metros. Ao modelar as terminações das chapas, pode-se observar a variação significativa da eficácia na redução do campo ao longo do comprimento das blindagens. À medida em que se aproxima das extremidades das placas, nota-se a redução no desempenho da blindagem, evidenciando a necessidade de se utilizar um sistema de blindagem mais extenso que a região de interesse. Além disso, na comparação com as chapas infinitas, observou-se que algumas chapas finitas apresentam maior atenuação do campo na região central da placa. Esse comportamento pode ser creditado à parcela da corrente induzida nas terminações da placa.

Com relação ao estudo do impacto térmico no trecho convencional do sistema de transmissão subterrâneo, a modelagem em 3D apresenta resultados similares aos modelos simplificados em 2D. Para as características do problema analisado, não foi necessário o aperfeiçoamento do modelo computacional para avaliação do problema térmico.

Entretanto, para o cálculo da densidade de fluxo magnético em uma região de interesse, o projeto de sistemas de blindagem em três dimensões mostra-se fundamental para a avaliação do comprimento da blindagem. A partir da modelagem mais completa,

torna-se possível determinar o desempenho real da técnica de mitigação, uma vez que toda a configuração da blindagem pode ser representada. O modelo 2D deve ser visto como um estudo preliminar do projeto de um sistema de blindagem, podendo estimar o nível de atenuação do campo e o impacto térmico proporcionado na linha.

Com relação a estimativa de atenuação, o FR calculado no modelo 2D deverá ser utilizado como valor máximo ou próximo que poderá ser obtido na blindagem real. Contudo, apenas com a definição do comprimento do sistema de blindagem, será possível o cálculo do verdadeiro desempenho da blindagem em toda a região de interesse.

No próximo capítulo, é realizado o estudo de caso de uma situação que necessita da aplicação de técnicas de mitigação do campo magnético e da modelagem do problema em três dimensões. Nesse estudo de caso, foi modelado o trecho de uma caixa de emendas do sistema subterrâneo com as dimensões de projetos reais. Para representar de maneira fidedigna a fonte de campo, faz-se necessário o uso da modelagem 3D, pois os espaçamentos entre as fases variam ao longo do comprimento do trecho. Além disso, a simulação do problema em três dimensões possibilita a determinação das configurações e das dimensões do sistema de blindagem projetado para ser colocado no entorno da caixa de emendas.

Para a realização das simulações dos problemas 3D analisados, necessitou-se da utilização do servidor que se encontra no LEAT da UFMG. A simulação 3D demanda uma quantidade de memória RAM muito superior às simulações 2D. Dessa forma, o servidor, que possui a memória RAM de 128 GB, foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Vale ser destacado que, mesmo nessa máquina de alta capacidade, o tempo de simulação foi de aproximadamente 4 a 7 dias. O elevado número de elementos necessários para malhar todo o problema 3D faz com que o esforço computacional e, por consequência, o tempo de simulação, sejam muito superiores aos obtidos nas análises em duas dimensões. Uma alternativa para minimizar o número de elementos e aumentar a qualidade da malha é a utilização da função *swept*.

6. ESTUDO DE CASO

6.1. Introdução

Neste capítulo, é apresentado um estudo de caso do projeto de um sistema de blindagem para o trecho da caixa de emendas de uma linha subterrânea. Esse trecho do sistema subterrâneo foi definido para análise e projeto do sistema de blindagem devido à variação do afastamento entre as fases dos condutores ao longo da caixa de emendas. A alteração no espaçamento entre os condutores não pode ser representada nos estudos em duas dimensões, justificando, assim, a modelagem do problema em 3D para a avaliação do desempenho da blindagem.

Primeiramente, são apresentados os resultados da simulação da caixa de emendas sem a presença da blindagem, sendo avaliados os valores do campo magnético nas proximidades da região e o perfil da temperatura ao longo do trecho. A partir da modelagem da caixa de emendas, foi projetado o sistema de blindagem para reduzir o campo magnético até o valor limite estabelecido.

As simulações dos problemas em duas e em três dimensões foram realizadas para projetar o sistema de blindagem. A partir desses cálculos, foram definidas a técnica de mitigação e a sua respectiva configuração para atendimento dos requisitos de atenuação necessários. Os resultados das simulações e as análises realizadas para o projeto do sistema de blindagem são apresentados no presente capítulo. Todas as simulações foram realizadas pelo *software* COMSOL *Multiphysics*[®].

6.2. Caixa de Emendas

No estudo de caso da caixa de emendas foi modelado um trecho com dimensões reais do local onde é realizada a junção dos cabos subterrâneos. Para a representação fidedigna do problema, foram considerados os trechos do sistema subterrâneo que existem antes e após a caixa de emendas. Nesses trechos, o espaçamento considerado entre as fases foi o convencional (30 centímetros). Com a representação dos trechos convencionais e da caixa de emendas, considerou-se o comprimento de todo o domínio

em 25 metros. A Figura 6.1 apresenta as dimensões detalhadas do sistema de transmissão subterrâneo modelado com a caixa de emendas.

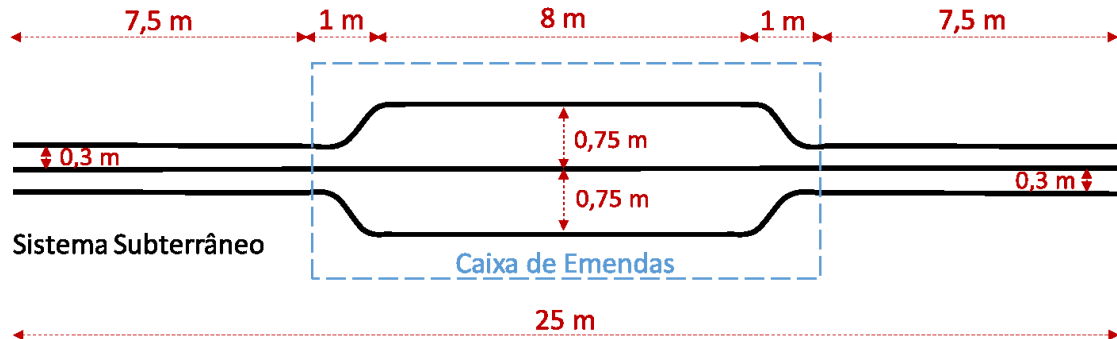


Figura 6.1 - Dimensões do sistema de transmissão subterrâneo com a caixa de emendas que foi modelado para o estudo de caso.

As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam o domínio do problema e o sistema subterrâneo modelados em três dimensões. Vale destacar que, assim como discutido no Capítulo 5, na modelagem 3D faz-se necessária a conexão dos cabos nas extremidades do domínio, representando o sistema subterrâneo de comprimento infinitamente longo. Essa consideração é coerente para o estudo de caso realizado, uma vez que no sistema subterrâneo a região da caixa de emendas tem comprimento muito inferior ao dos cabos no trecho convencional. Dessa forma, pode-se representar de modo fidedigno a alteração no espaçamento das fases na caixa de emendas e, conseqüentemente, os efeitos na distribuição do campo magnético e na temperatura dos condutores.

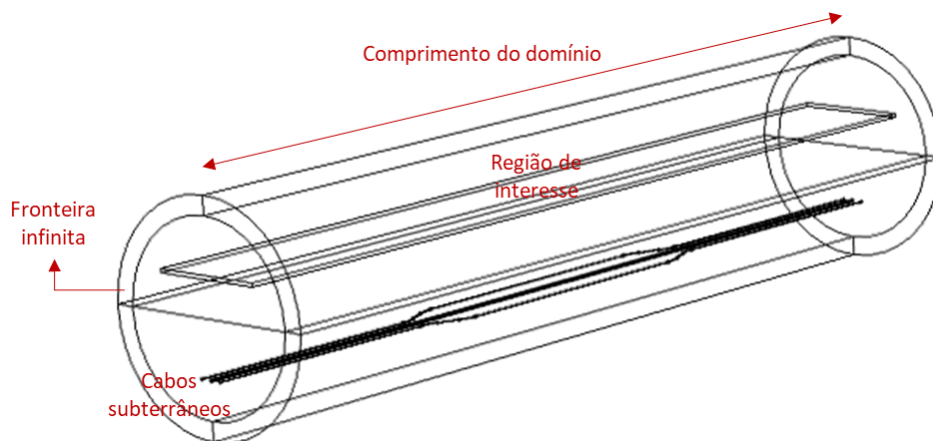


Figura 6.2 - Domínio modelado em 3D do sistema subterrâneo com a caixa de emendas.

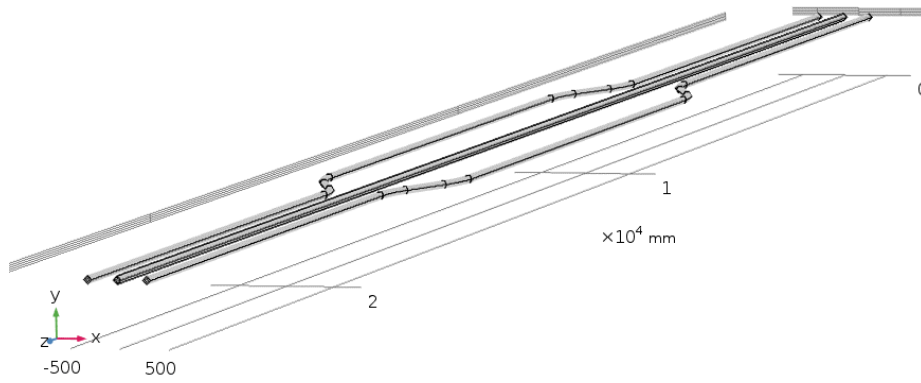


Figura 6.3 - Sistema subterrâneo com a caixa de emendas modelado para o estudo de caso.

O sistema subterrâneo foi modelado com o espaçamento entre as fases de 75 centímetros na caixa de emendas e de 30 centímetros no trecho convencional. Os cabos de alta tensão foram considerados enterrados a 1,5 metro de profundidade e os seus parâmetros construtivos foram detalhados na Tabela 3.2. Novamente, a corrente injetada nas fases foi de 827 A, correspondendo à corrente nominal do sistema subterrâneo. Maiores informações a respeito da determinação da ampacidade da linha subterrânea podem ser encontradas na seção 3.3.1 do presente trabalho.

Em virtude do maior afastamento dos condutores na região da caixa de emendas, o campo magnético é superior ao obtido no trecho convencional. As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam a distribuição da densidade de fluxo magnético calculada a 1 metro do nível do solo na região de interesse da Figura 6.1.

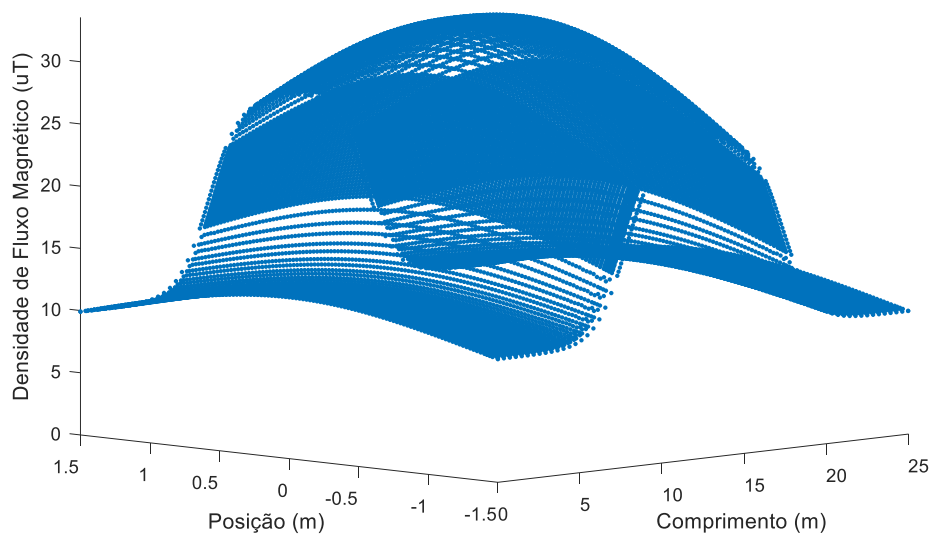


Figura 6.4 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo (vista frontal).

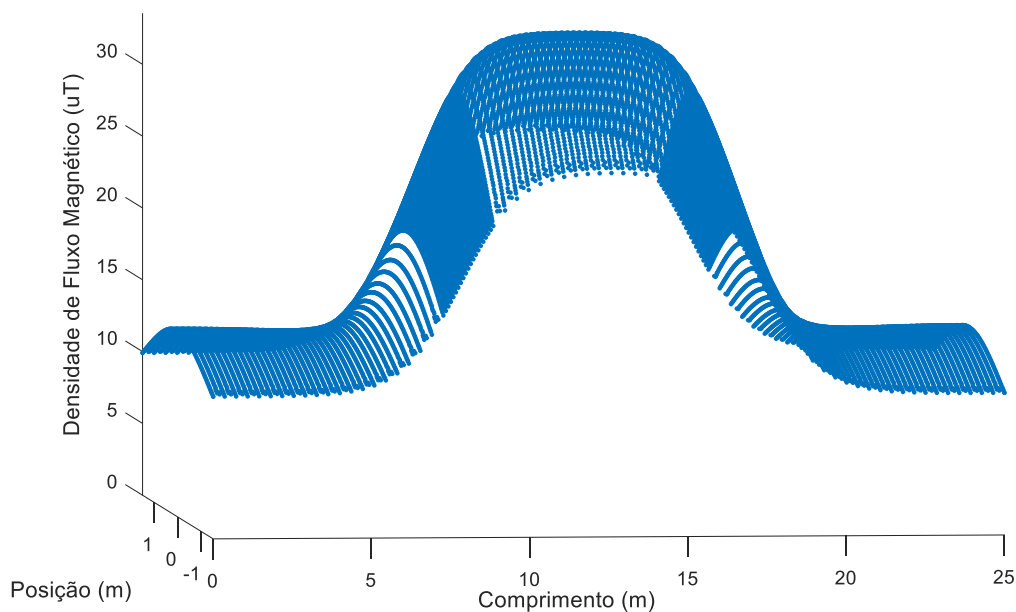


Figura 6.5 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo (vista lateral).

Observando os valores da densidade de fluxo magnético das Figuras 6.4 e 6.5, percebe-se a maior intensidade na região da caixa de emendas. Logo, o trecho onde ocorre a junção dos cabos corresponde a região crítica com relação ao campo magnético, necessitando, assim, de projetos de blindagem específicos para tal região.

Com o intuito de verificar os resultados da simulação 3D, foram comparados os valores da densidade de fluxo magnético com resultados obtidos na modelagem em duas dimensões. Para isso, foi calculado o perfil de campo na região central do domínio do problema em três dimensões, ou seja, na metade do comprimento da caixa de emendas (posição de 12,5 metros da Figura 6.1).

A Figura 6.6 apresenta a comparação dos perfis de campo dos valores da densidade de fluxo magnético calculados nas simulações 2D e 3D da caixa de emendas. Vale ser destacado que, devido as simplificações do modelo 2D, o espaçamento entre as fases é constante em 75 centímetros em todo o comprimento do trecho subterrâneo. Sendo assim, o modelo 2D não permite representar o afastamento e a aproximação que existe entre as fases ao longo do trecho da caixa de emendas (Figura 6.3).

Como esperado, os perfis de campo calculados na caixa de emendas para os problemas 2D e 3D são similares, com diferenças inferiores a 5% na comparação entre os valores máximos das densidades de fluxo magnético. Essa discrepância entre os

valores pode ser creditada pela diferença existente entre os modelos, ou seja, pelo posicionamento dos condutores nos trechos onde ocorre a mudança no espaçamento entre as fases.

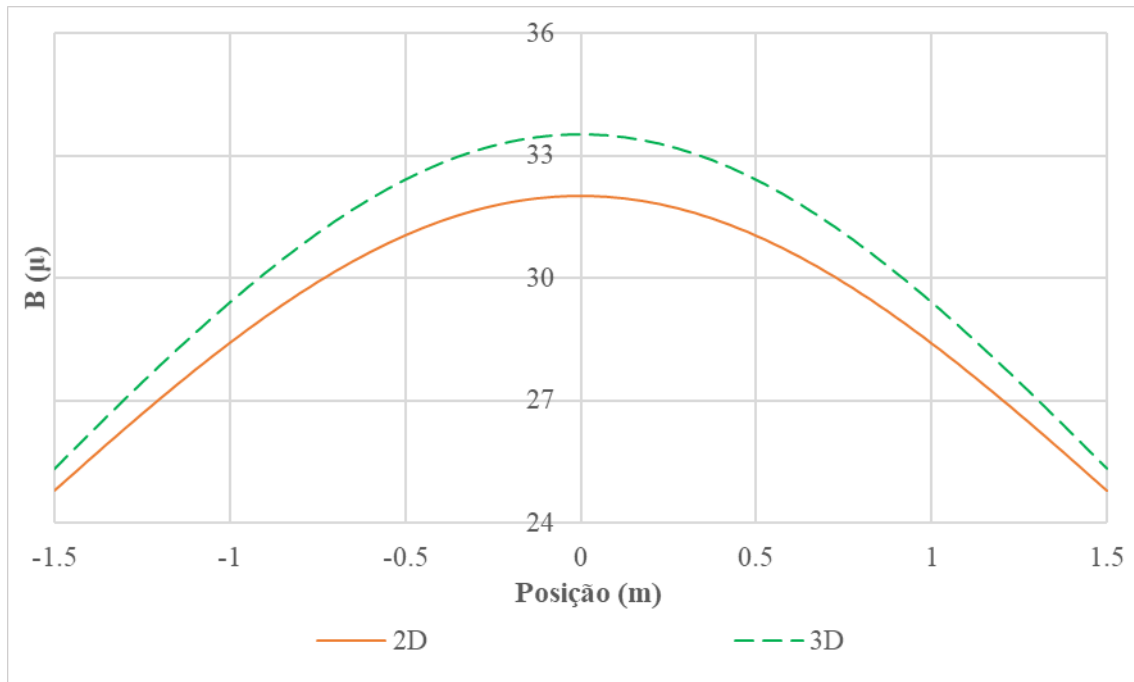


Figura 6.6 - Comparação dos perfis de campo calculados para os problemas 2D e 3D da caixa de emenda do sistema subterrâneo sem a presença de blindagem.

Além da análise do problema magnético, foi calculada a distribuição da temperatura dos condutores ao longo do comprimento do sistema subterrâneo. Como esperado, o maior espaçamento entre as fases resulta no menor impacto térmico no trecho da caixa de emendas. Todavia, para atenuar o campo em toda a região de junção dos cabos, o sistema de blindagem a ser utilizado deverá ter comprimento superior ao da caixa de emendas (8 metros), como discutido no capítulo anterior. Dessa forma, justifica-se mais uma vez a necessidade da modelagem dos trechos externos à caixa de emendas, uma vez que esses pontos podem se tornar os mais críticos com relação a temperatura (“*hot spots*”). A Figura 6.7 apresenta a distribuição da temperatura ao longo de todo o trecho do sistema subterrâneo com a caixa de emendas.

A maior temperatura nas fases foi obtida no condutor central e nas extremidades do domínio, alcançando o valor de 89,3°C. Essa temperatura foi similar à temperatura máxima suportável pelo isolamento do cabo (90°C). No trecho da caixa de emendas,

devido ao maior espaçamento entre as fases, a temperatura calculada no condutor central foi superior a $77,7^{\circ}\text{C}$.

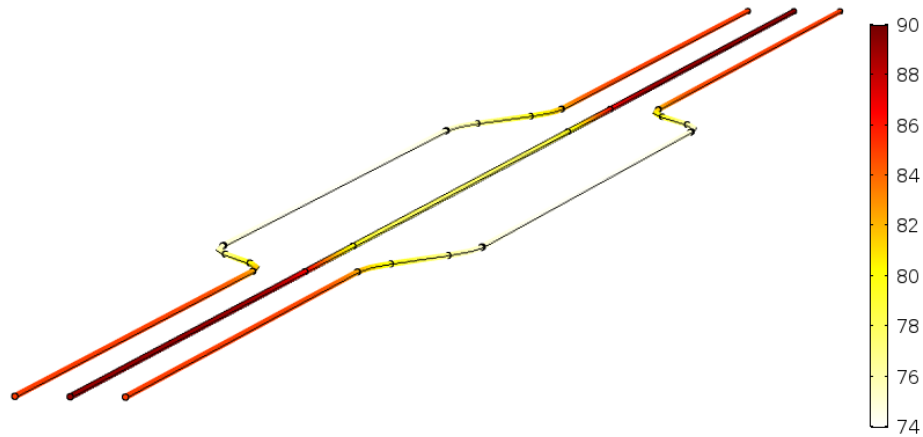


Figura 6.7 - Distribuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos condutores ao longo do sistema subterrâneo com a caixa de emendas e sem a presença da blindagem.

6.3. Projeto do Sistema de Blindagem

O sistema de blindagem foi projetado para reduzir a densidade de fluxo magnético até o valor de $15\ \mu\text{T}$. Vale destacar que a região de interesse (detalhada na Figura 6.2) foi considerada com altura de 1 metro do nível do solo. O valor limite foi estabelecido a partir do campo magnético originado pelo trecho convencional do sistema subterrâneo, cujo valor máximo da densidade de fluxo magnético é de $13,55\ \mu\text{T}$.

Dessa forma, a blindagem deverá atenuar o campo magnético nas proximidades da caixa de emendas para adequar ao limite estabelecido. O objetivo desse estudo foi avaliar um caso prático, onde é preciso atenuar o campo no entorno de uma caixa de emendas do sistema subterrâneo.

Considerando as características da fonte de campo e da necessidade da mitigação do campo em uma determinada região, foi escolhido o posicionamento da blindagem próximo aos cabos subterrâneos, ou seja, a blindagem da fonte de campo na região de interesse.

A técnica de mitigação escolhida para esse estudo de caso é a blindagem com chapas metálicas. Essa alternativa permite a disposição das chapas a uma determinada distância dos cabos subterrâneos, tornando mais simples e prática a instalação das placas.

Em decorrência da redução do campo magnético ser de aproximadamente duas vezes, é selecionada a blindagem com a chapa plana. Essa escolha é orientada pelos estudos preliminares de técnicas de mitigação apresentados no Capítulo 4.

O tipo de material escolhido para placa metálica é o alumínio. Apesar das placas de alumínio apresentarem desempenho pior do que as de cobre, como discutido no Capítulo 4, o custo da chapa de alumínio torna mais viável a solução proposta. Além disso, como não se faz necessária a atenuação completa do campo magnético e a caixa de emendas não apresenta uma região com maior impacto térmico nos condutores, pode-se adotar a blindagem com a chapa plana.

A distância para o sistema subterrâneo, a largura e a espessura da placa foram estimadas previamente a partir da simulação do problema em duas dimensões. A Figura 6.8 apresenta a vista transversal com as dimensões do sistema de blindagem com relação ao trecho da caixa de emendas. A Figura 6.9 apresenta a comparação dos perfis de campo calculados para a modelagem 2D na ausência e na presença da chapa plana.

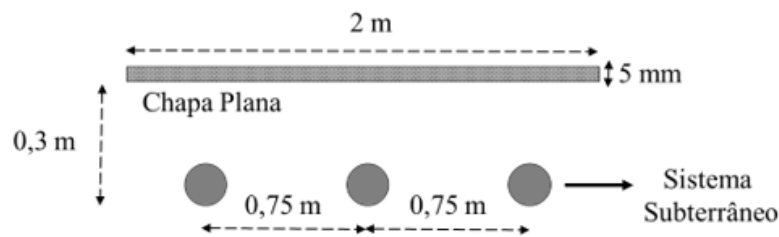


Figura 6.8 - Dimensões da blindagem com a chapa plana de alumínio: espessura, largura e distância para o sistema subterrâneo.

A partir dos resultados dos perfis de campo apresentados na Figura 6.9, é calculado o FR da chapa plana em 4,07. As dimensões da placa, detalhadas na Figura 6.8, são escolhidas para se obter uma atenuação do campo magnético em aproximadamente 4 vezes, ou seja, o dobro do nível de mitigação necessário. É imprescindível a maior redução devido ao desempenho da blindagem variar ao longo do comprimento da placa, como discutido na seção 5.3.3 do presente trabalho.

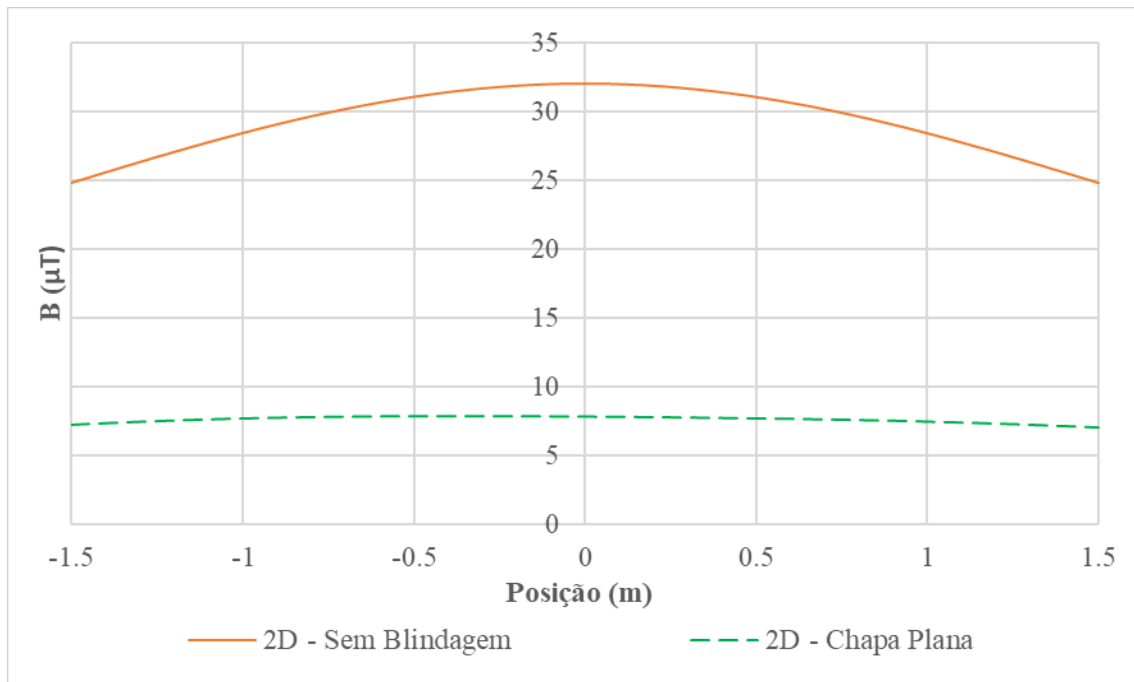


Figura 6.9 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema 2D da caixa de emendas sem blindagem e com a chapa plana.

A partir da análise dos resultados preliminares do projeto em duas dimensões, foi possível definir o comprimento da placa e, assim, avaliar o desempenho do sistema de blindagem proposto. A Figura 6.10 ilustra a vista superior da chapa plana projetada para o trecho com a caixa de emendas. Para conseguir a atenuação requisitada, é utilizada uma placa de alumínio de 14 metros de comprimento.

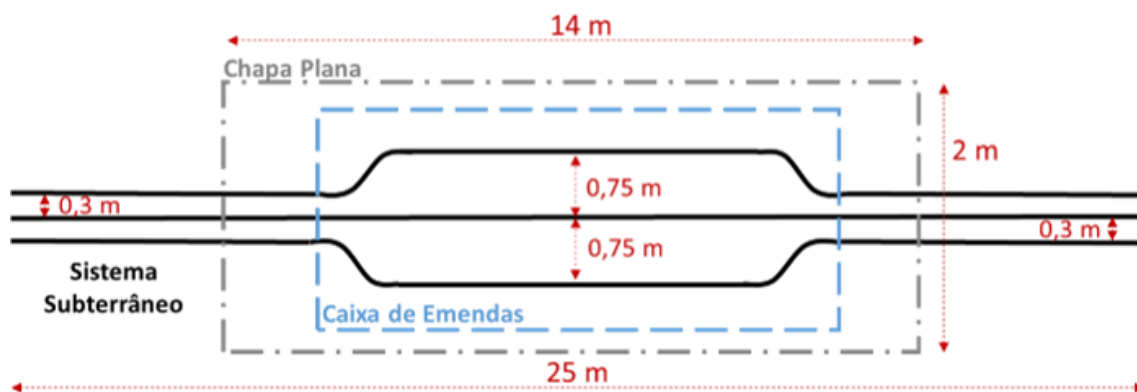


Figura 6.10 - Vista superior da disposição da chapa plana de alumínio sobre o trecho da caixa de emendas do sistema subterrâneo.

As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam a distribuição 3D da densidade de fluxo magnético calculada ao longo do comprimento do sistema subterrâneo com a presença da chapa plana.

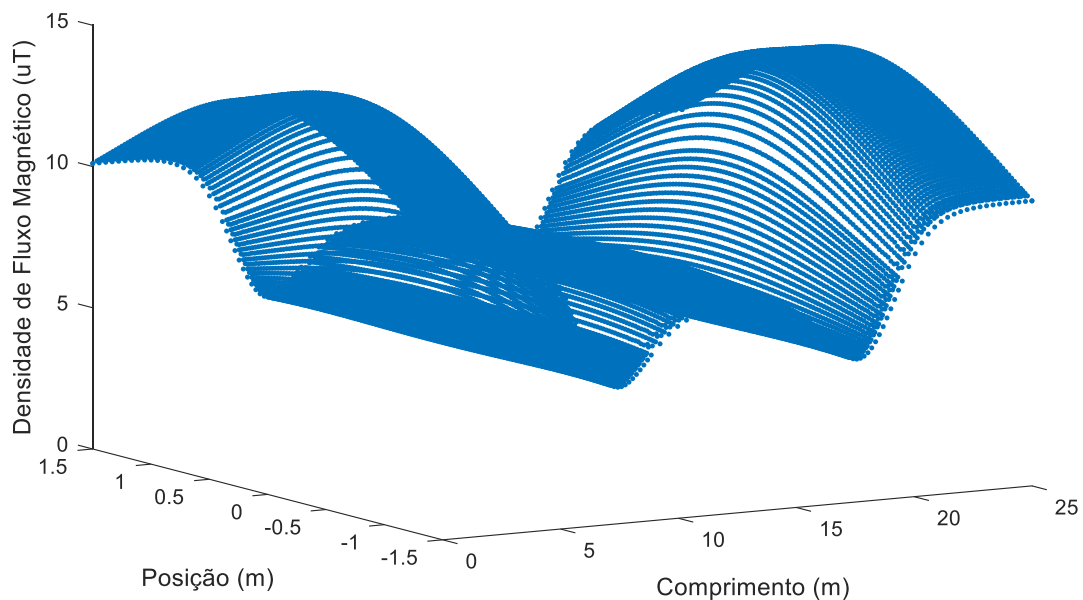


Figura 6.11 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo com a presença da chapa plana (vista frontal).

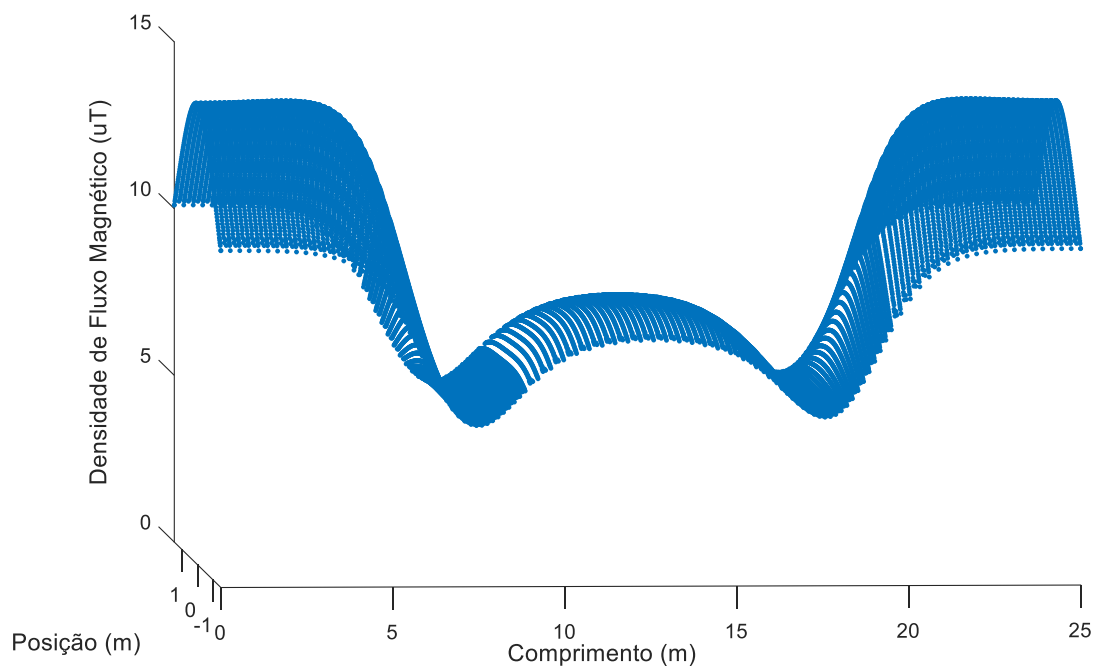


Figura 6.12 - Distribuição 3D da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo com a presença da chapa plana (vista lateral).

Observando os resultados apresentados nas Figuras 6.11 e 6.12, pode-se perceber que ocorre a atenuação do campo magnético na região da caixa de emendas, reduzindo o valor da densidade de fluxo magnético para valores inferiores ao limite de $15 \mu\text{T}$. Para a chapa plana projetada, o campo magnético calculado é inferior a $8 \mu\text{T}$ na região de interesse acima da caixa de emendas. Apesar da efetividade da atenuação do campo reduzir à medida que se aproxima das extremidades da chapa, o maior comprimento da chapa (14 metros) em comparação ao comprimento da caixa de emendas (8 metros) faz com que o a blindagem mitigue o campo magnético com eficácia satisfatória em toda a região de interesse.

Para facilitar a visualização do desempenho do sistema de blindagem, são apresentadas as distribuições da densidade de fluxo magnético na ausência e na presença da chapa plana nas Figuras 6.13 e 6.14, respectivamente. Nesses resultados os valores do campo foram apresentados a partir da vista superior de todo o trecho subterrâneo, sendo destacados os posicionamentos dos cabos de alta tensão e da chapa plana.

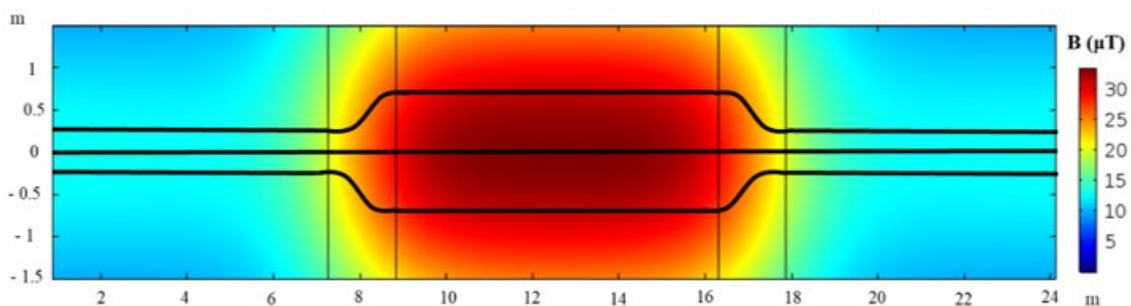


Figura 6.13 - Distribuição da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo sem a blindagem.

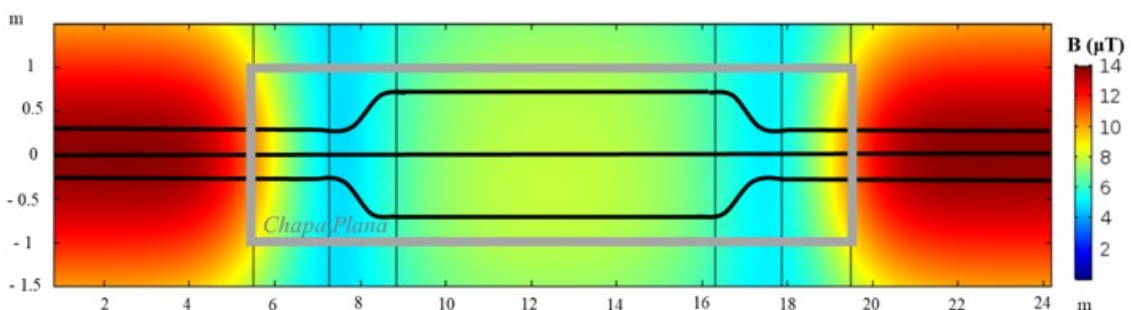


Figura 6.14 - Distribuição da densidade do fluxo magnético no entorno da caixa de emendas do sistema subterrâneo com a chapa plana.

A variação do desempenho da blindagem ao longo do comprimento da chapa ocorre devido à representação das extremidades da placa metálica. A modelagem das terminações, faz com que a distribuição da densidade de corrente seja distinta das chapas infinitas, como discutido anteriormente no Capítulo 5. A Figura 6.15 apresenta a distribuição da densidade de corrente na chapa plana utilizada para reduzir o campo na proximidade da caixa de emendas.

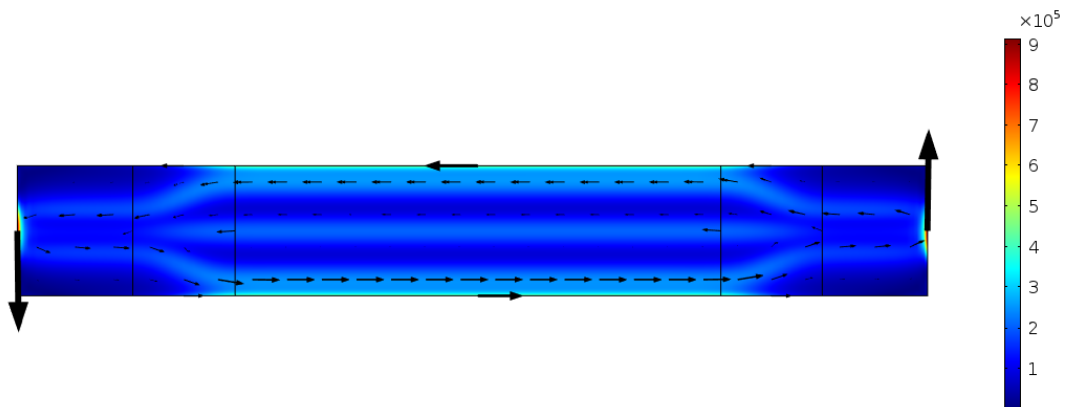


Figura 6.15 - Distribuição da densidade de corrente (A/m^2) na blindagem da chapa plana de 14 metros de comprimento utilizada no sistema subterrâneo com a caixa de emendas.

É interessante destacar que a distribuição da corrente na blindagem apresenta diferenças nas densidades em cada trecho do sistema subterrâneo (caixa de emendas e trecho convencional). Além disso, como abordado no capítulo anterior, as extremidades das blindagens apresentam as maiores densidades de corrente. Essa variação da corrente induzida na chapa faz com que a eficácia da blindagem varie ao longo do comprimento da placa plana.

Além da análise da distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento do trecho subterrâneo, foram comparados os resultados da simulação 3D com o perfil de campo obtido no problema 2D. Para isso, os perfis de campo obtidos na região central da caixa de emendas (posição de 12,5 metros da Figura 6.10) foram utilizados na comparação entre as curvas. A Figura 6.16 apresenta os perfis de campo calculados no problema 3D para o sistema subterrâneo na ausência e na presença da blindagem. A Figura 6.17 compara os perfis calculados nos problemas em duas e três dimensões para a blindagem com a chapa plana.

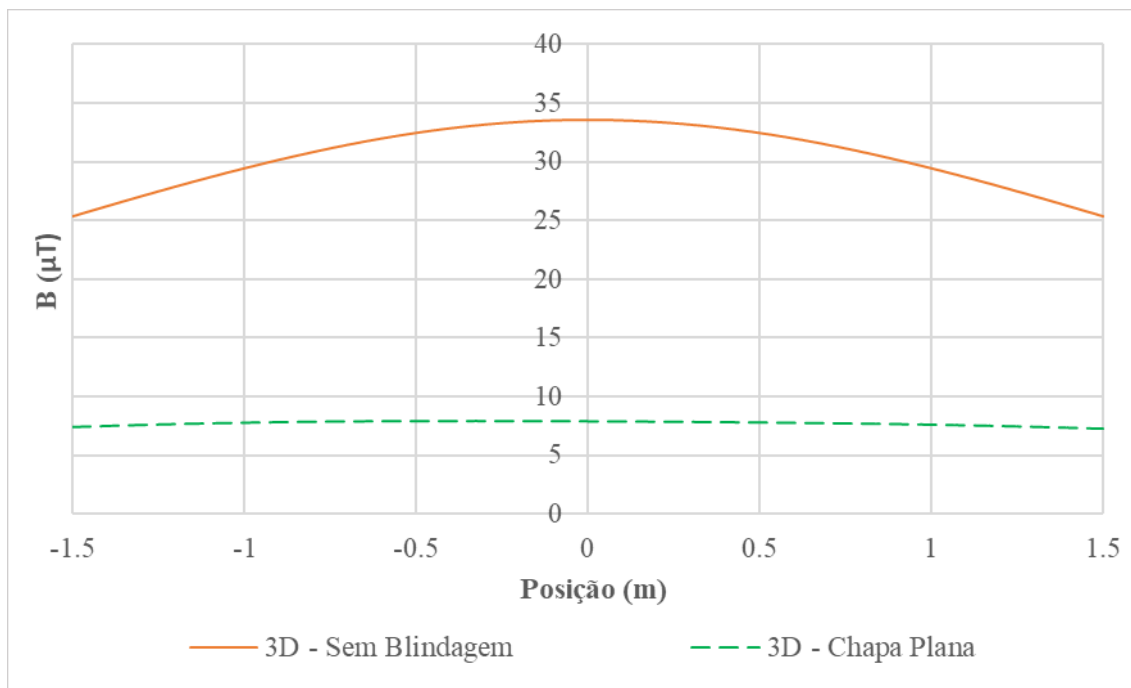


Figura 6.16 - Comparação dos perfis de campo calculados para o problema 3D da caixa de emendas sem a blindagem e com a chapa plana.

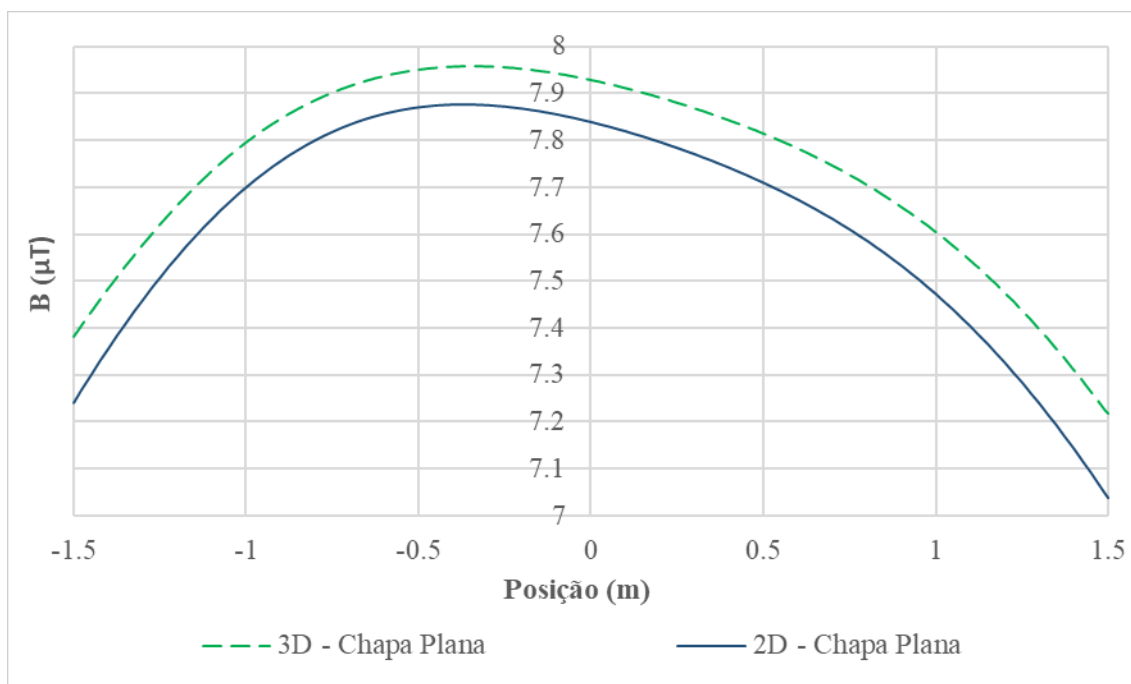


Figura 6.17 - Comparação dos perfis de campo calculados para os problemas 3D e 2D da caixa de emendas com a blindagem da chapa plana.

Observando os resultados apresentados na Figura 6.17, pode-se inferir que, para a fonte de campo analisada e para a faixa de interesse, o desempenho da blindagem calculado pela simulação 2D é similar ao obtido no modelo 3D. Todavia, se for

considerada que essa mesma eficácia na atenuação do campo será constante ao longo de todo o comprimento da chapa, como a modelagem 2D pode indicar, a avaliação do desempenho da blindagem será incorreta.

Como observado nas distribuições da densidade do fluxo magnético e da densidade de corrente apresentadas, a efetividade da blindagem varia ao longo do comprimento da mesma. A análise mais precisa do real desempenho só pode ser obtida a partir do modelo computacional em três dimensões e, por conseguinte, das representações das extremidades da chapa e das mudanças no espaçamento dos cabos subterrâneos.

Além da avaliação do desempenho da blindagem em toda a região de interesse, foi analisado o impacto térmico provocado pela presença da chapa plana no entorno da caixa de emendas dos cabos subterrâneos. A Figura 6.18 apresenta a distribuição da temperatura nos condutores ao longo de todo o comprimento do sistema subterrâneo na presença da chapa plana.

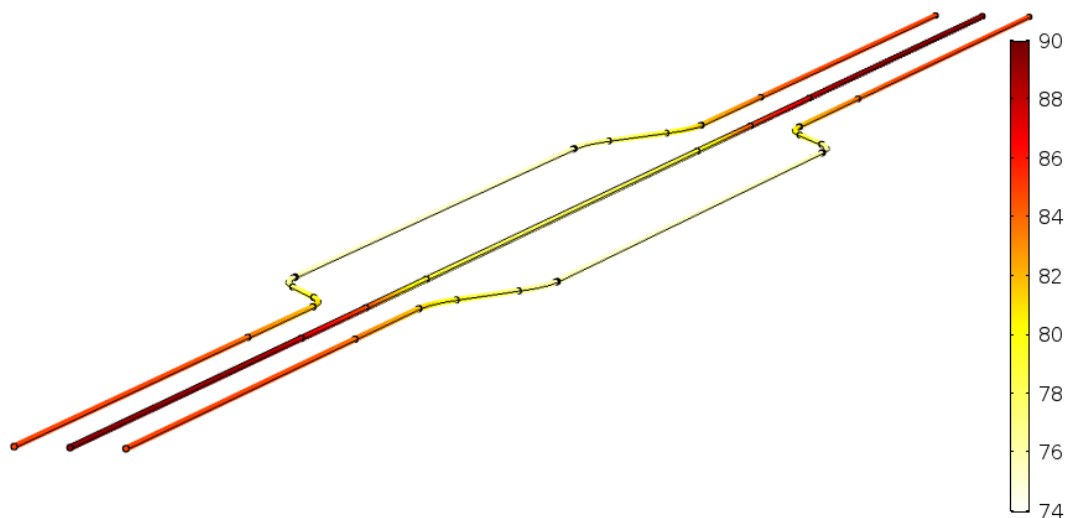


Figura 6.18 - Distribuição da temperatura (°C) dos condutores ao longo do comprimento do sistema subterrâneo com a caixa de emendas na presença da blindagem com a chapa plana.

Comparando os valores das temperaturas dos condutores na presença da chapa plana com os obtidos sem o uso da blindagem (Figura 6.7), observa-se um acréscimo de aproximadamente $0,3^{\circ}\text{C}$ na temperatura da fase central na região da caixa de emendas. Para o caso com a presença da blindagem, no trecho onde os condutores estão mais espaçados, a temperatura na fase central é superior a $78,0^{\circ}\text{C}$. No entanto, mesmo na

presença da blindagem, a região termicamente crítica do sistema subterrâneo modelado é a parte próxima às extremidades do domínio, uma vez que os cabos estão posicionados com menor espaçamento (30 centímetros).

Diante do exposto, apesar da blindagem projetada alterar a distribuição de calor no entorno do sistema subterrâneo, as elevações de temperatura não são suficientes para impactar na capacidade de transmissão de corrente da linha. Portanto, a chapa plana de alumínio, cujas dimensões foram detalhadas na Figura 6.8 e com extensão longitudinal de 14 metros, consegue atenuar o campo magnético até o limite desejado ($15 \mu\text{T}$), sem prejudicar a capacidade de transmissão do sistema subterrâneo.

6.4. Considerações Finais

Nesse capítulo, foi apresentado o estudo de caso referente ao projeto do sistema de blindagem para a mitigação do campo magnético nas proximidades da caixa de emendas do sistema de transmissão subterrâneo. O projeto foi realizado a partir das metodologias e das análises sobre as técnicas de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência apresentadas anteriormente nesse trabalho.

Antes de projetar o sistema de blindagem, foi modelado o trecho subterrâneo com a caixa de emendas. Nessa região, o campo magnético originado pelos cabos subterrâneos possui maior intensidade devido ao maior espaçamento entre as fases. O trecho da caixa de emendas foi representado com dimensões reais de comprimento e de espaçamento entre as fases. Dessa forma, o sistema subterrâneo com a caixa de emendas foi modelado em três dimensões e, a partir das simulações realizadas, foram calculadas as distribuições da densidade de fluxo magnético e da temperatura dos condutores ao longo de todo o comprimento do trecho.

Para realizar o projeto do sistema de blindagem, foi feita uma análise preliminar do problema 2D. Nessa simulação em duas dimensões, foi definida a técnica de mitigação da blindagem com placas metálicas. A chapa plana de alumínio foi escolhida em decorrência do nível requisitado de atenuação do campo. O estudo 2D permitiu avaliar algumas configurações da chapa e definir as dimensões: largura (2 metros) e distância (30 centímetros) da blindagem para o sistema subterrâneo. Vale ser destacado que essas dimensões poderiam ter sido alteradas no estudo 3D, pois apenas com a simulação em

três dimensões é possível avaliar o real desempenho do sistema de blindagem e, conseqüentemente, especificar qual a configuração da blindagem.

Dando continuidade ao projeto do sistema de mitigação, a blindagem com a chapa plana foi inserida no modelo 3D da caixa de emendas. Nesse modelo, pode-se representar tanto as terminações da chapa como as mudanças no espaçamento entre os cabos subterrâneos. Os efeitos dessas considerações não podem ser representados no projeto de blindagem em duas dimensões.

A partir da simulação do problema 3D, definiu-se o comprimento de 14 metros para a placa de alumínio. O resultado do estudo em três dimensões permite calcular os valores da distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do comprimento do trecho subterrâneo. Dessa maneira, pode-se avaliar o desempenho real da blindagem e verificar se o campo magnético foi reduzido para valores inferiores ao limite de 15 μT . No caso da blindagem com a chapa plana projetada, a densidade de fluxo magnético foi inferior a 8 μT para valores calculados a 1 metro do nível do solo nas proximidades da caixa de emenda.

Além da análise do problema magnético, a modelagem em três dimensões permite avaliar o impacto térmico da presença da blindagem, indicando pontos de aquecimento (“*hot spots*”) que podem reduzir a capacidade de transmissão de corrente da linha. Para o trecho da caixa de emendas, a chapa plana não proporciona uma elevação de temperatura suficiente para diminuir a ampacidade do cabo subterrâneo.

Diante disso, pode-se concluir que com os projetos de blindagem em duas e em três dimensões, foi possível determinar as configurações da chapa plana para atenuar o campo magnético até o limite na região da caixa de emendas.

O projeto de um sistema de blindagem a partir da modelagem 2D possibilita uma avaliação preliminar do nível de atenuação do campo e do impacto térmico provocado. Todavia, dependendo das características da fonte de campo e da blindagem, as simplificações realizadas no modelo 2D podem ocasionar erros no projeto. Dessa forma, apesar do maior esforço computacional, a modelagem 3D possibilita maior assertividade no projeto do sistema de blindagem. As representações de maneira mais fidedigna das características da fonte de campo e das terminações da blindagem possibilitam a avaliação do desempenho real do sistema de blindagem.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo computacional sobre técnicas de blindagem para campo magnético de baixa frequência. Para a realização do estudo, foi utilizado o software COMSOL *Multiphysics*[®] para a simulação de diferentes técnicas de mitigação, a saber: rearranjo dos condutores, *loops* de compensação e utilização de chapas metálicas. A ferramenta de cálculo possibilita as resoluções dos problemas magnético e térmico, permitindo, assim, a avaliação do desempenho das blindagens a partir do nível de atenuação do campo magnético e do impacto térmico provocado. Dessa forma, foram modeladas as fontes de campo magnético de baixa frequência (cabos subterrâneos) e, assim, analisadas as blindagens no estudo computacional.

A partir de modelos em duas e em três dimensões, foram obtidos os resultados computacionais discutidos na tese. Com relação a comparação das técnicas de mitigação, concluiu-se que as configurações metálicas fechadas (tubo e canaleta) e o arranjo de *loops* na configuração HMCPL apresentam os maiores fatores de redução. Essas blindagens atenuam o campo magnético em mais de 20 vezes, sendo recomendadas para situação na qual faz-se necessária a redução quase total do campo magnético. Dentre estas configurações de blindagem, o HMCPL apresenta menor impacto térmico no sistema subterrâneo, reduzindo em 5,6% a capacidade de transmissão de potência. As blindagens fechadas de aço reduzem em mais de 15% a ampacidade da linha, uma vez que ocorrem os sobreaquecimentos causados pela blindagem e pela aproximação dos condutores no arranjo triangular.

Com relação as blindagens metálicas abertas, foram avaliadas as chapas de alumínio e de cobre nos formatos: plana horizontal, em “U” invertido e em “H”. O tipo de configuração da chapa, além dos parâmetros construtivos (largura, espessura e distância para a fonte), permitem o projeto da blindagem com diferentes níveis de atenuação do campo. Para as configurações analisadas, as chapas de cobre apresentam melhor desempenho, isto é, maior fator de redução e menor perda na ampacidade da linha. Dentre os estudos de chapas metálicas, vale destacar que, além de reduzir o campo em aproximadamente 13 vezes, a chapa em “H” de cobre auxilia na dissipação de calor gerado pelo sistema subterrâneo, não comprometendo, assim, a capacidade de transmissão da linha.

Portanto, pode-se concluir que as chapas metálicas são boas alternativas para a blindagem do campo magnético de baixa frequência. As chapas podem ser projetadas para alcançar diversos níveis de desempenho, possibilitando a utilização em diferentes situações de redução do campo. Além disso, a maior praticidade de instalação, na comparação com as blindagens fechadas, favorece a utilização das chapas.

Além de analisar o desempenho das técnicas de mitigação, uma das principais contribuições do presente trabalho foi a avaliação dos benefícios do aperfeiçoamento do modelo computacional para três dimensões. Na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, o projeto da blindagem para campos magnéticos originados por cabos subterrâneos é feito por meio de simulações e análises em duas dimensões. Contudo, devido às simplificações do modelo, os resultados devem ser considerados como estimativas da eficácia na atenuação do campo. Logo, o estudo computacional em três dimensões pode utilizar os resultados obtidos no modelo simplificado 2D para definir alguns parâmetros da blindagem. No entanto, é importante destacar que a análise completa do desempenho da blindagem, assemelhando-se à realidade, é alcançada apenas por meio da modelagem do problema em três dimensões.

A modelagem 3D permite a representação das terminações das blindagens e, por consequência, do efeito das extremidades na eficácia da atenuação do campo magnético. Além disso, a análise em 3D possibilita, por exemplo, as representações de alterações no espaçamento entre as fases ou da presença de condutores se cruzando, permitindo, assim, a modelagem mais fidedigna tanto da blindagem quanto da fonte de campo. Essas representações não podem ser contempladas nas análises em 2D, pois os cabos subterrâneos e o sistema de blindagem são considerados sendo infinitamente longos na direção longitudinal.

Para o estudo em três dimensões, foram simuladas as blindagens com chapas metálicas dos tipos plana horizontal e em “H”. A partir da modelagem 3D, foram analisados diferentes comprimentos das chapas e a variação da eficácia ao longo da extensão da blindagem. Ao modelar as extremidades das chapas, observa-se a variação do desempenho ao longo do comprimento da mesma. O desempenho da blindagem reduz conforme se aproxima das terminações das placas, necessitando da utilização de um sistema de blindagem mais extenso que o trecho de interesse para obter uma atenuação satisfatória.

A variação no desempenho da blindagem é creditada ao posicionamento da placa sobre uma parte da fonte do campo e à distribuição da corrente induzida na chapa. Na modelagem das chapas com comprimento finito, as correntes induzidas formam um laço fechado, se diferenciando da distribuição de corrente observada nas chapas de comprimento infinito. As parcelas das correntes induzidas nas extremidades da blindagem resultam na variação da atenuação do campo, sendo observada a maior mitigação na região central da placa.

Como descrito anteriormente, os resultados obtidos com a simulação 2D podem ser utilizados para estimar algumas características construtivas das chapas e o nível de atenuação que pode ser alcançado na região central da blindagem. Esses resultados preliminares são importantes, pois o custo computacional e o tempo de simulação dos problemas 3D acabam limitando a realização de análises paramétricas e simulação de diferentes configurações. No entanto, para a definição de todos os parâmetros construtivos, principalmente do comprimento da chapa, e para o cálculo do campo magnético resultante em toda região de interesse, necessita-se da modelagem 3D do problema. A determinação dos valores da densidade de fluxo magnético em toda a região de interesse é fundamental para verificar se a blindagem projetada é capaz de atenuar o campo até o limite requisitado.

Com relação ao estudo do impacto térmico provocado pela presença da chapa, a modelagem 3D apresenta resultados similares aos modelos simplificados em 2D. Logo, para as características do problema analisado de blindagem do campo originado por cabos subterrâneos, a modelagem 3D não fez-se mandatória. Contudo, é importante destacar que a modelagem possibilita a identificação de pontos de maior aquecimento (“*hot spots*”), que podem indicar comprometimento do tempo de vida útil de um determinado equipamento.

Para evidenciar as melhorias proporcionadas pela modelagem 3D, foi apresentado um estudo de caso para o projeto do sistema de blindagem para a mitigação do campo magnético nas proximidades da caixa de emendas de um arranjo típico de linha de 138 kV. A variação do espaçamento existente entre os condutores ao longo desse trecho não pode ser representada na modelagem 2D, justificando, assim, o projeto da blindagem a partir da simulação em três dimensões. Para o estudo de caso, é proposto o uso de uma chapa plana de alumínio para atenuar o campo magnético em aproximadamente três vezes

ao longo de todo comprimento da caixa de emendas, reduzindo o valor de densidade de fluxo magnético até limite pré-estabelecido.

Em síntese, a modelagem 3D do problema de blindagem possibilita o projeto mais assertivo de chapas metálicas, uma vez que permite as representações das terminações das placas, de variações no posicionamento ao longo da extensão longitudinal e de outras assimetrias que não podem ser modeladas em 2D. Dessa forma, apesar do maior esforço computacional, a análise em três dimensões fornece informações importantes no projeto de chapas metálicas, definindo todas as dimensões construtivas da blindagem e os valores da densidade de fluxo magnético ao longo de toda a região de interesse.

Vale ser ressaltado que os problemas analisados no presente trabalho não apresentam intensidades de campo superiores aos limites estabelecidos pelo ICINIRP (Tabela 1.1), não sendo consideradas situações de redução do campo para adequação das normas vigentes no Brasil. Todavia, além da possibilidade futura da alteração desses limites de densidade de fluxo magnético, podem existir situações práticas que demandem a utilização de técnicas de mitigação. Portanto, os estudos realizados neste trabalho servem para orientar e auxiliar em projetos de blindagem de campos magnéticos de baixa frequência.

7.1. Propostas de Continuidade

No que tange as propostas de continuidade, a metodologia de projeto e a ferramenta computacional podem ser empregadas em outras situações nas quais se fizer necessária a mitigação do campo magnético de baixa frequência. Dessa forma, podem ser projetadas blindagens para campos magnéticos originados por diferentes fontes de campo que não foram modeladas no presente trabalho, como: linhas aéreas, subestações, redes elétricas de edificações, dentre outras instalações do sistema elétrico de potência. A modelagem em três dimensões dessas fontes possibilitará a avaliação mais assertiva do desempenho das blindagens analisadas. Dessa forma, a partir da modelagem 3D é possível identificar as melhores alternativas de blindagem para cada situação específica, uma vez que as características da fonte de campo podem ser representadas na análise em três dimensões do problema.

Além disso, do mesmo modo que foi analisada a blindagem com chapas metálicas em três dimensões, é necessário o estudo das configurações fechadas (tubo e canaleta). Como descrito anteriormente, essas configurações apresentaram os maiores fatores de redução na análise em 2D. No entanto, assim como no caso de chapas, as terminações das configurações fechadas afetam na distribuição das correntes induzidas e, conseqüentemente, desempenho da blindagem. Logo, necessita-se da análise do efeito das extremidades e do comprimento do tubo ou da canaleta para a determinação do desempenho da blindagem na região de interesse.

Vale ser destacado que no desenvolvimento do presente trabalho foram simuladas configurações metálicas fechadas. Todavia, o esforço computacional requisitado foi superior à capacidade do servidor utilizado nas simulações. Um dos motivos para o acréscimo no tempo de simulação é o comportamento não linear da curva de magnetização do aço. Dessa forma, para a análise das configurações fechadas, necessita-se de melhorias na metodologia de cálculo, principalmente no que se refere ao número de elementos existentes no domínio 3D.

Outro estudo importante é referente a modelagem 3D de *loops* de compensação. A análise do efeito das terminações dos *loops* é fundamental para o projeto mais assertivo dessa técnica de mitigação. Além disso, no caso dos arranjos com alto acoplamento, podem ser modelados os transformadores de corrente e os *loops*, possibilitando a análise térmica do aquecimento provocado pelos núcleos magnéticos nos condutores da fonte de campo. Geralmente, nas análises em 2D, as configurações de *loops* com alto acoplamento são modeladas apenas pela presença dos *loops*, sem a representação do transformador. Sendo assim, a modelagem 3D permite a representação de todo o sistema de blindagem e, por consequência, o seu efeito na redução do campo e no impacto térmico provocado.

Com relação aos estudos experimentais, pode ser utilizada a metodologia de projeto de sistemas de blindagem para casos reais, principalmente em situações nas quais a modelagem em três dimensões é requisitada para a representação das características da fonte de campo. Por exemplo, no caso do projeto de blindagem de uma subestação de energia, devido à presença de diversas fontes de campo magnético, faz-se necessária a modelagem 3D do problema. Logo, a técnica de mitigação ou a combinação de blindagens projetada pode ser aplicada em um estudo prático para comparação dos desempenhos simulado e medido da blindagem ou da combinação das técnicas de mitigação.

Outro estudo de caso que pode ser realizado é para a análise de alternativas de blindagem para serem utilizadas em redes de distribuição internas de edifícios. As assimetrias existentes nos posicionamentos dos condutores (múltiplos circuitos e cabos se cruzando), tornam necessária a modelagem 3D para a representação fidedigna do problema. Dessa forma, a partir do estudo computacional podem ser avaliadas as melhores alternativas para os projetos de uma sala blindada ou de um sistema de blindagem de um equipamento específico.

Além da continuidade de estudos de caso e de projetos de blindagem, uma tarefa importante na continuidade dos estudos é a investigação da assimetria existente no campo magnético. Conforme discutido no Capítulo 4, a presença de sistemas de blindagem com correntes induzidas resulta na assimetria do campo, mesmo simulando blindagens com configurações geometricamente simétricas. Logo, justifica-se o estudo do método de cálculo para investigar o motivo dessa assimetria não esperada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz),” 2010. [Online]. Available: <http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf>.
- [2] C. M. Long e P. A. Valderberg, “Low-Frequency Magnetic Fields: Potential Environmental Health Impacts,” *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*, pp. 139 - 149, 2019.
- [3] A. Canova, F. Freschi e M. Repetto, “Evaluation of workers exposure to magnetic fields,” *European Physical Journal: Applied Physics*, 2010.
- [4] P. Munhoz-Rojas, C. S. Salas e A. A. Costa, “Recomendações para a verificação do atendimento à regulamentação nacional referente à exposição humana aos campos eletromagnéticos de baixa frequência,” *XXIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Outubro 2017.
- [5] D. S. C. Souza, “Projeto otimizado de loops para a mitigação do campo magnético gerado por linhas e redes subterrâneas,” Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- [6] National Institute for Public Health and the Environment, “Comparison of international policies on electromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields),” [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/sites/default/files/2018-11/Comparison%20of%20international%20policies%20on%20electromagnetic%20fields%202018.pdf>. [Acesso em 09 10 2020].
- [7] CIGRÉ Working Group C4.204, “Guidelines for mitigation techniques of power frequency magnetic fields originated from electric power systems, TB 373,” 2009.
- [8] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons, 2009.
- [9] S. A. Schekunoff, *Electromagnetic Waves*, D. Van Nostrand Company, 1943.
- [10] C. R. Paul, *Introduction to Eleromagnetic Compatibility*, A Wiley - Interscience Publication, 1992.
- [11] M. d. Souza Jr., “Estudos de materiais e técnicas para blindagem de campos magnéticos de frequências industriais,” Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- [12] M. L. Murta, “Blindagem ativa para campos magnéticos em baixa frequência,” Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

- [13] J. C. del Pino, L. Giaccone, A. Canova e P. Cruz, “Ga-based Active Loop Optimization for Magnetic Field Mitigation of MV/LV Substations,” *IEEE Latin America Transactions*, pp. 1055-1061, Setembro 2014.
- [14] A. Canova, J. C. del Pino e L. Giaccone, “Active Shielding System for ELF Magnetic Fields,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, nº 3, Março 2015.
- [15] J. C. del Pino e P. C. Romero, “The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, nº 2, pp. 674-683, Abril 2011.
- [16] P. Cruz, J. M. Riquelme, A. de la Villa e J. L. Martínez, “Ga-based passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines,” *Neurocomput*, nº 70, pp. 2679-2686, 2007.
- [17] M. L. Murta, “Estudo de Técnicas de Blindagem de Campos Magnéticos de Baixa Frequência,” Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 1998.
- [18] A. Canova e L. Giaccone, “A novel technology for magnetic-field mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, nº 3, pp. 1625-1633, Julho 2011.
- [19] A. Canova, D. Bavastro, F. Freschi, L. Giaccone e M. Repetto, “Magnetic shielding solutions for the junction zone of high voltage underground power lines,” *Electrical Power System Research*, pp. 109-115, 2012.
- [20] J. C. del Pino e P. C. Romero, “Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, nº 4, pp. 2659-2667, Outubro 2011.
- [21] D. Bavastro, A. Canova, F. Freschi e L. Giaccone, “Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies,” *IEEE Transactions on Ins*, Junho 2015.
- [22] M. Grbic, A. Canova e L. Giaccone, “Levels of magnetic field in an apartment near 110/35 Kv substation and proposal of mitigation techniques,” *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion*, 2016.
- [23] E. Salinas, A. Bondenson, J. Daalder e Y. Hamnerius, “Towards A Global Strategy To Mitigate Power-Frequency Magnetic Fields From Secondary Substations,” *16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)*, Junho 2001.
- [24] Y. Du e M. Chen, “Low-frequency magnetic shielding against unbalanced currents,” *7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)*, 2015.

- [25] X. B. Xu e G. Liu, "Investigation of the magnetic field produced by unbalanced phase current in an underground three-phase pipe-type cable," *Electric Power Systems Research*, vol. 62, pp. 153-160, 2002.
- [26] J. C. del Pino e P. C. Romero, "Thermal effects on the design of passive loops to mitigate the magnetic field generated by underground power cables," *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 26, n° 3, pp. 1718 - 1726, Julho 2011.
- [27] F. G. Oliveira, "Estudo de instalações de linhas subterrâneas de alta tensão com relação a campos magnéticos," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [28] M. Forteleoni, G. Gemelli, F. Palone, L. Buono e M. Rebolini, "Passive loops: effects on distance protections and lightning performances of EHV overhead lines," *CIGRE Biennial Session 47 - Paris*, 2018.
- [29] A. Eletropaulo, "Projeto de P&D: alternativas para viabilização da implementação de redes subterrâneas no Brasil," Evento ANEEL - Sistemas Subterrâneos de Distribuição: Aspectos Regulatórios, 2013.
- [30] M. T. A. Êvo, "Estudo de alternativas para a redução do campo magnético de linhas subterrâneas com o menor comprometimento de sua capacidade de transmissão," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- [31] G. Rosu, F. Enache, O. Baltag e M. Morega, "Environmental magnetic field assessment: a case study," *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Outubro 2106.
- [32] A. S. Safigianni e C. G. Tsompanidou, "Electric and magnetic field measurements in an outdoor electric power substation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 38-42, Janeiro 2009.
- [33] W. Joseph, L. Verloock e L. Martens, "General public exposure by ELF fields of 150-36/11 kV substations in urban environment," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, pp. 642-649, Abril 2009.
- [34] S. C. Assis, R. M. Coutinho, E. E. Ribeiro e L. M. Souza, "Cálculo e medição de campos elétricos e magnéticos em SEs e LTs," *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE)*, Outubro 2011.
- [35] L. Hiles, G. Olsen, C. Holte, R. Jensen e L. Griffing, "Power frequency magnetic field management using a combination of active and passive shielding technology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, n° 1, 1998.
- [36] D. S. C. Souza, M. T. A. Êvo, G. E. Vieira, C. E. F. Caetano, A. S. Miranda, J. O. S. Paulino, H. de Paula e I. J. S. Lopes, "Estudo experimental de técnicas de blindagem de campo magnético produzidos por linhas de distribuição subterrâneas de 138 kV," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2014.

- [37] D. Souza, S. C., M. T. A. Êvo, C. E. F. Caetano, H. de Paula e I. J. S. M. R. O. C. Lopes, “Avaliação teórico experimental de sistemas de blindagem de campo magnético gerado linhas de transmissão subterrâneas,” *XVI ERIAC - Econtro Regional Ibero-Americano do Cigrè*, Maio 2015.
- [38] R. O. C. Moreira, M. T. A. Êvo, D. S. C. Souza, C. E. F. Caetano, H. de Paula, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura e J. O. S. Paulino, “Comparative study between underground lines magnetic field shielding techniques on the field reduction factor, line ampacity and implementation costs,” *CIGRE Biennial Session 47 - Paris*, 2018.
- [39] D. S. C. Souza, C. F. E. Caetano, H. de Paula, I. J. S. Lopes, W. C. Boaventura, J. O. S. Paulino e M. T. A. Êvo, “Experimental Investigation of Magnetic Field Shielding Techniques and Resulting Current Derating of Underground Power Cables,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, n° 2, pp. 1146-1154, Março/Abril 2018.
- [40] R. O. C. Moreira, “Avaliação teórico experimental de campos magnéticos nas proximidades das linhas de transmissão subterrâneas,” Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [41] A. Canova, F. Freschi, M. Repetto e M. Tartaglia, “Description of power lines by equivalent source system,” *COMPEL*, vol. 24, pp. 893-905, 2005.
- [42] Y. Du, T. Cheng e A. Farag, “Principles of power-frequency magnetic field shielding with flat sheets in a source of long conductors,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 38, n° 3, pp. 450-459, 1996.
- [43] P. Moreno e R. Olsen, “A simple theory for optimizing finite width ELF magnetic field shields for minimum dependence on source orientation,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 39, n° 4, pp. 340-348, 1997.
- [44] M. T. A. Êvo, H. de Paula, I. J. S. Lopes, R. C. Mesquita e D. S. C. Souza, “Study of the influence of underground power line shielding techniques on its power capability,” *Journal of Control, Automation and Electrical System*, pp. 541-551, 2017.
- [45] V. M. Machado, “Magnetic field mitigation shielding of underground power cables,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, n° 2, pp. 707-710, 2012.
- [46] COMSOL, “Introduction To COMSOL Multiphysics,” 2019. [Online]. Available: <https://cdn.comsol.com/doc/5.5/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.pdf>. [Acesso em 09 10 2020].
- [47] Q. Chen e A. Konrad, “A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, n° 1, pp. 663-676, 1997.

- [48] “Electric cables-calculation of current ratings-part 1:current rating equations (100% load factor) and calculation of losses-section-general,” IEC 60287-1-1, 2006.
- [49] “Electric cables-calculation of current ratings-part 2: thermal resistance - calculation of thermal resistance,” IEC 60287-2-1, 2006.
- [50] M. A. Kellow, “A numerical procedure for the calculation of the temperature rise and ampacity of underground cables,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS100, n° 7, pp. 3322-3330, Julho 1981.
- [51] F. de Léon e G. J. Anders, “Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, n° 2, pp. 537-543, 2008.
- [52] R. C. Mesquita, “Cálculo de Campos Eletromagnéticos tridimensionais utilizando elementos finitos: magnetostática, quase estática e aquecimento indutivo,” Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.
- [53] W. Frei, “COMSOL Blog: Modeling Coils in the AC/DC Module,” COMSOL, 3 Março 2016. [Online]. Available: <https://br.comsol.com/blogs/modeling-coils-in-the-acdc-module/>. [Acesso em 27 Abril 2020].