FÁBIO GABRIEL DE OLIVEIRA

ESTUDO DE INSTALAÇÕES DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO COM RELAÇÃO A CAMPOS MAGNÉTICOS

São Paulo
2010

FÁBIO GABRIEL DE OLIVEIRA

ESTUDO DE INSTALAÇÕES DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO COM RELAÇÃO A CAMPOS MAGNÉTICOS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

São Paulo
2010

FÁBIO GABRIEL DE OLIVEIRA

ESTUDO DE INSTALAÇÕES DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO COM RELAÇÃO A CAMPOS MAGNÉTICOS

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. José Roberto Cardoso

São Paulo
2010

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de agosto de 2010.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Oliveira, Fábio Gabriel de
Estudo de instalações de linhas subterrâneas de alta tensão com relação a campos magnéticos / F.G. de Oliveira. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010.
p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Linhas subterrâneas de transmissão de energia elétrica 2. Cabos elétricos 3. Campo magnético I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Roberto Cardoso, pela orientação e sugestões na condução desta pesquisa. Agradeço-lhe pela confiança e pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Dr. Mario Leite Pereira Filho, pelo interesse, pelas sugestões e pelo auxílio na realização da parte prática deste trabalho. Agradeço-lhe pelas orientações e recursos disponibilizados para a medição de campo magnético das linhas subterrâneas.

Ao Eng. Aloísio José de Oliveira Lima, por compartilhar seus amplos conhecimentos sobre sistemas subterrâneos, os quais foram imprescindíveis para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço-lhe também pela paciência, pelo desprendimento ao compartilhar sua experiência, pelos incentivos e, sobretudo, por sua amizade.

À Eng. Simone Moreira Dias, pela sua valiosa ajuda durante a campanha de medição de campo magnético das linhas subterrâneas. Agradeço-lhe também pela sua dedicação, paciência, carinho e companheirismo durante todas as etapas de desenvolvimento deste trabalho.

À Prysmian Energia Cabos e Sistemas do Brasil SA, por disponibilizar todos os recursos necessários para a realização deste trabalho. Agradeço especialmente ao Eng. Carlos Alberto Ferreira Godinho e ao Eng. Woong Jin Lee, não só pelo incentivo, mas também, pela compreensão e tolerância em nossas atividades conjuntas no setor de Engenharia de Projetos da Prysmian.

À AES Eletropaulo, por contribuir para a parte experimental deste trabalho. Agradeço especialmente aos funcionários José de Melo Camargo e Gilmar Cesar Domingues Filho, não só pela atenção prestada ao disponibilizar os valores das correntes das linhas subterrâneas de concessão da AES Eletropaulo, como também, pelo auxílio nas medições.

À ISA CTEEP, por disponibilizar os valores das correntes da linha subterrânea de sua concessão. Agradeço especialmente aos funcionários Carlos Augusto Pascon, Samuel Elias de Souza e Luiz Adriano dos Santos Filho, pela atenção e pelo auxílio durante a campanha de medição de campo magnético.

À Eng. Carla Damasceno Peixoto, pela atenção e contribuição à parte experimental deste trabalho, ao disponibilizar os valores das correntes e da medição do campo magnético realizada na linha subterrânea de concessão da LIGHT.

Ao grupo de trabalho B1 do Cigré Brasil, especialmente ao Eng. Júlio César Ramos Lopes e ao Eng. Eduardo Karabolad Filho, pela troca de informações valiosas para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Giuseppe Marco Di Marzo, Ricardo Bechara e Katheryne Nuñez pelo convívio sempre amigável e pela troca de experiências durante o programa de mestrado.

Finalmente, agradeço a meus familiares, por haverem me proporcionado todos os meios necessários para que este trabalho pudesse ser desenvolvido.

Não estamos na obra do mundo para aniquilar o que é imperfeito, mas para completar o que se encontra inacabado.

(Emmanuel)

RESUMO

Atualmente, a intensidade de campo elétrico, campo magnético e campo eletromagnético é um fator determinante não só para a implantação de novas instalações, mas também, para as instalações existentes no sistema elétrico. Apesar de não existir nenhum estudo conclusivo que comprove a evidência direta entre a exposição a estes campos e os efeitos nocivos na saúde das pessoas, muitos países, inclusive o Brasil, definiram em suas legislações limites básicos à exposição de campos elétrico e magnético provenientes dos sistemas elétricos.

Este trabalho tem como objetivo contribuir para análise de campo magnético de linhas subterrâneas de alta tensão existentes ou linhas em fase inicial de projeto, visando atender os limites de exposição vigentes na legislação local.

Nele é apresentada a metodologia de cálculo de campo magnético baseada na Lei de Biot-Savart e no princípio da superposição. Estudos analíticos para verificação da influência dos parâmetros de instalação e elétricos de linhas sobre o campo magnético são apresentados para linhas subterrâneas de alta tensão compostas por um e dois circuitos com diferentes tipos de instalação e aterramentos.

Comparações entre valores analíticos e valores de medições de campo magnético de linhas subterrâneas de alta tensão existentes em operação também são abordadas neste trabalho.

As principais técnicas de mitigação de campo magnético utilizadas em linhas subterrâneas de alta tensão, tais como técnicas de compensação envolvendo laços de cabos e técnicas de blindagens com materiais metálicos externos aos cabos, também são apresentadas.

Devido ao campo elétrico externo ao cabo isolado ser praticamente zero, assuntos referentes a este campo não são abordados neste trabalho. Por simplicidade, campo magnético refere-se à densidade de fluxo magnético neste documento.

Palavras-chave: Linhas subterrâneas de transmissão de energia elétrica. Cabos elétricos. Campo magnético.

ABSTRACT

Nowadays, the intensity of electric field, magnetic field and electromagnetic field is a determining factor, not only for implantation of new installations, but also for existing installations in the power system. Although no exist conclusive study that proves the direct evidence between exposure to these fields and adverse effects on human health, many countries, including Brazil, have defined in their laws basic limits for exposure to electric and magnetic fields produced by the electric system.

This work aims to contribute to analysis of magnetic field for both existing high voltage underground lines and lines in initial stage of project, aiming the actual exposure limits of the local legislation.

In it, is shown the magnetic field calculation methodology based on the Biot-Savart´s law and the superposition principle. Analytical studies to verify the influence of installation and electrical parameters of lines on the magnetic field are presented for high voltage underground lines consist of one and two circuits with different types of installation and earthing.

Comparisons between analytical and measurement values of magnetic field of existing high voltage underground lines in operation are also addressed in this work.

The main mitigation techniques of magnetic field used in high voltage underground lines, such as compensation techniques by loop of cables and shielding by metallic materials, are also presented.

Due the electric field outside the insulated cable be practically zero, issues related to the electric field are not addressed in this work. For simplicity, the magnetic field refers to the magnetic flux density in this document.

Keywords: Underground electrical power transmission lines. Electric cables. Magnetic field.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos construtivos de um cabo extrudado para tensões superiores a 35 kV 6
Figura 2 – Esquema de aterramento pelo método “both ends bonding” 10
Figura 3 – Esquema de aterramento pelo método “cross-bonding” 11
Figura 4 – Esquema de aterramento pelo método “single-point bonding” 12
Figura 5 – Disposição plana horizontal para um circuito e para dois circuitos 14
Figura 6 – Disposição plana vertical para um circuito e para dois circuitos 15
Figura 7 – Disposição triangular para um circuito e para dois circuitos 16
Figura 8 – Fluxograma de cálculo do campo magnético em função do tipo de aterramento da linha 31
Figura 9 – Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana horizontal 34
Figura 10 – Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana vertical 35
Figura 11 – Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição triangular 36
Figura 12 – Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana horizontal 37
Figura 13 – Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana vertical 38
Figura 14 – Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição triangular 39
Figura 15 – Medição de campo magnético na superfície 41
Figura 16 – Equipamento de medição de campo magnético 42
Figura 17 – Caso real 1 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição 43
Figura 18 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 1 44

Figura 19 – Caso real 2 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição 45
Figura 20 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 2 46
Figura 21 – Caso real 3 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição 47
Figura 22 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 3 48
Figura 23 – Caso real 4 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição 49
Figura 24 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 4 50
Figura 25 – Compensação passiva de campo magnético.....52
Figura 26 – Exemplos de posicionamento de laços para linhas compostas por circuito com disposição triangular e disposição plana horizontal. 53
Figura 27 – Compensação ativa de campo magnético. 54
Figura 28 – Caixa de emendas com a posição dos laços de compensação. 56
Figura 29 – Perfil do campo magnético eficaz ao longo do eixo transversal dos cabos, incluindo a caixa de emendas com os laços passivos.....57
Figura 30 – Linhas de campo numa placa de material magnético sobre influência de uma fonte de campo magnético (bobina) 58
Figura 31 – Distribuição de linhas de campo magnético na presença de blindagens ferromagnéticas. (a) blindagem com geometria fechada e fonte externa. .....
(b) blindagem com geometria aberta.....59
Figura 32 – Detalhes de blindagem ferromagnética constituída por tubos. (a) Secção transversal do tubo. (b) Perfil longitudinal com detalhe do contato entre tubos. 60
Figura 33 – Detalhes de blindagem ferromagnética constituída por “raceway”.
(a) Secção transversal do “raceway”. (b) Perfil longitudinal com detalhe do contato entre “raceways” e tampa.....62
Figura 34 – Arranjo composto por circuito instalado em plano vertical blindado com placas planas ferromagnéticas. (a) Secção transversal. (b) Perfil longitudinal. 64
Figura 35 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de “U invertido”.(a) Secção transversal.(b) Perfil longitudinal 65

Figura 36 – Técnica de blindagem ferromagnética constituída por “raceway”. (a) Secção transversal do “raceway”. (b) Instalação do raceway. 68
Figura 37 – Perfil do campo magnético eficaz ao longo do eixo transversal da linha, considerando-se a ausência e a presença da blindagem ferromagnética constituída por “raceway”. 69
Figura 38 – Distribuição de linhas de campo magnético na presença de blindagens condutivas. 70
Figura 39 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal e blindado com placas planas condutivas. (a) Seção transversal. (b) Perfil longitudinal. 72
Figura 40 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal blindado com placas condutivas na forma de “U invertido”. (a) Secção transversal. (b) Perfil longitudinal. 74
Figura 41 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de “H”. (a) Secção transversal. (b) Representação em planta.76
Figura 42 – Técnica de blindagem condutiva com geometria “H”. (a) Secção transversal da instalação. (b) Instalação das placas de alumínio.....78
Figura 43 – Resultados de medições de campo magnético na superfície e a 1 m acima, com e sem presença da blindagem condutiva de geometria “H”. 79
Figura 44 – Sistema de transmissão aterrado em ambas extremidades.....87
Figura 45 – Campo magnético gerado por um filamento condutor infinitamente longo 91
Figura 46 – Esquema de sistema subterrâneo para cálculo do campo magnético ...91
Figura 47 – Diagrama vetorial para o cálculo do campo magnético máximo 93
Figura 48 – Exemplo de cálculo 1 – Um circuito com disposição triangular e aterramento “both ends bonding” 98
Figura 49 – Exemplo de cálculo 2 – Dois circuitos com disposição plana vertical e aterramento “cross-bonding” 103
Figura 50 – Curva campo magnético versus resistividade elétrica do solo 106
Figura 51 – Curva campo magnético versus resistência elétrica CA da blindagem metálica do cabo 107
Figura 52 – Curva de magnetização de materiais ferromagnéticos normalmente empregados em blindagens para mitigação do campo magnético.....108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de exposição aos campos elétrico e magnético para linhas de transmissão definidos pela ICNIRP 3
Tabela 2 – Limites de exposição aos campos elétrico e magnético para linhas de transmissão definidos pela Portaria Nº 80 da SVMA - SP 4
Tabela 3 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 1 43
Tabela 4 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 2 45
Tabela 5 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 3 47
Tabela 6 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 4 49
Tabela 7 – Propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos utilizados como blindagens 109
Tabela 8 – Condutividade elétrica de alguns materiais ferromagnéticos 109
Tabela 9 – Condutividade elétrica dos principais materiais condutivos 111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPR	Borracha etilenopropileno
FEM	Força eletromotriz
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
LTA	Linhas de Transmissão Aéreas
LSAT	Linhas Subterrâneas de Alta Tensão
OMS	Organização Mundial da Saúde
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEMD	Polietileno de média densidade
PVC	Cloreto de polivinila
SVMA	Secretaria do Verde e do Meio Ambiente
XLPE	Polietileno reticulado

LISTA DE SÍMBOLOS

B	densidade de fluxo magnético, em [μT]
B	vetor complexo associado ao campo magnético, em [μT]
B	módulo do vetor **B** , em [μT]
B_{ef}	valor do campo magnético eficaz, em [μT]
$B_{\max}$	valor máximo do campo magnético, em [μT]
$B_{\min}$	valor mínimo do campo magnético, em [μT]
$\mathbf{B_n}$	vetor complexo associado ao campo magnético gerado pelo cabo “n”, em [μT]
$\mathbf{B_{nx}}$,$\mathbf{B_{ny}}$	vetores complexos associados às componentes de $\mathbf{B_n}$ nas direções x e y respectivamente, em [μT]
$\mathbf{B_x}$,$\mathbf{B_y}$	vetores complexos associados à resultante do campo magnético nas direções x e y respectivamente, em [μT]
$\mathbf{B_{xi}}$,$\mathbf{B_{yi}}$	vetores complexos associados às projeções de $\mathbf{B_x}$ e $\mathbf{B_y}$ no eixo imaginário j, em [μT]
B_{xi},B_{yi}	valores das componentes imaginárias dos vetores $\mathbf{B_{xi}}$ e $\mathbf{B_{yi}}$ respectivamente, em [μT]
$\mathbf{B_{xr}}$,$\mathbf{B_{yr}}$	vetores complexos associados às projeções de $\mathbf{B_x}$ e $\mathbf{B_y}$ nos eixos x e y respectivamente, em [μT]

B_{xr}, B_{yr}	valores das componentes reais dos vetores $\mathbf{B_{xr}}$ e $\mathbf{B_{yr}}$ respectivamente, em [μT]
d	profundidade de instalação da fase mais próxima da superfície, em [m]
d_n, d_m	profundidade dos cabos “n” e “m”, em [m]
D_{nm}	distância entre os centros dos cabos "n" e "m", em [m]
D	distância equivalente de retorno pelo solo, em [m]
e	constante matemática
$\mathbf{E_n}$	vetor complexo associado a tensão induzida na blindagem metálica do cabo "n", em [V/km]
f	frequência do sistema, em [Hz]
g	distância entre circuitos, em [m]
H	intensidade do campo magnético, em [A/m]
h	altura do ponto de interesse em relação à superfície do solo, em [m]
$\mathbf{I}$	vetor complexo associado a corrente resultante que gera campo magnético, em [A]
I_c	valor nominal da corrente do condutor do cabo, em [A]
$\mathbf{I_{cn}}$	vetor complexo associado a corrente do condutor do cabo "n", em [A]
$\mathbf{I_{bn}}$	vetor complexo associado a corrente induzida na blindagem metálica do cabo "n", em [A]
$\mathbf{I_n}$	vetor complexo associado a corrente do cabo "n" que gera campo magnético, em [A]

j	unidade imaginária [j = $\sqrt{-1}$]
M	coeficiente para cálculo de ωt
r	distância radial do filamento condutor, em [m]
R_{bn}	resistência elétrica em corrente alternada da blindagem metálica do cabo “n” à temperatura de operação, em [Ω/km]
r_{bn}	raio médio geométrico da blindagem metálica do cabo “n”, em [m]
S	potência aparente da linha subterrânea de alta tensão, em [MVA]
s	espaçamento entre fases do circuito, em [m]
V	tensão entre fases da linha subterrânea de alta tensão, em [kV]
x	coordenada horizontal do ponto de interesse em relação ao eixo y, em [m]
X_n, X_m	coordenada horizontal do cabo "n" e coordenada horizontal do cabo "m" em relação ao eixo y, em [m]
$\mathbf{Z_{bnbm}}$	vetor complexo associado a impedância mútua entre a blindagem metálica do cabo "n" e a blindagem metálica do cabo "m", com retorno pelo solo, em [Ω/km]
$\mathbf{Z_{bnbn}}$	vetor complexo associado a impedância própria da blindagem metálica do cabo "n", com retorno pelo solo, em [Ω/km]
$\mathbf{Z_{cnbm}}$	vetor complexo associado a impedância mútua entre o condutor do cabo "n" e a blindagem metálica do cabo "m", com retorno pelo solo, em [Ω/km]
$\mathbf{Z_{cnbn}}$	vetor complexo associado a impedância mútua entre o condutor e a blindagem metálica do cabo "n", com retorno pelo solo, em [Ω/km]

$\boldsymbol{\alpha}$	fasor auxiliar de defasagem para equilíbrio das correntes
δ	profundidade de penetração, em [mm]
ϕ_x	ângulo de fase do vetor $\mathbf{B_x}$ em relação ao eixo x, em [graus]
ϕ_y	ângulo de fase do vetor $\mathbf{B_y}$ em relação ao eixo y, em [graus]
γ	constante de Euler-Mascheroni
σ	condutividade elétrica do material de blindagem, em [MS/m]
μ	permeabilidade magnética do material de blindagem, em [H/m]
μ_0	permeabilidade magnética do espaço livre, em [H/m]
μ_r	permeabilidade magnética relativa do meio, em [H/m]
ρ	resistividade elétrica do solo, em [Ω.m]
ω	velocidade angular, em [rad/s]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
1.1 Estrutura e organização do documento 1
1.2 Apresentação 2
1.2.1 Limites de exposição aos campos elétrico e magnético 3
1.3 Objetivos 5
1.4 Características técnicas de cabos isolados para tensões superiores a 35 kV 6
1.4.1 Condutor 6
1.4.2 Sistema dielétrico 7
1.4.3 Blindagem metálica 8
1.4.4 Capa externa 8
1.5 Métodos de aterramento de linhas subterrâneas de alta tensão 9
1.5.1 Método “both ends bonding” 9
1.5.2 Método “cross-bonding” 11
1.5.3 Método “single-point bonding” 12
1.6 Disposições de circuitos de linhas subterrâneas de alta tensão 13
1.6.1 Disposição plana horizontal 14
1.6.2 Disposição plana vertical 15
1.6.3 Disposição triangular 15
2 ESTADO DA ARTE 17
2.1 Introdução 17
2.2 Técnica de mitigação através da manipulação de cabos 18
2.2.1 Métodos de aterramento 18
2.2.2 Espaçamento entre fases do circuito 19
2.2.3 Disposição do circuito 19
2.2.4 Profundidade dos cabos 20
2.2.5 Permutação de fases 20
2.2.6 Divisão de fases (“phase splitting”) 21

2.3 Técnica de compensação 21
2.3.1 Técnica de compensação passiva 22
2.3.2 Técnica de compensação ativa 23
2.4 Técnica de mitigação com materiais ferromagnéticos 23
2.4.1 Formato geométrico da blindagem ferromagnética 24
2.4.2 Dimensões da blindagem ferromagnética 26
2.4.3 Permeabilidade magnética relativa do material da blindagem 26
2.4.4 Continuidade dos contatos entre os elementos da blindagem ferromagnética 27
2.5 Técnica de mitigação com materiais condutivos 28
2.5.1 Formato geométrico da blindagem condutiva 28
2.5.2 Dimensões da blindagem condutiva 29
2.5.3 Condutividade elétrica do material da blindagem 30
2.5.4 Continuidade dos contatos entre os elementos da blindagem condutiva 30
3 ESTUDOS ANALÍTICOS DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO 31
3.1 Metodologia 31
3.2 Premissas 32
3.3 Considerações 32
3.4 Resultados e discussões 34
3.4.1 Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana horizontal 34
3.4.2 Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana vertical 35
3.4.3 Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição triangular 36
3.4.4 Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana horizontal 37
3.4.5 Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana vertical 38
3.4.6 Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição triangular 39
3.4.7 Picos de campo magnético em pontos laterais do centro da linha 40

4 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES CALCULADOS E DE MEDIÇÃO 41
4.1 Introdução 41
4.2 Caso real 1 42
4.3 Caso real 2 44
4.4 Caso real 3 46
4.5 Caso real 4 48
5 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO PARA LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO 51
5.1 Introdução 51
5.2 Técnica de compensação 51
5.2.1 Técnica de compensação passiva.....52
5.2.2 Técnica de compensação ativa 54
5.2.3 Impacto da técnica de compensação na operação da linha subterrânea de alta tensão.....55
5.2.4 Exemplo de aplicação 56
5.3 Técnica de mitigação com materiais ferromagnéticos (blindagem ferromagnética) 58
5.3.1 Blindagem ferromagnética de geometria fechada 59
5.3.2 Blindagem ferromagnética de geometria aberta.....63
5.3.3 Impacto da técnica de blindagem ferromagnética na operação da linha subterrânea de alta tensão.....66
5.3.4 Exemplo de aplicação de blindagem ferromagnética 67
5.4 Técnica de mitigação com materiais condutivos (blindagem condutiva)69
5.4.1 Blindagem condutiva de geometria fechada.....71
5.4.2 Blindagem condutiva de geometria aberta 72
5.4.3 Impacto da técnica de blindagem condutiva na operação da linha subterrânea de alta tensão.....77
5.4.4 Exemplo de aplicação de blindagem condutiva.....77
6 CONCLUSÕES 80
REFERÊNCIAS.....83
APÊNDICE A – METODOLOGIA DE CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO 87
A1 Formulário 87

A2 Formulário na forma de matriz 95
A3 Equações simplificadas 97
APÊNDICE B – EXEMPLOS DE CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO 98
B1 Um circuito com disposição triangular e aterramento “both ends bonding” 98
B2 Dois circuitos com disposição plana vertical e aterramento “cross-bonding” 103
APÊNDICE C – CURVA CAMPO MAGNÉTICO VERSUS RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO 106
APÊNDICE D – CURVA CAMPO MAGNÉTICO VERSUS RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA DA BLINDAGEM METÁLICA DO CABO ISOLADO 107
APÊNDICE E – PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS EM BLINDAGENS FERROMAGNÉTICAS.....108
APÊNDICE F – CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO 110
APÊNDICE G – PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS EM BLINDAGENS CONDUTIVAS.....111
APÊNDICE H – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO 112

1 INTRODUÇÃO

1.1 Estrutura e organização do documento

Esta seção oferece um breve esclarecimento a respeito do teor de cada um dos capítulos deste documento.

No capítulo 1 deste texto são apresentados os limites de exposição aos campos elétricos e magnéticos gerados por linhas de transmissão. Os objetivos do trabalho e alguns conceitos básicos sobre cabos isolados, método de aterramento e disposições de circuitos de linhas subterrâneas de alta tensão (LSAT) também são apresentados neste capítulo.

No capítulo 2 discutem-se brevemente o estado da arte dos principais esforços destinados à metodologia de cálculo e de técnicas de mitigação de campo magnético de LSAT. A saber, estas dizem respeito à técnica de mitigação através da manipulação dos cabos, técnicas de compensação e técnicas envolvendo materiais ferromagnéticos e condutivos externos aos cabos.

A exposição dos desenvolvimentos deste trabalho inicia-se no capítulo 3. Nele são apresentados os resultados de diversos estudos analíticos de campo magnético realizados para LSAT com diferentes tipos de disposição e métodos de aterramento.

No capítulo 4 são apresentados o método de medição e a comparação entre valores analíticos e valores experimentais de campo magnético obtidos para quatro casos reais de linhas em operação.

No capítulo 5 são apresentadas as principais técnicas de mitigação de campo magnético de LSAT que envolvem materiais externos aos cabos, com destaque para exemplos de suas aplicações e os possíveis impactos na operação das LSAT.

O capítulo 6 encerra este documento fazendo uma breve síntese das contribuições decorrentes dos esforços realizados neste trabalho.

1.2 Apresentação

A energia elétrica sempre teve um papel determinante nas sociedades industrializadas ao longo dos anos, proporcionando não só o desenvolvimento sócio-econômico das pessoas como também o crescimento de um país. Em função de diversos fatores como, por exemplo, o crescimento demográfico e a maior aquisição de equipamentos elétricos pelos consumidores, há uma tendência do aumento da demanda de energia elétrica no futuro. Este aumento da demanda, consequentemente, exigirá novas instalações de linhas de transmissão com maiores potências e / ou o aumento da potência das linhas de transmissão existentes, quando possível.

Nos centros urbanos, o atendimento ao crescimento da demanda tende a ser feito através de LSAT. Nestas áreas, a implementação de linhas de transmissão aéreas (LTA) está cada vez mais restrita devido a diversos fatores, tais como impacto visual, custo de implantação e limitações físicas para posicionamento de torres. Dependendo da cidade ou região, a segurança e a confiabilidade da transmissão da energia por LTA pode ser comprometida perante efeitos climáticos adversos, tais como nevascas ou furacões.

Atualmente, outros fatores determinantes para a implementação de novas linhas de transmissão são os limites de intensidade do campo elétrico e do campo magnético por elas geradas.

Muitos países, inclusive o Brasil, definiram em suas legislações limites básicos à exposição de campo elétrico e campo magnético provenientes dos sistemas elétricos. Tais limites foram baseados nas diretrizes estabelecidas pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizante (ICNIRP). Esta organização não-governamental, formalmente reconhecida pela Organização Mundial da Saúde (OMS), avalia resultados científicos de todas as partes do mundo e estabelece as diretrizes com recomendações de limites de exposição. Estas diretrizes são periodicamente revisadas e atualizadas, quando necessário.

1.2.1 Limites de exposição aos campos elétrico e magnético

Com base nos conhecimentos científicos atuais, a ICNIRP definiu um conjunto de limites básicos de exposição ao campo elétrico e campo magnético, tanto para a população em geral como para o público ocupacional [1]. A tabela 1 mostra os limites de exposição definidos para o caso de linhas de transmissão.

Tabela 1 – Limites de exposição aos campos elétrico e magnético para linhas de transmissão definidos pela ICNIRP

Público exposto	Frequência da Linha (Hz)	Campo elétrico (kV/m) (valor eficaz)	Campo magnético (μT) (ver nota) (valor eficaz)
Geral	50 / 60	5 / 4,17	100 / 83,3
Ocupacional	50 / 60	10 / 8,33	500 / 416,7

Nota: Unidade de densidade de fluxo magnético. Por simplicidade, campo magnético refere-se à densidade de fluxo magnético neste documento.

De acordo com a OMS [2], a população submetida à exposição ocupacional consiste de trabalhadores adultos que estão conscientes dos campos e de seus efeitos. Por outro lado, o público em geral consiste de indivíduos de todas as idades e de graus de saúde variáveis que, em muitos casos, não estão alertas para sua exposição ao campo elétrico e ao campo magnético. Além disso, os trabalhadores estão expostos apenas durante suas atividades, enquanto o público em geral pode estar exposto até 24 horas por dia. Essas são as considerações básicas que levam às restrições de exposição mais rigorosas para o público geral.

No ano de 2005, a Prefeitura da cidade de São Paulo estabeleceu limites de exposição ao público geral de acordo com a Portaria Nº 80 da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente (SVMA) [3]. A tabela 2 mostra os limites de exposição definidos para locais de acesso livre à população geral e para instalações elétricas próximas de locais de permanência prolongada (4 horas ou mais diárias), tais como escolas, hospitais, residências e locais de trabalho.

Tabela 2 – Limites de exposição aos campos elétrico e magnético para linhas de transmissão definidos pela Portaria Nº 80 da SVMA - SP

Área de exposição	Campo elétrico (kV/m) (valor eficaz)	Campo magnético (μT)
Acesso geral	4,17	83,3 (valor eficaz)
Permanência prolongada (≥ 4horas)	4,17	10 (instalações existentes) 3 (novas instalações) (ver nota)

Nota: valores médios calculados para um período de 24 horas.

No Brasil foi sancionada em 5 de maio de 2009 a lei Nº 11.934 [4], que estabelece limites à exposição humana à campo elétrico, campo magnético e campo eletromagnético, associados ao funcionamento de estação transmissoras de radiocomunicação, de terminais de usuários e de sistemas de energia elétrica nas faixas de frequência até 300 GHz. De acordo com o Parágrafo Único descrito no Art. 4º da referida Lei, enquanto não forem estabelecidas novas recomendações pela OMS, serão adotados os limites da ICNIRP especificados na tabela 1.

De acordo com o subitem 4.2 de [3] e o Art. 16 de [4], as concessionárias de energia elétrica deverão, na fase de autorização e comissionamento de novo sistema de transmissão de energia ou sempre que houver alteração nas características vigentes dos sistemas de transmissão, realizar medições dos níveis de campo elétrico, campo magnético e campo eletromagnético, ou apresentar relatório de cálculos efetuados com metodologia consagrada.

Segundo a Resolução Normativa Nº 398 de 23 de março de 2010 [5], a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem a incumbência de regular e fiscalizar o atendimento aos limites de exposição relativos aos serviços de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, podendo impor penalidades previstas em regulamento específico em caso de descumprimento dos procedimentos descritos na resolução normativa.

Dependendo das condições de operação previstas para uma linha, poderá ser necessária à aplicação de uma ou mais técnicas de mitigação no projeto de instalação da mesma, de forma que os níveis emitidos fiquem abaixo dos limites definidos na legislação local.

É em função do justificado nos parágrafos anteriores que este trabalho será desenvolvido, de acordo com os objetivos enumerados na próxima secção. Para o caso de LSAT, o campo elétrico é praticamente nulo na superfície. O campo elétrico fica concentrado entre o condutor e a blindagem metálica dos cabos, a qual é interligada ao potencial de terra. Em função disso, assuntos referentes ao campo elétrico não serão abordados neste trabalho. Por simplicidade, campo magnético refere-se à densidade de fluxo magnético neste documento.

1.3 Objetivos

A proposta central deste trabalho consiste na introdução de estudos de instalações de LSAT em função do campo magnético gerado.

Nele são apresentados diversos estudos analíticos de campo magnético de LSAT com características diferentes de instalação e aterramento. A metodologia de cálculo e os resultados dos estudos analíticos com ela obtidos serão adiante devidamente relatados e discutidos.

Neste texto também se encontram descritas as comparações entre valores calculados e valores de medições de campo magnético realizadas em LSAT existentes em operação.

Além disso, são apresentadas e discutidas neste texto as principais técnicas de mitigação de campo magnético de LSAT que envolvem materiais externos aos cabos. Exemplos de suas aplicações e os possíveis impactos na operação das LSAT também serão adiante discutidos.

Deste modo, o desenvolvimento deste trabalho pretende fornecer embasamento técnico para tomada de decisão na implantação de novas LSAT e para análise de campo magnético de LSAT existentes.

Para melhor compreensão da proposta deste trabalho, serão apresentados nas próximas secções deste capítulo alguns conceitos importantes sobre cabos isolados, métodos de aterramento e disposições de cabos empregados em circuitos de LSAT. Entende-se por LSAT as linhas subterrâneas com tensão de operação superior a 35 kV neste trabalho.

1.4 Características técnicas de cabos isolados para tensões superiores a 35 kV

Os cabos isolados para tensões superiores a 35 kV são caracterizados por quatro elementos básicos: condutor, sistema dielétrico, blindagem metálica e capa externa.
A seguir serão descritos as principais características de cada um destes elementos com enfoque para cabos extrudados, que são cabos isolados com materiais dielétricos sólidos. Estes cabos representam a tecnologia atual de produção por parte das empresas fabricantes, o que justifica o foco de suas características construtivas neste trabalho.
Informações mais detalhadas sobre estes cabos e informações referentes a outros tipos de construção de cabos isolados podem ser encontradas em [6].
A figura 1 mostra os elementos construtivos que constituem um cabo extrudado para tensões superiores a 35 kV.

Figura 1 – Elementos construtivos de um cabo extrudado para tensões superiores a 35 kV

1.4.1 Condutor

O condutor é o elemento responsável pelo transporte da energia elétrica. Para tensões superiores a 35 kV, os cabos são constituídos por apenas um condutor

construído na forma redonda compacta ou na forma segmentada. A forma segmentada, também conhecida como “Milliken”, tem como principal característica a redução do efeito pelicular. Para mesma área de secção transversal, a resistência de um condutor segmentado é menor que a resistência de um condutor redondo compacto. Praticamente a forma segmentada é apenas utilizada em condutores de grande secção transversal (acima de 1000 mm²).

Os materiais utilizados são o cobre e o alumínio. A secção transversal, a seleção do material e a forma de construção levam em conta a capacidade de condução de corrente nos regimes permanente, cíclico, sobrecarga e curto-circuito. Como referência, as normas IEC 60287-1-1 [7] e IEC 60287-2-1 [8] trazem a formulação para o cálculo da capacidade de corrente em regime permanente. Para o regime cíclico e de sobrecarga, a norma aplicável é a IEC 60853-2 [9]. A norma IEC 60949 [10] apresenta a formulação referente ao regime de curto-circuito.

Logicamente, a opção de menor custo e que atenda aos requisitos de capacidade de corrente da LSAT define o condutor ideal para o cabo.

1.4.2 Sistema dielétrico

O sistema dielétrico é composto pela extrusão simultânea da blindagem do condutor, da isolação e da blindagem da isolação. As blindagens do condutor e da isolação são feitas com materiais semicondutores de bases poliméricas compatíveis para o perfeito contato e aderência com o material da isolação. Elas possuem a função básica de uniformizar a distribuição do campo elétrico na isolação do cabo.

Os materiais normalmente utilizados na isolação são o polietileno reticulado (XLPE) e a borracha etilenopropileno (EPR). A escolha do material leva em consideração as perdas dielétricas e os custos das matérias-primas. Nestes quesitos, o XLPE leva vantagem em relação ao EPR. Por outro lado, o XLPE apresenta instabilidade de suas propriedades elétricas quando em contato com água. Essa instabilidade torna obrigatória para os cabos isolados em XLPE a utilização de uma capa metálica contínua ou uma fita metálica laminada incorporada à capa externa, objetivando o

bloqueio radial à penetração de água no núcleo do cabo. Esse bloqueio radial não é necessário em cabos isolados em EPR.

Em relação aos parâmetros térmicos, tanto o XLPE quanto o EPR permitem uma temperatura máxima no condutor de 90ºC e 250ºC, para regime permanente e regime de curto-circuito respectivamente.

1.4.3 Blindagem metálica

A blindagem metálica é o elemento responsável pelo aterramento dos cabos.

Atualmente, as blindagens metálicas mais utilizadas nos cabos extrudados são constituídas de fios de cobre aplicados helicoidalmente na forma de coroa concêntrica ou de capas extrudadas de chumbo ou alumínio. A área da secção transversal é dimensionada em função do valor da corrente e o tempo de duração do curto-circuito fase-terra do sistema, conforme formulário apresentado em [10]. A seleção do material e a forma de construção levam em consideração as condições de instalação dos cabos e os custos dos materiais.

As capas extrudadas de chumbo ou alumínio, além de terem a função de transportar a corrente de curto-circuito fase-terra do sistema, também têm a função de bloqueio radial à penetração de água no núcleo do cabo isolado em XLPE. No caso de cabo isolado em XLPE constituído de blindagem a fios de cobre, este bloqueio é normalmente feito por uma fita metálica laminada incorporada à capa externa do cabo.

1.4.4 Capa externa

A capa externa tem a função básica de proteger o núcleo do cabo contra corrosão e contra danos mecânicos durante a instalação do mesmo. Na maioria das instalações de LSAT, os materiais utilizados como capa externa são o polietileno de média densidade (PEMD) e o polietileno de alta densidade (PEAD). O cloreto de polivinila

(PVC), por apresentar a característica de não propagar a chama, é um material que pode ser empregado na capa externa de cabos em áreas com possibilidade de incêndio.

Dependendo da combinação destes materiais com outros materiais específicos, a capa externa pode proteger o núcleo do cabo contra ataque de agentes externos, tais como cupins e produtos químicos. Como critério, a escolha do material leva basicamente em conta o local de instalação dos cabos e os custos dos materiais.

1.5 Métodos de aterramento de linhas subterrâneas de alta tensão

As LSAT podem ser aterradas por três métodos principais: ***método de aterramento em ambas extremidades da linha ("both ends bonding"), método de aterramento cruzado ("cross-bonding") e método de aterramento em uma extremidade da linha ("single-point bonding")***. Os métodos "cross-bonding" e "single-point bonding" são métodos especiais que possuem a característica de eliminar ou reduzir as perdas na blindagem metálica dos cabos.

A seguir serão descritas as principais características de cada um destes métodos. Estas características e outras informações mais detalhadas sobre estes métodos estão disponíveis em [11] e [12].

1.5.1 Método "both ends bonding"

As correntes circulantes nos condutores dos cabos geram campo magnético que, por sua vez, induz uma força eletromotriz (FEM) nas blindagens metálicas dos mesmos. Esta FEM, aliada ao aterramento em ambas extremidades da LSAT, provoca a circulação de correntes elétricas nas blindagens metálicas em sentido oposto ao das correntes circulantes nos condutores. Estas correntes circulantes nas blindagens metálicas geram perdas por calor nas mesmas. A intensidade destas correntes depende do espaçamento entre os cabos e da resistência elétrica da

blindagem metálica, a qual é dimensionada para suportar a corrente de curto-circuito fase-terra por um certo período de duração.

As perdas nas blindagens metálicas aumentam quando o espaçamento entre cabos do circuito da LSAT aumenta, ocasionando desta forma um aquecimento maior nas blindagens metálicas. Por outro lado, a aproximação dos cabos entre si é desfavorável para a dissipação do calor gerado pelo circuito como um todo.

A figura 2 ilustra o esquema de uma LSAT aterrada pelo método “both ends bonding”. A caixa de desconexão é recomendada para a realização de teste elétrico na capa externa dos cabos.

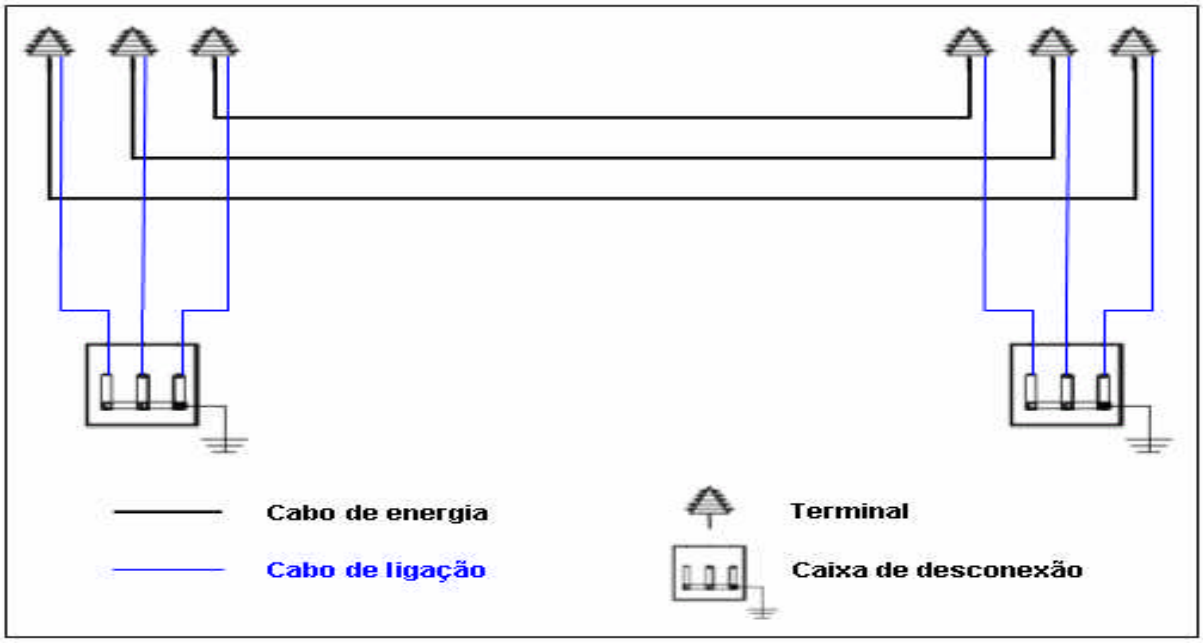

Figura 2 – Esquema de aterramento pelo método “both ends bonding”

A vantagem do aterramento pelo método “both ends bonding” está relacionada a questões de segurança e manutenção. Neste método não há tensão elétrica residual nas blindagens metálicas e não há necessidade de acessórios especiais.

A desvantagem deste método é atribuída aos custos de implementação de LSAT de elevada potência de transmissão. Considerando-se a mesma potência de transmissão, as LSAT aterradas pelo método “both ends bonding” necessitam de cabos com secções transversais maiores que as LSAT aterradas pelos métodos especiais “cross-bonding” e “single-point bonding”. Esse aumento da secção dos cabos é necessário para compensar o aquecimento gerado pelas perdas nas blindagens metálicas. Estas correntes e perdas podem ser determinadas através de cálculos analíticos presentes na norma IEC 60287-1-1 [7].

1.5.2 Método “cross-bonding”

Neste método de aterramento, o comprimento total da LSAT é dividido em um número de comprimentos de lances de cabos exatamente divisível por três. Os cabos são transpostos a cada posição da emenda seccionada e as blindagens metálicas são conectadas em linha reta através das caixas de desconexão com limitador de tensão de surto. Nas extremidades da LSAT, os cabos são aterrados através de caixas de desconexão, as quais possibilitam os testes de capa externa após instalação dos cabos e durante a manutenção do sistema.

A figura 3 ilustra o esquema de uma LSAT aterrada pelo método “cross-bonding”. Para o caso de comprimentos elementares iguais e disposição de cabos simétrica, o vetor soma das tensões induzidas nas blindagens metálicas, após três comprimentos sucessivos, resulta nulo. Nestas condições, correntes circulantes não são induzidas e as perdas nas blindagens metálicas são nulas. Caso os comprimentos elementares sejam desequilibrados e / ou a disposição dos cabos seja assimétrica entre comprimentos, correntes circulantes serão induzidas e gerarão perdas. A norma IEC 60287-1-1 [7] apresenta formulário específico para o cálculo destas perdas.

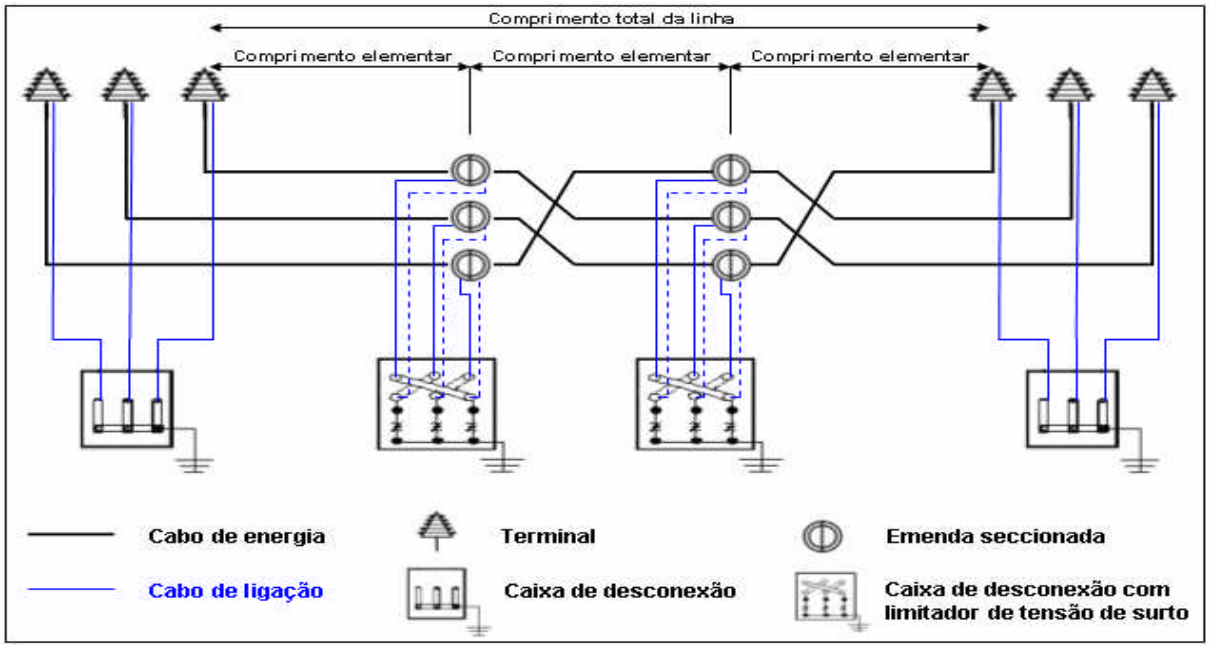

Figura 3 – Esquema de aterramento pelo método “cross-bonding”

O método “cross-bonding” é empregado em LSAT de potência elevada e grande comprimento (acima de 1 km). Ao contrário do método “both ends bonding”, a vantagem do método “cross-bonding” está relacionada ao custo de implementação da LSAT e as desvantagens estão relacionadas à segurança e manutenção.

Além da ausência de perdas nas blindagens metálicas, este método permite que as fases do circuito sejam instaladas mais distantes entre si, o que facilita a dissipação térmica e aumenta a capacidade de corrente do circuito da LSAT.

As desvantagens deste método são a necessidade de manutenção preventiva nas caixas de desconexão e a necessidade de testes elétricos periódicos na capa externa dos cabos. Apesar de ser limitada a um valor seguro, a tensão elétrica presente nas blindagens metálicas e nas emendas representa riscos de choque elétrico.

1.5.3 Método “single-point bonding”

Em LSAT relativamente curtas, que não requerem nenhuma emenda (ou somente uma emenda), o método “cross-bonding” torna-se inviável devido aos custos envolvidos. Nestes casos, o método mais econômico é conectar e aterrar as blindagens metálicas dos cabos em apenas uma extremidade da LSAT. A figura 4 ilustra o esquema de uma LSAT aterrada pelo método “single-point bonding”.

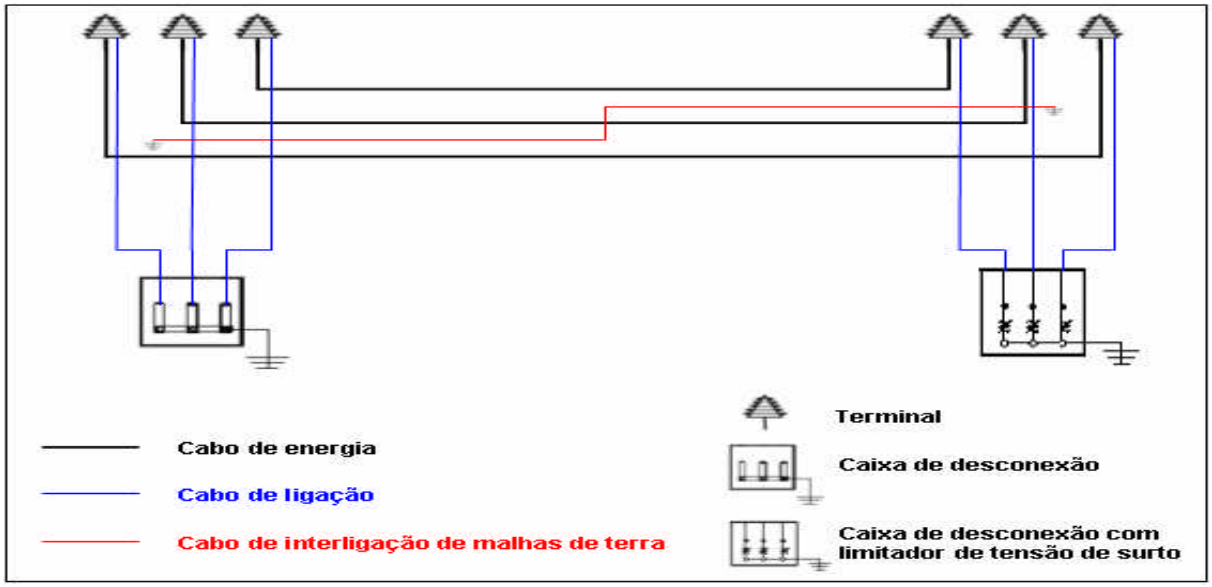

Figura 4 – Esquema de aterramento pelo método “single-point bonding”

Similarmente ao método “cross-bonding”, a vantagem do método “single-point bonding” está relacionada ao custo de implementação da LSAT e as desvantagens estão relacionadas à segurança e manutenção.

Neste método, não há caminho fechado para a circulação das correntes nas blindagens metálicas e, portanto, não há perdas nas mesmas. Nestas condições, os cabos podem ser espaçados entre si com maiores distâncias, facilitando assim a dissipação térmica e aumentando a capacidade de corrente do circuito. Por outro lado, há presença de tensão elétrica induzida na extremidade não aterrada. Essa tensão apresenta maior intensidade com o aumento do comprimento da LSAT.

Neste método também existe a necessidade de manutenção preventiva nas caixas de desconexão e de testes elétricos periódicos na capa externa dos cabos.

1.6 Disposições de circuitos de linhas subterrâneas de alta tensão

As LSAT podem apresentar diversas modalidades de instalação, tais como cabos diretamente enterrados em materiais artificiais termicamente e mecanicamente estáveis (também conhecidos como backfill), cabos em banco de dutos, cabos em canaletas ou em bandejas. A definição da modalidade depende principalmente do local de instalação da LSAT como, por exemplo, ruas, avenidas, túnel, trecho interno de subestações, etc. Maiores informações sobre as modalidades de instalação de LSAT encontram-se disponíveis em [13].

Nos centros urbanos, geralmente os cabos são instalados em dutos envolvidos por “backfill” ou concreto. Esta solução apresenta como principais vantagens menos transtornos ao tráfego de pedestres e veículos e maior controle e segurança durante as atividades de obra civil e instalação dos cabos. A definição da disposição dos cabos da LSAT leva em conta a potência de transmissão e o número de circuitos da linha, as limitações físicas do local de instalação e os custos de obra civil.

A seguir serão apresentadas as disposições de circuitos atualmente empregadas nas instalações de LSAT situadas nos centros urbanos, como é o caso da disposição plana horizontal, disposição plana vertical e disposição triangular. A disposição trifólio, a qual os cabos são encostados entre si e formam um triângulo

equilátero, não é utilizada atualmente nos centros urbanos. Quando viável, sua aplicação ocorre em canaletas, túneis e em trechos subterrâneos onde é possível manter valas e cabos expostos ao tempo sem riscos de danos materiais e retrabalhos.

1.6.1 Disposição plana horizontal

A disposição plana horizontal é normalmente empregada em linhas com grande potência de transmissão, onde há necessidade de utilizar os métodos de aterramento “cross-bonding” ou “single-point bonding”. A figura 5 ilustra a disposição plana horizontal para linhas constituídas de um circuito e dois circuitos.

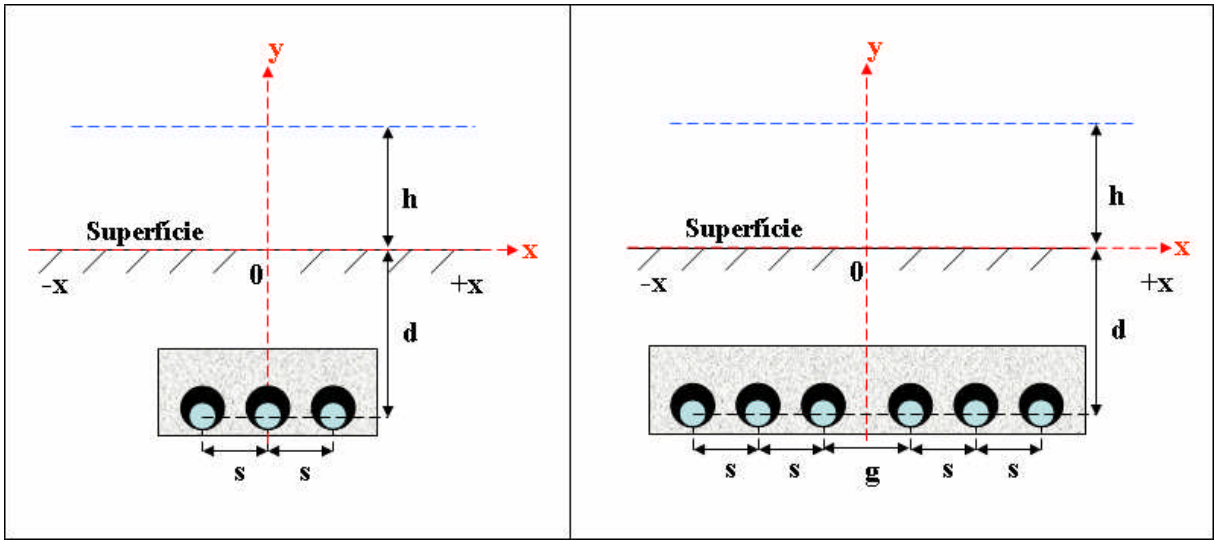

Figura 5 – Disposição plana horizontal para um circuito e para dois circuitos

Como vantagens, esta disposição contribui para uma melhor dissipação térmica dos cabos e permite maior facilidade de instalação dos dutos, possibilitando redução do tempo de execução da obra civil. A desvantagem desta disposição está relacionada ao caso de linhas constituídas de dois circuitos, onde a grande largura de vala resultante representa aumento dos custos de obra civil. Neste caso, a aplicação desta disposição pode ser justificada em função de trechos contendo interferências que impossibilitam a passagem dos cabos por outro tipo de disposição.

1.6.2 Disposição plana vertical

A disposição plana vertical também é empregada em linhas com grande potência de transmissão, onde há necessidade de utilizar os métodos de aterramento “cross-bonding” ou “single-point bonding”. A figura 6 ilustra a disposição plana vertical para linhas constituídas de um circuito e dois circuitos.

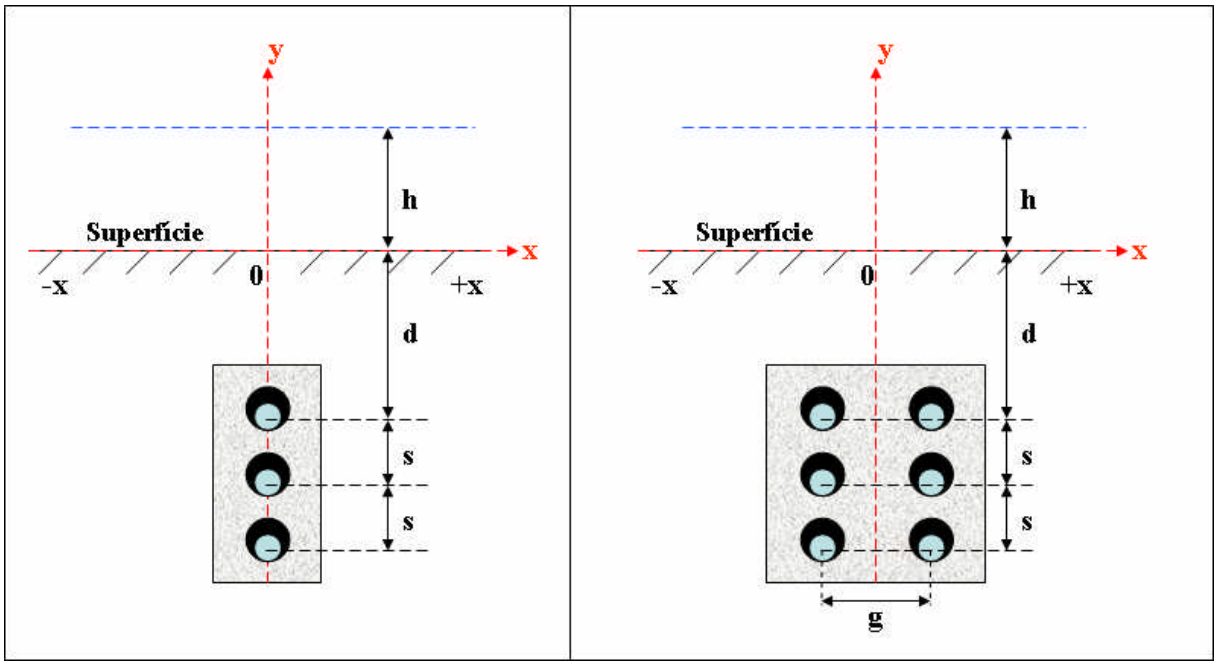

Figura 6 – Disposição plana vertical para um circuito e para dois circuitos

A vantagem desta disposição está relacionada ao caso de linhas constituídas por dois circuitos, onde os custos de obra civil são reduzidos através da redução da largura da vala. Normalmente, esta disposição não é aplicada para o caso de linhas constituídas por um circuito, a não ser que limitações de espaço físico justifiquem sua utilização.

1.6.3 Disposição triangular

A disposição triangular é normalmente empregada em linhas com baixa potência de transmissão, onde é possível utilizar o método de aterramento “both ends bonding”.

Neste tipo de aterramento, a disposição triangular gera menos perdas na blindagem metálica que às outras disposições.

Apesar de não ser a melhor alternativa de solução, a disposição triangular também pode ser empregada em linhas com grande potência de transmissão, onde há necessidade de utilizar os métodos de aterramento “cross-bonding” ou “single-point bonding”.

A figura 7 ilustra a disposição triangular para linhas constituídas de um circuito e dois circuitos.

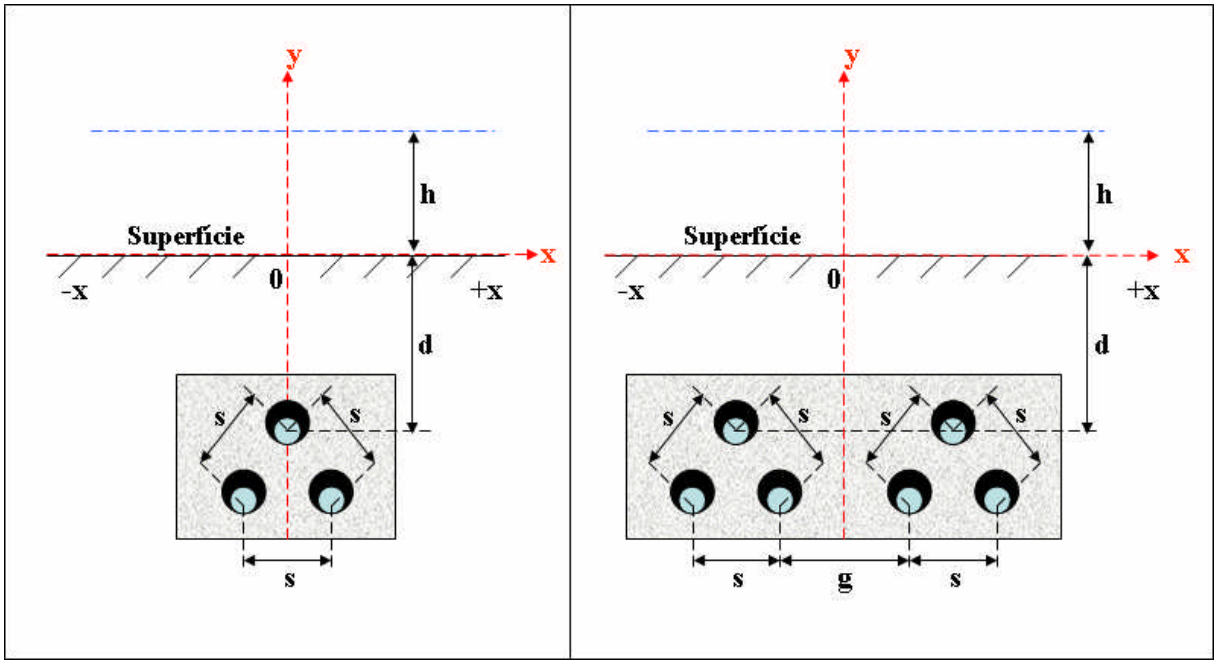

Figura 7 – Disposição triangular para um circuito e para dois circuitos

Do ponto de vista de dissipação térmica dos cabos, a disposição triangular leva desvantagem apenas em relação à disposição plana vertical. Considerando-se linhas constituídas por dois circuitos, a disposição triangular permite menores larguras que a disposição plana horizontal e menores alturas que a disposição plana vertical. Dependendo do espaço físico e das condições de interferência de um determinado trecho, esta solução pode ser imprescindível para a passagem dos cabos.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

A partir dos anos 70, o campo elétrico e o campo magnético gerados pelas linhas de transmissão passaram a ser motivo de preocupação devido a uma possível relação entre a incidência de câncer e a exposição a estes campos. Estas suspeitas, devido ao interesse que o público e os meios de comunicação lhe dedicaram na época, despertaram a investigação científica que se seguiu. Desde então, têm sido publicados inúmeros artigos científicos e resultados de investigações relacionadas a estes campos.

Neste capítulo, alguns dos trabalhos representativos dos esforços referentes ao campo magnético de LSAT serão apresentados, com destaque especial para aqueles que constituíram a base das informações contidas nos próximos capítulos deste documento.

Esta revisão bibliográfica encontra-se a seguir organizada em quatro temas principais, cada um deles correspondente a uma das próximas secções deste capítulo. O primeiro destes temas diz respeito à mitigação do campo magnético através da ação direta nos parâmetros elétricos e de instalação de LSAT sem a presença de blindagens ferromagnéticas ou condutivas. O segundo, por sua vez, aborda o uso da técnica de compensação para mitigação do campo magnético. O terceiro tema trata da técnica de blindagem de campo magnético através da utilização de materiais ferromagnéticos. A quarta seção encerra o capítulo, trazendo algumas informações a respeito da mitigação do campo magnético através de blindagem constituída por materiais condutivos.

2.2 Técnica de mitigação através da manipulação de cabos

Os primeiros trabalhos relacionados ao campo magnético de LSAT foram desenvolvidos em época que não se dispunha de computadores eficientes destinados ao cálculo numérico de problemas de engenharia. Deste modo, técnicas puramente analíticas, tais como a Lei de Biot-Savart e o princípio da superposição, eram empregadas para calcular a intensidade e a distribuição do campo magnético em função das condições de instalação das LSAT.

Apesar das limitações e hipóteses simplificadoras que se fazem necessárias para tornar viável o tratamento analítico, podem-se constatar nos trabalhos de Cooper [14] e Vérité [15], que a Lei de Biot-Savart e o princípio da superposição são válidas para diagnosticar com boa precisão o campo magnético de LSAT sem a presença de componentes ferromagnéticos. Esta constatação é caracterizada pela proximidade entre os valores calculados por estas metodologias e valores de medições realizadas.

Através da validação destas técnicas analíticas, torna-se possível suas aplicações para verificar as influências que parâmetros de instalação de LSAT têm sobre a intensidade e a distribuição do campo magnético. Embora estes parâmetros sejam abordados simultaneamente na análise de LSAT, cada um tem uma parcela de contribuição para a mitigação do campo magnético. A seguir, será apresentado em subitens cada um desses parâmetros, juntamente com a citação dos trabalhos que os abordam e que fazem parte da referência deste documento.

2.2.1 Métodos de aterramento

Segundo os conceitos apresentados no item 1.4 do capítulo 1, a definição do método de aterramento leva em consideração a potência de transmissão e o comprimento da LSAT, visando aspectos econômicos, de segurança e manutenção.

A contribuição do método de aterramento para mitigação do campo magnético de LSAT é abordada nos trabalhos desenvolvidos por Vérité [15] e Bucea e Kent [16].

De acordo com resultados de cálculos analíticos realizados nestes trabalhos, pode-se constatar que o método de aterramento “both ends bonding” contribui para menores intensidades de campo magnético, se comparado ao método “single-point bonding”.

Particularmente em [15], a influência da resistência da blindagem metálica sobre a intensidade de campo magnético também é abordada no caso envolvendo o método de aterramento “both ends bonding”. Resultados de cálculos realizados neste trabalho demonstram que a redução da resistência da blindagem metálica contribui para a redução da intensidade do campo magnético.

2.2.2 Espaçamento entre fases do circuito

O espaçamento entre fases do circuito é um parâmetro geométrico definido em função do tipo de aterramento da linha e da modalidade de instalação. Sua influência sobre o campo magnético gerado por LSAT é mencionada nos trabalhos desenvolvidos por Vérité [15], Bucea e Kent [16] e D´Amore, Menghi e Sarto [17]. De acordo com resultados de cálculos analíticos realizados nestes trabalhos, verifica-se que a maior proximidade entre as fases do circuito contribui para menores intensidades de campo magnético.

2.2.3 Disposição do circuito

De acordo com conceitos descritos no item 1.5 do capítulo 1, a definição da disposição do circuito da LSAT leva em conta a potência de transmissão e o número de circuitos da linha, as limitações físicas do local de instalação e os custos de obra civil. A influência da disposição do circuito sobre a intensidade do campo magnético gerado é abordada nos trabalhos desenvolvidos por Vérité [15] e D´Amore, Menghi e Sarto [17]. Segundo os resultados de cálculos analíticos realizados nestes trabalhos, verifica-se que a disposição triangular contribui para menores intensidades de

campo magnético, considerando-se o mesmo espaçamento entre fases e a mesma profundidade da fase mais próxima da superfície.
Particularmente em [17], pode-se constatar que a disposição plana vertical contribui para menores intensidades de campo magnético que a disposição plana horizontal.

2.2.4 Profundidade dos cabos

A definição da profundidade dos cabos leva principalmente em conta a potência de transmissão da LSAT e as interferências presentes na rota de instalação. De acordo com o formulário presente em [8] para cabos enterrados, a resistência térmica do meio externo aumenta com o aumento da profundidade dos cabos (considerando-se o mesmo valor da resistividade térmica do solo). Em outras palavras, o aumento da profundidade dificulta a dissipação do calor gerado pelos cabos. Em alguns casos, pode ser necessário à troca de um cabo por outro de maior secção do condutor para compensar essa dissipação térmica e suportar a potência de transmissão.
A contribuição da profundidade dos cabos para a mitigação do campo magnético de LSAT é tratada em [15] e [18]. De acordo com resultados de cálculos analíticos realizados nestes trabalhos, verifica-se que o aumento da profundidade dos cabos contribui para menores intensidades de campo magnético na superfície.

2.2.5 Permutação de fases

A permutação de fases é válida para LSAT constituídas de no mínimo dois circuitos trifásicos que transportam simultaneamente corrente elétrica. Também é válida para o caso de LSAT constituída por um circuito composto por dois cabos por fase. A influência da permutação de fases é mencionada em [15], [18] e [19]. Segundo estudos analíticos presentes nestes trabalhos, pode-se constatar que através da permutação das fases de um circuito e da manutenção do posicionamento das fases

do outro, é possível obter uma redução considerável da intensidade do campo magnético na superfície.

2.2.6 Divisão de fases (“phase splitting”)

A técnica de divisão de fases, quando aplicada a um circuito trifásico, consiste em dividir duas das três fases em quatro cabos e posicionar estes cabos de forma simétrica ao redor da terceira fase, formando uma disposição composta por cinco cabos. Este tipo de solução, embora muito eficiente na mitigação do campo magnético, é raramente aplicada em LSAT devido a custos de implantação e devido à dificuldade de acesso e de reparo numa eventual falha da fase que é envolvida pelos cabos. Isso pode justificar a ausência de casos práticos de aplicação desta técnica em LSAT até o presente momento.

2.3 Técnica de compensação

Baseada na Lei de Lenz, esta técnica consiste em mitigar o campo magnético gerado pela LSAT através de um campo magnético de sentido oposto, gerado a partir da corrente circulante em laços de cabos devidamente posicionados em relação aos cabos da LSAT.

A técnica de compensação pode ser do tipo passiva ou ativa. Na técnica de compensação passiva a corrente circulante no laço é induzida pelo campo magnético da LSAT, segundo a Lei de Faraday. No caso da técnica de compensação ativa, a corrente circulante no laço é injetada através de um sistema de controle dedicado para obter a maior eficiência de mitigação do campo magnético.

2.3.1 Técnica de compensação passiva

O emprego de laços passivos é uma técnica bastante conhecida para atenuar o campo magnético de LTA. Nesta secção serão apresentados alguns trabalhos que tratam da aplicação desta técnica em LSAT, assim como os parâmetros que contribuem para aumentar a sua eficiência na mitigação do campo magnético.

A influência do posicionamento do laço na mitigação do campo magnético é abordada em [18], [19], [20] e [21]. Segundo as análises realizadas nestes trabalhos, a locação do(s) laço(s) num ponto acima dos cabos da LSAT contribui para reduzir o campo magnético em pontos na direção da superfície. Além do posicionamento, Maioli e Zaccone [20] e Cruz, Hoeffelman e del Pino [21] comprovam através de estudos computacionais que uma maior atenuação do campo magnético é obtida com um número maior de laços devidamente instalados. Além disso, a utilização de laços no mesmo formato da disposição dos cabos da LSAT também contribui para melhores resultados de mitigação.

Em relação aos parâmetros elétricos, a corrente induzida no laço depende diretamente da resistência e da reatância indutiva característica dos cabos utilizados. Estudos realizados por Maioli e Zaccone [20] e por Cruz, Hoeffelman e del Pino [21] mostram que a redução do valor da resistência do cabo do laço contribui para a redução da intensidade do campo magnético resultante de todo o sistema. Particularmente em [20], comparações entre materiais de condutores indicam que a utilização de laços compostos por cabos de grandes secções transversais de cobre, além de contribuir para melhores resultados de mitigação de campo magnético, também contribui para que a influência térmica sobre os cabos da LSAT seja mínima, evitando-se assim um comprometimento da capacidade de condução de corrente da linha.

A influência da reatância indutiva sobre a eficiência da técnica de compensação passiva é tratada nos trabalhos desenvolvidos por Salinas [19] e Cruz, Hoeffelman e del Pino [21]. Segundo análises realizadas nestes trabalhos, a utilização de capacitores conectados em série com os laços contribui para a redução da intensidade do campo magnético resultante.

2.3.2 Técnica de compensação ativa

A técnica de compensação ativa é uma alternativa para os casos em que a técnica de compensação passiva não é suficiente para atenuar o campo magnético num nível desejado. Nesta técnica, melhores resultados de mitigação de campo magnético são obtidos através de uma corrente injetada por um sistema de controle. Esse sistema calcula a magnitude e o ângulo de fase da corrente de maneira a garantir um maior fator de redução do campo magnético, em função da variação da corrente da linha.

Devido à necessidade de implantação e manutenção de equipamentos sofisticados e caros, a técnica de compensação ativa não é uma solução atrativa para LSAT. Isso pode justificar a ausência de casos práticos de aplicação desta técnica em LSAT até o presente momento.

2.4 Técnica de mitigação com materiais ferromagnéticos

A análise da eficiência e o desenvolvimento de técnicas de mitigação de campo magnético envolvendo materiais de comportamentos não-lineares (magnéticos e condutivos) só foram possíveis após o surgimento de computadores eficientes e softwares dedicados ao cálculo numérico. O método numérico, ao contrário do método analítico, possibilita a análise do campo magnético no domínio bidimensional (2D) e tridimensional (3D), levando-se em consideração as estruturas geométricas e as características físicas dos materiais e da fonte do campo magnético (correntes).

A definição das características construtivas das blindagens ferromagnéticas leva em consideração aspectos como maior facilidade de instalação, menores custos, resistência à corrosão e menores impactos na operação da LSAT, visando a maior eficiência na mitigação do campo magnético.

Nesta seção serão apresentadas algumas das contribuições já realizadas sobre a utilização de materiais ferromagnéticos na mitigação de campo magnético gerado por cabos isolados. Assim como nas técnicas anteriormente apresentadas, a técnica

de mitigação envolvendo materiais ferromagnéticos também depende de parâmetros que, quando dimensionados corretamente, aumentam a eficiência da blindagem.
A seguir será apresentado em subitens cada um desses parâmetros, juntamente com a citação dos trabalhos que os abordam e que fazem parte da referência deste documento.

2.4.1 Formato geométrico da blindagem ferromagnética

As blindagens ferromagnéticas geralmente são formadas por placas planas, placas na forma de “U invertido”, tubos e “raceways”. A análise da eficiência do formato geométrico para a mitigação do campo magnético é abordada em [16], [18], [19], [22], [23], [24] e [25]. De acordo com estes trabalhos, as blindagens ferromagnéticas que envolvem os cabos por completo são mais eficientes na mitigação do campo magnético.
No arranjo experimental realizado por Bucea e Kent [16], verifica-se que chapas flexíveis de aço (utilizadas em transformadores, motores e outros equipamentos) são mais eficientes na mitigação do campo magnético quando envolvem completamente os cabos, se comparada às chapas flexíveis aplicadas na forma de “U invertido”. Já nas análises numéricas realizadas em [18], pode-se constatar que placas de aço posicionadas na forma de “U invertido” apresentam melhores resultados de mitigação que placas planas de aço.
Em [19], análises numéricas para verificação da eficiência do formato geométrico das blindagens ferromagnéticas foram realizadas para circuitos com disposição plana horizontal e trifólio. Nas análises foram consideradas placas de aço envolvendo o circuito por completo, placas de aço unidas formando um “U invertido”, duas placas planas horizontais (colocadas acima e abaixo do circuito), uma placa plana horizontal acima do circuito e duas placas planas verticais (colocadas em cada lado do circuito). De acordo com os resultados obtidos nestas análises, blindagens formadas por placas de aço unidas e envolvendo o circuito por completo apresentam fator de redução maior que os outros formatos de blindagem.

Nos testes experimentais realizados em [22] pode-se verificar que um tubo de aço proporciona uma maior redução do campo magnético que placas de aço na forma de "U invertido". Além disso, pode-se constatar neste trabalho que o método dos elementos finitos é um método numérico eficiente para a análise de campo magnético envolvendo materiais ferromagnéticos. Tal constatação é caracterizada pela proximidade entre os valores calculados por este método e os valores experimentais obtidos.

Estudos realizados por Bolza, Donazzi e Maioli [23] mostram que a eficiência da blindagem ferromagnética aumenta à medida que a mesma vai envolvendo os cabos por completo. Neste trabalho, simulações para verificação da eficiência de blindagens constituídas de tubos ferromagnéticos indicam que mesmo com a variação brusca do valor da corrente dos cabos (de 875 A para 1500 A), a variação da intensidade do campo magnético é inferior a 0,1 μT, considerando-se o mesmo ponto de verificação.

Em [24] e [25] são mostradas algumas experiências já realizadas em LSAT existentes envolvendo materiais ferromagnéticos para a atenuação do campo magnético. Em ambos os trabalhos, a solução para atenuar o campo magnético em níveis de exposição muito baixos considera a utilização de blindagens ferromagnéticas de geometria fechada. Particularmente em [24], é apresentada uma blindagem denominada "raceway", a qual é constituída por uma base em forma de "U" e uma tampa de mesmo material. De acordo com as características elétricas da linha, um campo magnético cerca de 40 μT seria gerado a 1 m da superfície e sobre o eixo central dos circuitos, caso não houvesse a blindagem. Com a presença da blindagem, o valor da densidade de fluxo para o mesmo ponto foi reduzido para 3 μT (fator de redução de 13 vezes).

A solução apresentada em [25] para uma linha de 132 kV em Genova mostra cabos dentro de um tubo de aço com diâmetro de 0,5 m, instalado a uma profundidade próxima da superfície. Esta solução permitiu que a intensidade do campo magnético ficasse abaixo de 0,2 μT (considerando corrente de 800 A, ponto a 1 m da superfície e sobre o eixo da linha).

2.4.2 Dimensões da blindagem ferromagnética

A influência das dimensões das blindagens ferromagnéticas na mitigação do campo magnético é mencionada em [16], [17], [18] e [19]. No arranjo experimental realizado por Bucea e Kent [16], verifica-se que as blindagens formadas por chapas flexíveis de aço e que envolvem os cabos por completo, são mais eficientes na mitigação do campo magnético quando apresentam maiores comprimentos longitudinais. Pode-se verificar também neste trabalho que o aumento da espessura destas blindagens não contribui para uma redução significativa do campo magnético.

Cálculos numéricos realizados por D´Amore, Menghi e Sarto [17] mostram que a redução do raio de tubos de ferro contribui para atenuação do campo magnético. De acordo com [17] e [19] as blindagens ferromagnéticas são mais eficientes quando instaladas mais próximas dos cabos.

Análises numéricas realizadas em [18] e [19] mostram que o aumento da largura da placa plana ferromagnética contribui para o aumento da eficiência da blindagem nos pontos acima da região central da placa, porém, podem proporcionar o aumento do campo magnético nas extremidades da placa. Pode-se verificar em [19] que o aumento da espessura da placa plana também contribui para a redução da intensidade do campo magnético nos pontos acima da região central da placa. Entretanto, este aumento torna-se irrelevante à medida que os pontos de interesse se afastam lateralmente sobre o eixo da secção transversal da linha.

De acordo com estudos realizados em [19], a diminuição do raio interno de tubos metálicos contribui para a redução do campo magnético externo ao tubo. Já a variação da espessura do tubo é praticamente irrelevante para esta redução.

2.4.3 Permeabilidade magnética relativa do material da blindagem

A influência da permeabilidade magnética relativa do material da blindagem é tratada nos trabalhos desenvolvidos por D´Amore, Menghi e Sarto [17] e Salinas [19]. Em [17], cálculos numéricos através do método dos elementos finitos indicam

que a eficiência da blindagem constituída por placa plana de ferro aumenta à medida que o valor da permeabilidade magnética relativa do material é reduzido, considerando-se a distribuição de linhas de campo geradas por circuito com disposição plana horizontal. Já o inverso ocorre para circuito com disposição plana vertical.

De acordo com estudos realizados em [19], tubos constituídos de materiais ferromagnéticos com maiores permeabilidades relativas apresentam melhor eficiência de blindagem. Em relação à blindagem constituída por placa plana, simulações numéricas mostram que o aumento da permeabilidade magnética relativa contribui para a redução do campo magnético apenas nos pontos próximos da região central acima da placa. Em pontos lateralmente afastados, a permeabilidade magnética relativa torna-se irrelevante para a eficiência da blindagem.

2.4.4 Continuidade dos contatos entre os elementos da blindagem ferromagnética

A continuidade dos contatos entre os elementos da blindagem ferromagnética é tratada nos trabalhos desenvolvidos por Bascom [18] e Salinas [19]. Segundo estes trabalhos, deve-se eliminar espaços (gaps) entre estes elementos para não comprometer a eficiência da blindagem ferromagnética.

De acordo com [18], blindagens constituídas por placas planas de aço na forma de “U invertido” devem ter os contatos entre as placas verticais e a placa horizontal soldados para eliminar os espaços (gaps). Já em relação às blindagens constituídas por placas planas de aço, a utilização de solda não é necessária para o contato entre as placas ao longo do eixo longitudinal da linha. A sobreposição das placas é suficiente para eliminar os espaços e garantir a continuidade da blindagem.

2.5 Técnica de mitigação com materiais condutivos

Assim como as blindagens ferromagnéticas, a definição das características construtivas das blindagens condutivas leva em consideração aspectos como maior facilidade de instalação, menores custos, resistência à corrosão e menores impactos na operação da LSAT, visando a maior eficiência de blindagem.

A seguir serão apresentados os parâmetros que contribuem para o aumento da eficiência da blindagem condutiva, baseados em algumas contribuições já realizadas e que fazem parte da referência deste documento.

2.5.1 Formato geométrico da blindagem condutiva

A análise da eficiência do formato geométrico da blindagem condutiva para a mitigação do campo magnético é mencionada em [19] e [26]. Em [19], análises numéricas foram realizadas considerando-se placas de alumínio constituindo blindagens de diversos formatos geométricos, tais como placas unidas envolvendo o circuito por completo, placas unidas formando um “U invertido”, duas placas planas horizontais (colocadas acima e abaixo do circuito), uma placa plana horizontal acima do circuito e duas placas planas verticais (colocadas em cada lado do circuito). Estas análises foram realizadas para circuitos com disposição plana horizontal e disposição trifólio.

De acordo com os resultados obtidos nestas análises, blindagens formadas por placas de alumínio unidas e que envolvem os circuitos são mais eficientes na mitigação do campo magnético. A alternativa de blindagem composta por uma placa plana horizontal acima do circuito é a que apresenta menor performance na mitigação do campo magnético.

Segundo Hoeffelman [26], a blindagem constituída de placas de alumínio com formato geométrico de “H” é mais eficiente na redução do campo magnético que blindagens constituídas por placas planas de alumínio ou por placas de alumínio unidas formando um “U invertido”. A aplicação prática da blindagem de alumínio em

forma de “H” é apresentada em [27] numa LSAT de 150 kV instalada na Bélgica. De acordo com as características elétricas da linha, um fator de redução de aproximadamente 10 vezes foi obtido com a presença da blindagem.

2.5.2 Dimensões da blindagem condutiva

A influência das dimensões das blindagens condutivas na mitigação do campo magnético é mencionada nos trabalhos desenvolvidos por D´Amore, Menghi e Sarto [17], Salinas [19] e Hoeffelman [26]. De acordo com estes trabalhos, o aumento da espessura de placas planas de alumínio contribui para o aumento da eficiência da blindagem na atenuação do campo magnético, principalmente em pontos na região central sobre a placa. Entretanto, o aumento da espessura para valores acima do valor da profundidade de penetração (“skin depth”) não proporciona melhor eficiência da blindagem. Segundo estes trabalhos, espessuras da ordem de 3 mm são recomendadas para se obter melhor eficiência das placas planas de alumínio, tanto na mitigação do campo magnético como também na proteção mecânica e resistência à corrosão.

De acordo com [19] e [26], o aumento da largura das placas planas condutivas contribui para a redução da intensidade do campo magnético ao longo da secção transversal da linha. Entretanto, esta largura deve ser dimensionada com o objetivo de evitar a queda brusca da eficiência da blindagem em relação aos pontos próximos da região central sobre a placa. Para isso, Hoeffelman [26] recomenda que a razão entre a largura da placa plana e a distância da placa aos cabos seja superior ao valor 4. A aproximação entre a placa e os cabos aumenta a eficiência da blindagem, porém, pode impactar na capacidade de condução de corrente da linha devido ao aquecimento presente na placa.

Em relação às blindagens condutivas com formato geométrico do tipo fechado, resultados de cálculos numéricos realizados em [17] mostram que o aumento do raio de tubo de alumínio contribui para a redução do campo magnético externo ao tubo. De acordo com cálculos numéricos realizados em [19], o aumento da área do

quadrado formado por placas de aço, as quais envolvem o circuito por completo, proporciona maiores fatores de redução do campo magnético.

2.5.3 Condutividade elétrica do material da blindagem

A condutividade elétrica é um parâmetro essencial para a eficiência da blindagem condutiva. Sua influência é pesquisada no trabalho desenvolvido por Salinas [19], onde cálculos numéricos realizados mostram que materiais com maior condutividade elétrica são mais eficientes na redução do campo magnético. Em outras palavras, blindagens de cobre são mais eficientes na mitigação do campo magnético que blindagens de alumínio, considerando-se a mesma espessura dos materiais.

2.5.4 Continuidade dos contatos entre os elementos da blindagem condutiva

De acordo nos trabalhos desenvolvidos por Salinas [19] e Hoeffelman [26], blindagens constituídas por placas planas não necessitam de soldas entre os elementos ao longo do eixo longitudinal da linha. A sobreposição entre placas é suficiente para manter a continuidade da blindagem ao longo do eixo longitudinal. Já em relação às blindagens na forma de “U invertido”, há a necessidade de um ótimo contato entre as placas verticais e a placa horizontal da geometria “U invertido” e, também, entre os diferentes elementos ao longo do eixo longitudinal da linha.

Segundo [19] e [26], blindagens com formato geométrico “H” devem apresentar um ótimo contato elétrico entre as placas verticais ao longo do eixo longitudinal. Além disso, as placas verticais opostas da blindagem devem ser interligadas nas extremidades da área blindada para possibilitar a circulação das correntes parasitas nas partes laterais da blindagem. Já às placas horizontais da blindagem “H” não necessitam estarem sobrepostas entre si ao longo do eixo longitudinal e não necessitam estarem em contato com as placas verticais ao longo do eixo transversal da linha.

3 ESTUDOS ANALÍTICOS DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO

3.1 Metodologia

Os estudos analíticos presentes neste capítulo visam demonstrar a influência dos parâmetros de instalação e dos parâmetros elétricos das LSAT sobre a intensidade e a distribuição do campo magnético. A metodologia aplicada nestes estudos é aquela proposta por Vérité [15], a qual baseia-se na Lei de Biot-Savart e no princípio da superposição para calcular o campo magnético resultante num determinado ponto do plano XY, perpendicular ao eixo longitudinal da linha. Esta metodologia de cálculo encontra-se descrita no apêndice A deste documento. Nos presentes estudos, os resultados foram obtidos com auxílio do software Mathcad 2000 Professional.

A figura 8 ilustra o fluxograma de cálculo do campo magnético em função do tipo de aterramento da LSAT.

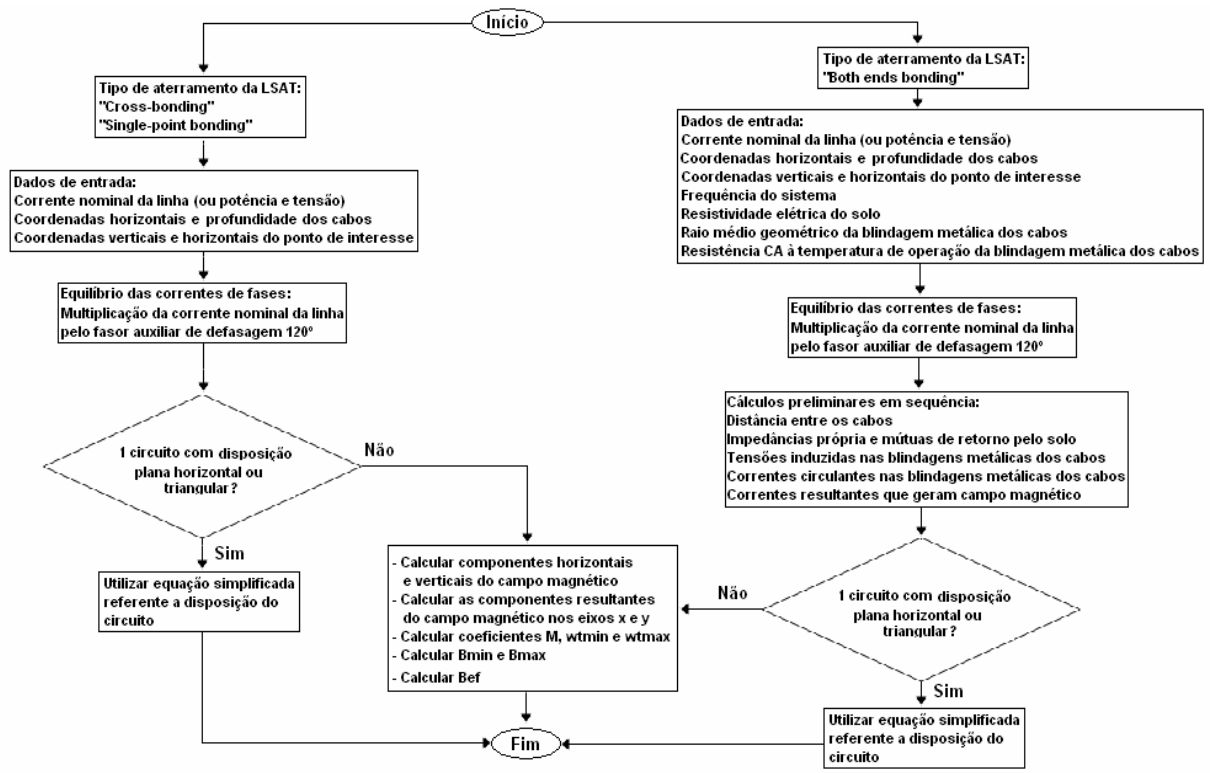

Figura 8 – Fluxograma de cálculo do campo magnético em função do tipo de aterramento da linha

3.2 Premissas

A aplicação da metodologia anteriormente mencionada é válida considerando-se as seguintes premissas:

- O circuito da LSAT é longo e perfeitamente retilíneo, onde os cabos estão sempre paralelos entre si.
- O plano XY, onde o campo magnético é calculado, é suficientemente distante das extremidades da linha, de forma a desprezar qualquer efeito devido aos equipamentos da subestação ou devido a variação da direção dos cabos.
- Não existem materiais ferromagnéticos presentes nos cabos ou próximos da linha, ou seja, a permeabilidade magnética relativa de todo o sistema é considerada unitária (solo, cabo, etc).
- O campo magnético em qualquer ponto do plano XY é igual a superposição linear dos campos magnéticos gerados pelas correntes circulantes nos condutores e nas blindagens dos cabos isolados presentes na instalação.
- A distância entre os cabos é grande o suficiente para desprezar os efeitos de proximidade.
- Não existe qualquer outra fonte de corrente próxima da LSAT.
- Sistemas “cross-bonding” e “single-point bonding” não apresentam correntes circulantes na blindagem.

3.3 Considerações

Os estudos foram realizados para as disposições de circuitos apresentadas no item 1.5 deste documento, com variação e combinação dos seguintes parâmetros:

- espaçamento entre fases do circuito: s = [0,1; 0,25; 0,4] m
- altura do ponto de interesse em relação à superfície do solo: h = [0; 1,5] m
- profundidade da fase mais próxima da superfície: d = 1,5 m
- distância do ponto de interesse em relação ao eixo y: x = [-10; -9,...; 10] m
- distância entre circuitos: g = [0,3; 0,5; 0,75; 1] m

Os valores dos parâmetros acima adotados foram baseados em dados de linhas existentes em operação, obtidos através da consulta dos projetos de instalação.

O sistema elétrico foi suposto equilibrado e simétrico, com valor eficaz da corrente fixado em 1000 A e ângulos de fase conforme a seguinte sequência:

Fase A:	IA = módulo 1000 e ângulo 0º
Fase B:	IB = módulo 1000 e ângulo +120º
Fase C:	IC = módulo 1000 e ângulo -120º

No caso de 2 circuitos trifásicos, existem 36 combinações possíveis de permutação de fases para cada tipo de disposição dos circuitos. Os estudos contemplam apenas as permutações de fase que proporcionam maior e menor intensidade de campo.

Especificamente para circuitos aterrados pelo método “both ends bonding”, os seguintes parâmetros foram considerados:

Frequência do sistema:	60 Hz
Resistividade elétrica do solo:	100 Ω.m
Permeabilidade magnética do solo:	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m
Resistência elétrica em corrente alternada da blindagem metálica:	0,1065 Ω/km
Raio médio geométrico da blindagem metálica:	0,04 m

O valor da resistividade elétrica do solo foi baseado na norma NBR 7117 [28], considerando-se um solo úmido, com temperatura próxima de 20ºC e sem presença de sal. Já o valor da resistência elétrica adotado corresponde a uma blindagem metálica constituída de fios de cobre, com secção 200 mm² e temperatura de operação 80ºC. O valor do raio médio geométrico considerado corresponde a uma média obtida após consulta de dados construtivos de vários cabos isolados para tensões superiores a 35 kV.

3.4 Resultados e discussões

A seguir será apresentada a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha, calculada para cada disposição de circuito e considerando-se a variação dos parâmetros geométricos e elétricos descritos no item anterior. A influência destes parâmetros será discutida com base nos resultados obtidos.

3.4.1 Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana horizontal

A figura 9 apresenta a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha constituída por um circuito com disposição plana horizontal.

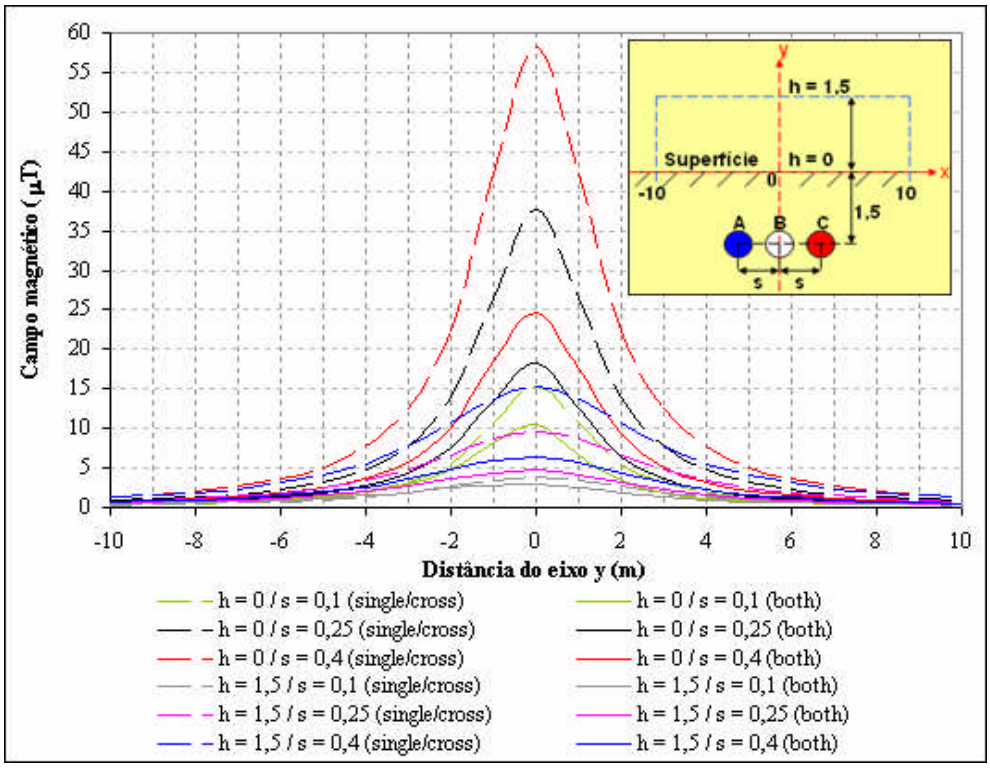

Figura 9 – Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana horizontal

De acordo com os resultados mostrados na figura 9, pode-se verificar que a redução do espaçamento entre as fases do circuito e / ou maior afastamento do circuito do ponto de interesse, contribuem para menor intensidade do campo magnético neste

ponto de interesse. Pode-se constatar que, para todos os casos estudados, a maior intensidade do campo magnético ocorre na região central acima do circuito. Em pontos laterais desta região, a intensidade do campo magnético sofre uma queda significativa.

Em relação ao método de aterramento, pode-se verificar que o aterramento tipo "both ends bonding" contribui para a redução da intensidade do campo magnético, principalmente na região central acima do circuito. Esta redução é causada pelas correntes circulantes nas blindagens dos cabos próprias deste aterramento, as quais geram campo magnético no sentido inverso ao campo magnético gerado pelas correntes dos condutores, compensando sua intensidade.

3.4.2 Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana vertical

A figura 10 apresenta a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha constituída por um circuito com disposição plana vertical.

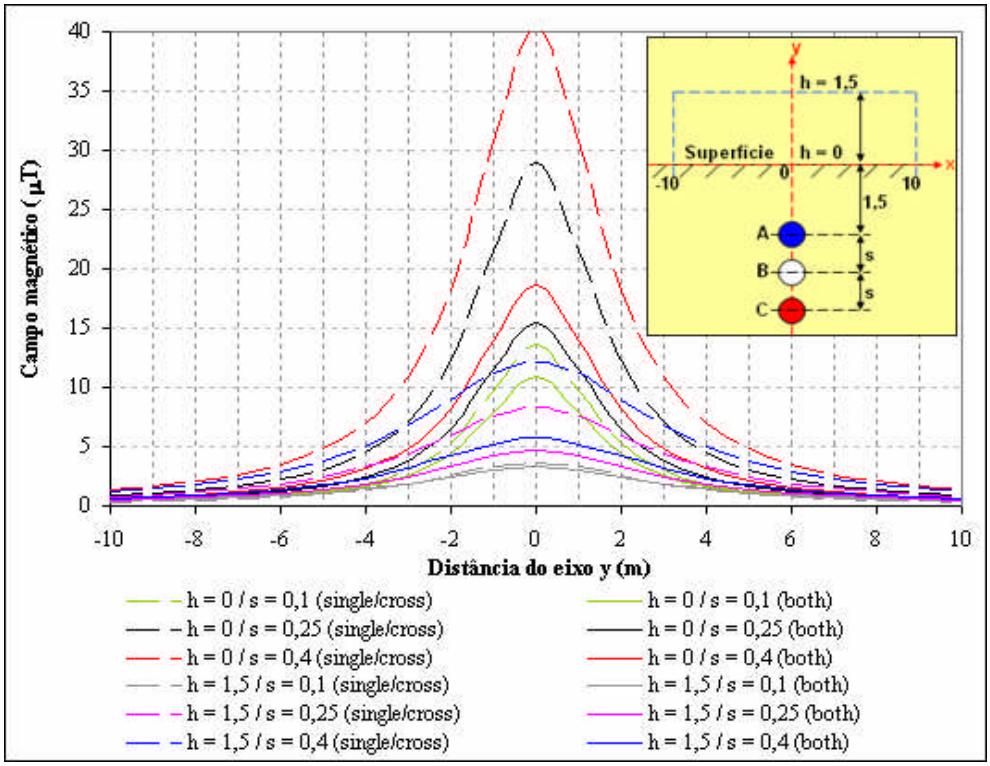

Figura 10 – Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição plana vertical

Nota-se que as observações feitas para a figura 9 também são aplicáveis à figura 10. Comparando-se estas figuras, verifica-se que a disposição plana vertical proporciona menor intensidade do campo magnético para o mesmo ponto de interesse, situado na região central e nas regiões laterais numa faixa de até três metros. Isso é devido ao fato de que nesta disposição, a fase central e a fase inferior ficam mais distantes do ponto de interesse.

3.4.3 Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição triangular

A figura 11 apresenta a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha constituída por um circuito com disposição triangular.

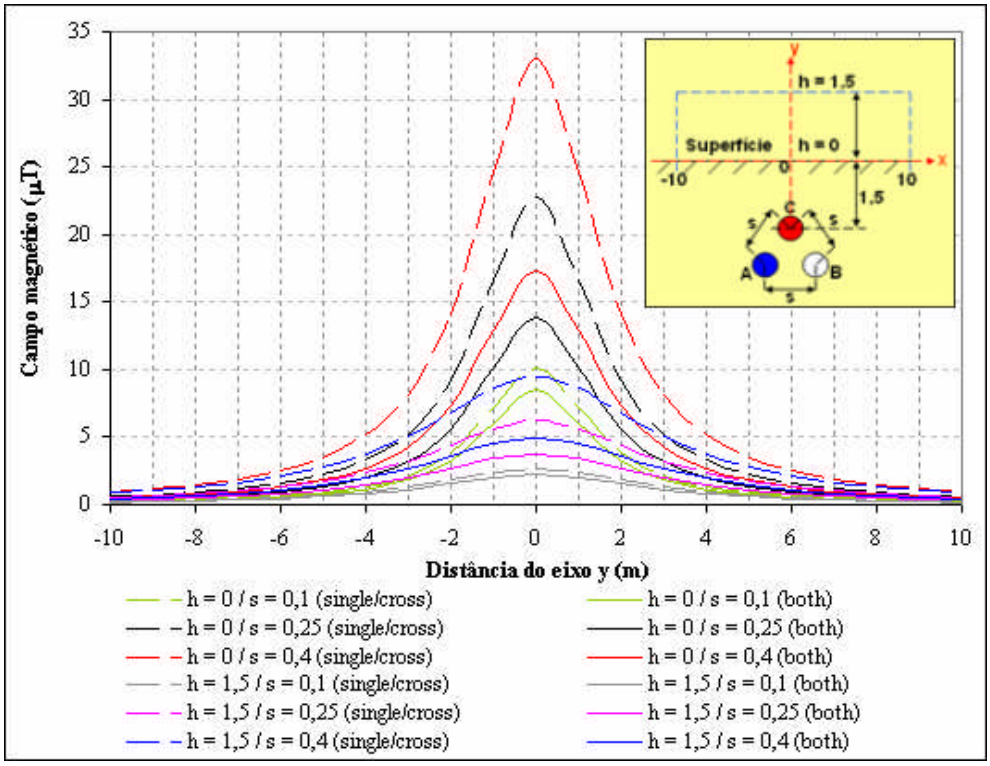

Figura 11 – Distribuição do campo magnético para um circuito com disposição triangular

Pode-se constatar que as observações feitas para a figura 9 também são válidas para a figura 11. Comparando-se esta figura com as figuras 9 e 10, pode-se verificar que a disposição triangular é a disposição que proporciona menor intensidade do campo magnético para o mesmo ponto de interesse. Isso ocorre devido à geometria

do circuito na disposição triangular ser mais concentrada. Para o caso de linhas constituídas por apenas um circuito, a instalação de cabos na disposição triangular com blindagem aterradas pelo método “both ends bonding” é a alternativa que apresenta menor intensidade de campo magnético, principalmente em pontos próximos da região central acima do circuito.

3.4.4 Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana horizontal

A figura 12 apresenta a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha constituída por dois circuitos com disposição plana horizontal.

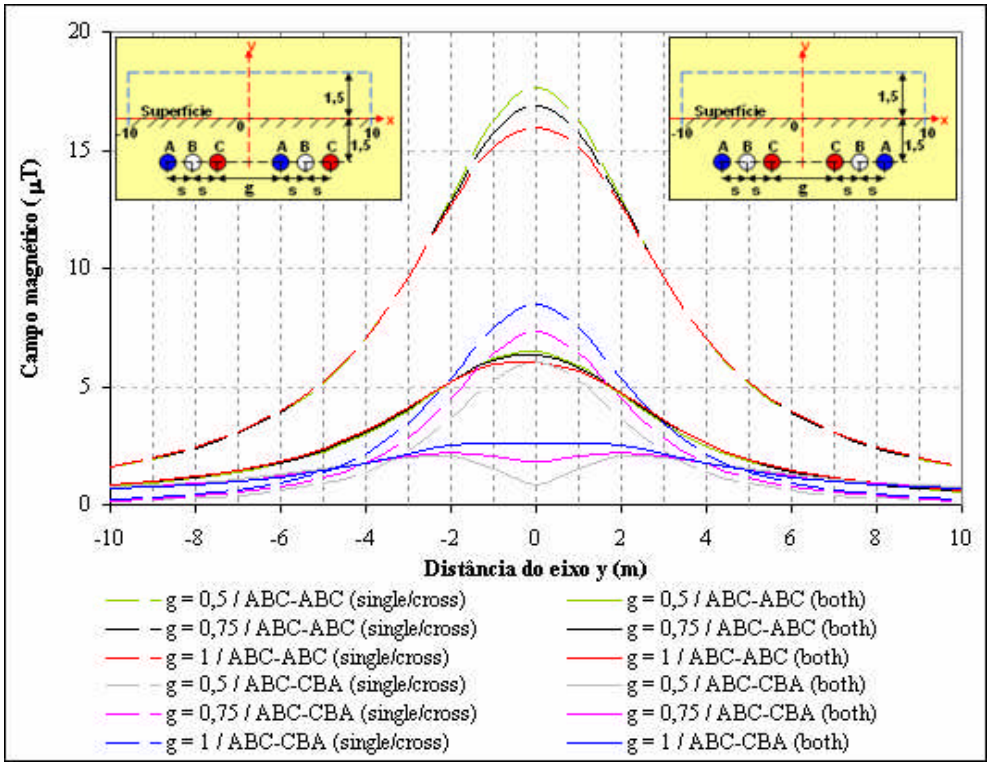

Figura 12 – Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana horizontal

Para a análise da distribuição do campo magnético para o caso de dois circuitos, o espaçamento entre fases do circuito e a altura do ponto de interesse em relação à superfície foram fixados em 0,25 m e 1,5 m respectivamente. Nesta análise, maior enfoque será dado à influência da permutação de fases e da distância entre circuitos. Verifica-se na figura 12 que a permutação de fases permite uma redução

considerável do campo magnético. Nota-se que a configuração ABC-ABC gera valores maiores de campo magnético que a configuração ABC-CBA, independente do tipo de aterramento. Através da comparação das figuras 9 e 12, pode-se verificar que o campo magnético gerado por um circuito com (s) igual a 0,25 m e (h) igual a 1,5 m, é maior que o campo magnético gerado por dois circuitos com configuração ABC-CBA. Nota-se na figura 12 que para a configuração ABC-ABC, o aumento da distância entre circuitos contribui para menores valores de campo magnético em pontos próximos da região central, sendo o inverso para a configuração ABC-CBA.

3.4.5 Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana vertical

A figura 13 apresenta a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha constituída por dois circuitos com disposição plana vertical.

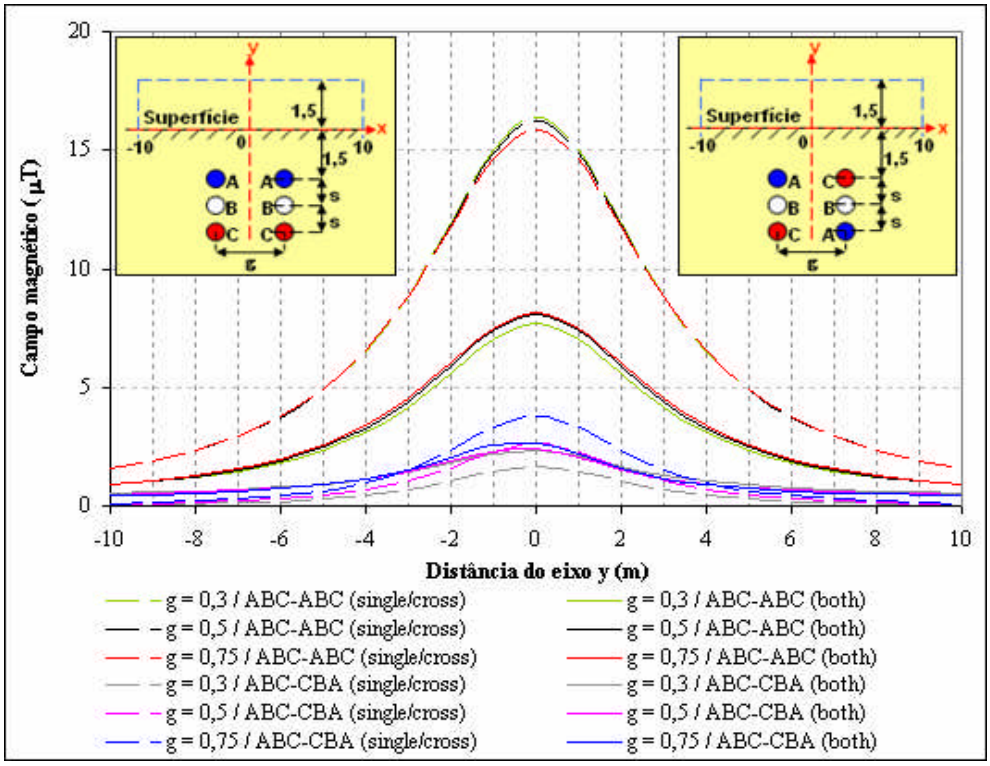

Figura 13 – Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição plana vertical

Para este caso, o espaçamento entre fases e a altura do ponto de interesse também foram considerados 0,25 m e 1,5 m respectivamente. Nota-se na figura 13 que a

permutação de fases contribui para a mitigação do campo magnético. Já a distância entre circuitos é relevante para a mitigação do campo magnético apenas para o caso de circuitos aterrados em “single/cross-bonding” e fases na configuração ABC-CBA. Comparando-se as figuras 12 e 13, e considerando-se circuitos aterrados em “single/cross-bonding”, verifica-se que os circuitos com disposição plana vertical geram valores menores de campo magnético. Já o inverso ocorre para circuitos aterrados em “both ends” com fases na configuração ABC-ABC. Através da comparação das figuras 10 e 13, nota-se que o campo magnético gerado por um circuito com (s) igual a 0,25 m e (h) igual a 1,5 m, é maior que o campo magnético gerado por dois circuitos com configuração ABC-CBA.

3.4.6 Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição triangular

A figura 14 apresenta a distribuição do campo magnético ao longo do eixo transversal da linha constituída por dois circuitos com disposição triangular.

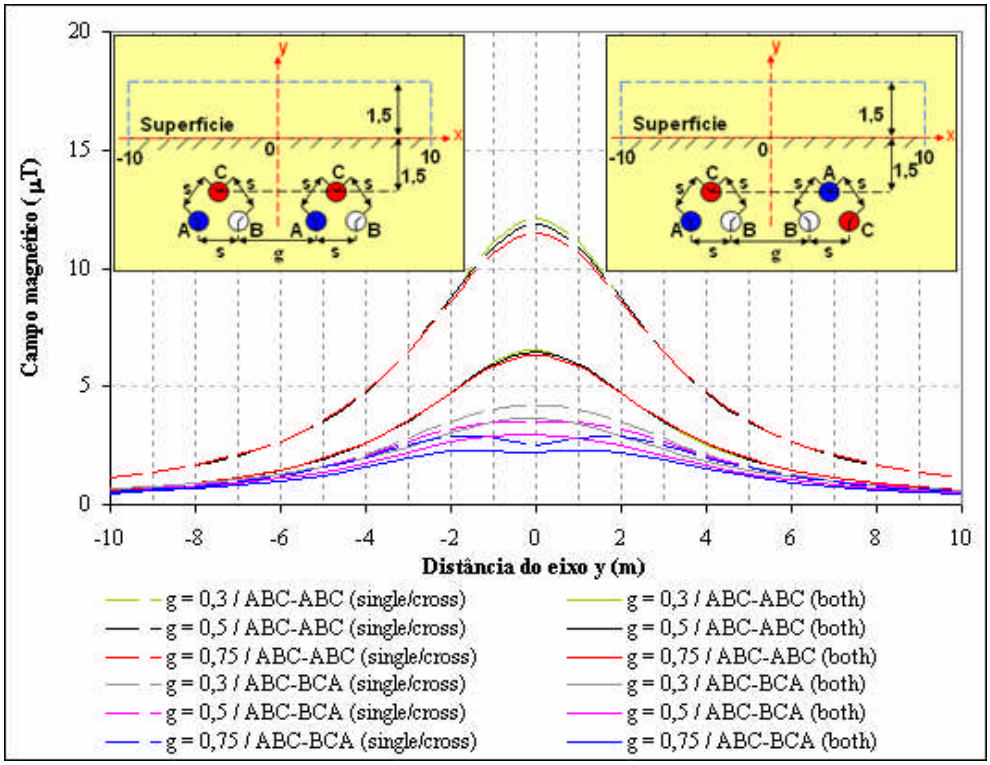

Figura 14 – Distribuição do campo magnético para dois circuitos com disposição triangular

Assim como nos casos anteriores que envolvem dois circuitos, o espaçamento entre fases e a altura do ponto de interesse também foram considerados 0,25 m e 1,5 m respectivamente, para o caso de dois circuitos com disposição triangular. Analisando-se a figura 14, pode-se verificar que a distância entre circuitos é um parâmetro irrelevante na mitigação do campo magnético para os casos que envolvem circuitos com fases permutadas na configuração ABC-ABC. Pode-se verificar nesta figura que, para os casos que envolvem circuitos com fases na configuração ABC-BCA, o aumento da distância entre circuitos contribui para maiores valores de campo magnético em pontos próximos da região central, contrariando em relação aos casos anteriores. Comparando-se a figura 14 com as figuras 12 e 13, e considerando-se a configuração ABC-ABC e aterramento tipo “single/cross-bonding”, nota-se que o campo magnético apresenta menor intensidade para circuitos com disposição triangular.

3.4.7 Picos de campo magnético em pontos laterais do centro da linha

Normalmente, a máxima intensidade de campo magnético ocorre na região central acima da LSAT. No caso de linhas constituídas por dois circuitos, dependendo da distância entre circuitos e da disposição dos cabos, o campo magnético resultante gerado ao longo da secção transversal da linha pode apresentar dois picos em pontos laterais da região central.

Como exemplo, os picos de campo magnético em pontos laterais do centro da linha podem ser visualizados na figura 12 (considerando-se o caso da distância entre circuitos 0,5 m, configuração de fases ABC-CBA e aterramento “both ends bonding”) e na figura 14 (considerando-se o caso da distância entre circuitos 0,75 m, configuração de fases ABC-BCA e aterramento “single/cross-bonding”).

4 COMPARAÇÃO ENTRE VALORES CALCULADOS E DE MEDIÇÃO

4.1 Introdução

Com o objetivo de validar a metodologia de cálculo apresentada no apêndice A, serão apresentados neste capítulo comparações entre valores calculados e de medições de campo magnético para quatro casos distintos de LSAT existentes. As medições foram realizadas seguindo-se os critérios estabelecidos na norma NBR 15415 [29]. Com exceção do caso real 4, onde a própria concessionária da linha subterrânea foi responsável pelas medições do campo magnético, as medições foram realizadas na superfície e a 1,5 m de altura desta, ao longo da secção transversal das linhas.

Em cada caso, os locais escolhidos para as medições foram definidos observando-se as premissas básicas para o cálculo analítico apresentado no apêndice A. Nestes locais, as LSAT não estão próximas de qualquer outro circuito, não há presença de materiais metálicos próximos e o trecho de rua é plano e retilíneo.

A figura 15 mostra um exemplo de medição na superfície.

Figura 15 – Medição de campo magnético na superfície

Foi utilizado um equipamento de medição calibrado, com resolução 0,01 μT, composto por 3 sondas indutivas (bobinas) e capaz de medir em tempo real os valores eficazes das 3 componentes ortogonais e do campo resultante.
A figura 16 ilustra o equipamento utilizado na campanha de medição.

Figura 16 – Equipamento de medição de campo magnético

Os dados de instalação, as características construtivas dos cabos e o tipo de aterramento foram obtidos dos projetos *conforme construído* das linhas. O sentido do fluxo de potência e os valores eficazes das correntes das fases foram informados pela concessionária responsável da linha.

4.2 Caso real 1

A linha de 88 kV é composta por 2 circuitos instalados em disposição plana vertical com aterramento “cross-bonding” e sequência de fases ABC-ABC. Os cabos apresentam condutor de secção 1600 mm² de cobre, isolação XLPE, blindagem a fios de cobre com secção 130 mm² e cobertura de PEAD. A figura 17 ilustra as características geométricas da linha e a localização dos pontos de medição.

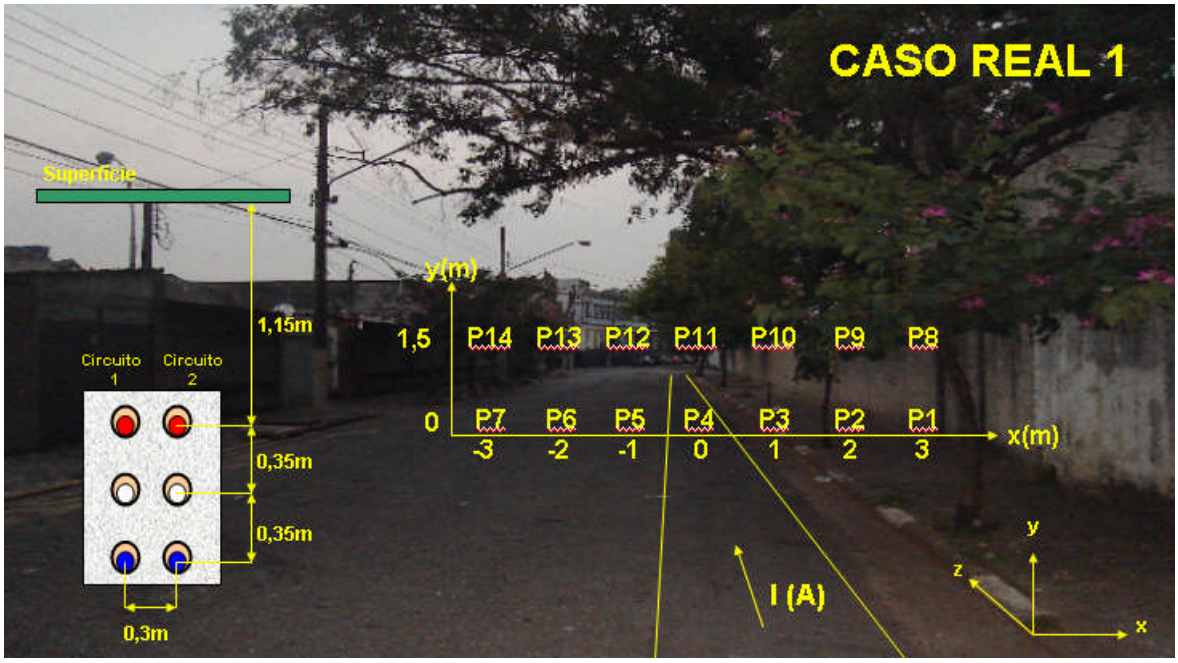

Figura 17 – Caso real 1 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição

A tabela 3 mostra os dados da medição realizada na linha. Os valores das correntes eficazes das fases foram informados pela concessionária da linha no momento da medição.

Tabela 3 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 1

Ponto de medição	Coordenada		Corrente eficaz (A) (circuito 1)			Corrente eficaz (A) (circuito 2)			Campo magnético (μT)	
	x (m)	y (m)	Fase VM	Fase BR	Fase AZ	Fase VM	Fase BR	Fase AZ	Valor de Medição	Valor calculado
P1	3	0	282	291	280	276	283	273	4,76	6,21
P2	2	0	282	289	280	278	285	275	8,72	11,13
P3	1	0	277	282	271	273	277	269	16,96	21,4
P4	0	0	270	276	269	264	270	260	25,58	29,91
P5	-1	0	274	280	272	268	270	261	19,84	21,06
P6	-2	0	275	277	269	268	273	263	8,64	10,97
P7	-3	0	272	274	270	270	276	267	4,72	6
P8	3	1,5	290	296	287	278	284	276	2,96	4,01
P9	2	1,5	285	293	282	278	287	276	4,12	5,52
P10	1	1,5	287	288	281	276	282	274	5,44	7,23
P11	0	1,5	284	291	284	278	286	275	6,02	7,82
P12	-1	1,5	282	287	277	278	285	275	5,94	7,18
P13	-2	1,5	287	290	282	282	289	279	4,28	5,67
P14	-3	1,5	283	292	282	281	286	276	3,28	4,02

A figura 18 ilustra a comparação entre os valores calculados e valores de medição do campo magnético referentes à tabela 3.

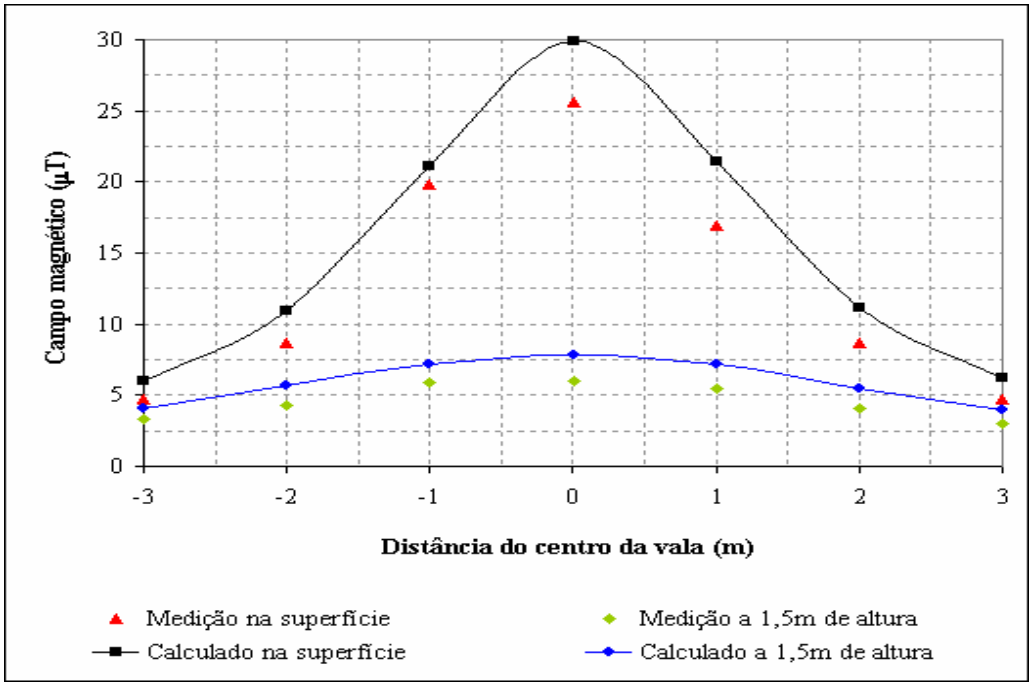

Figura 18 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 1

Nota-se que nos pontos a 1,5 m de altura em relação à superfície, os valores calculados apresentam maior concordância com os valores de medição. A maior discrepância entre estes valores ocorre em pontos na superfície e próximos da região central.

Esta discrepância entre os valores de medição e valores calculados pode estar relacionada a possíveis imprecisões entre os parâmetros de instalação da linha e os parâmetros adotados nos cálculos, além do desconhecimento dos ângulos de fases das correntes. Vale ressaltar que os cálculos foram realizados considerando-se ambos circuitos com fases defasadas de 120º entre si.

4.3 Caso real 2

A linha de 88 kV é composta por 1 circuito instalado em disposição triangular com aterramento “cross-bonding”. Os cabos apresentam condutor de secção 500 mm² de alumínio, isolação XLPE, blindagem a fios de cobre com secção 108,5 mm² e cobertura de PEAD. A figura 19 ilustra as características geométricas da linha e a localização dos pontos de medição.

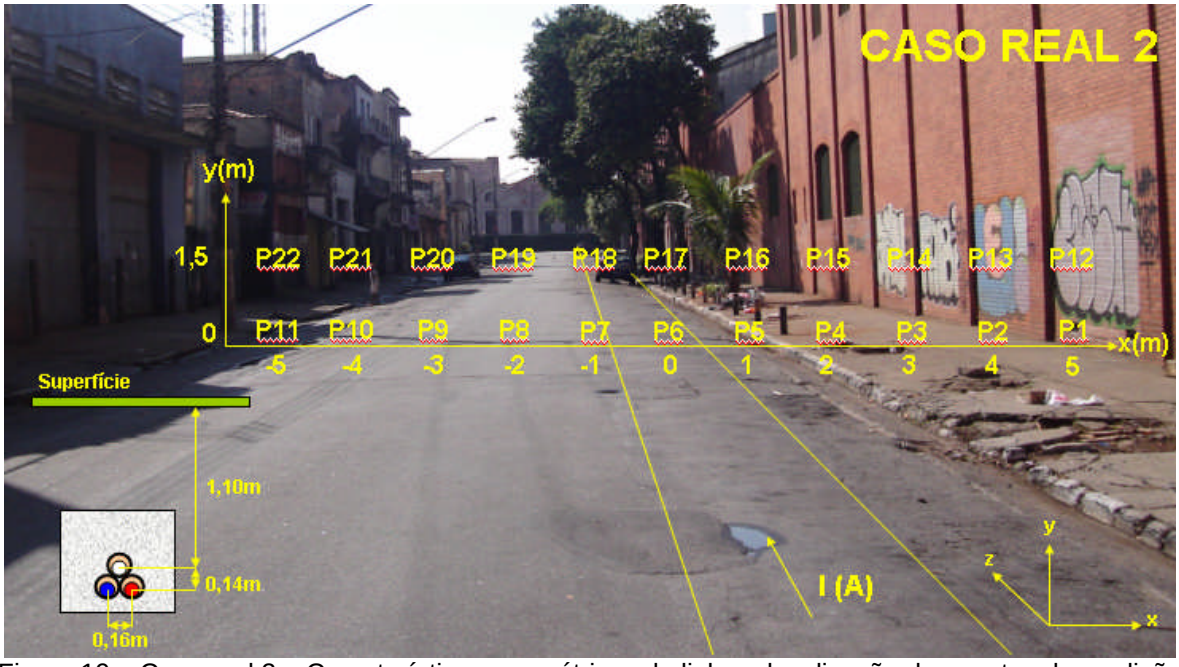

Figura 19 – Caso real 2 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição

A tabela 4 mostra os dados da medição realizada na linha. Os valores das correntes eficazes das fases foram informados pela concessionária da linha em momento posterior à medição.

Tabela 4 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 2

Ponto de medição	Coordenada		Corrente eficaz (A)			Campo magnético (μT)	
	x (m)	y (m)	Fase VM	Fase BR	Fase AZ	Valor de Medição	Valor calculado
P1	5	0	106	103	98	0,37	0,41
P2	4	0	105	100	96	0,53	0,53
P3	3	0	104	100	96	0,86	0,74
P4	2	0	104	99	95	1,54	1,16
P5	1	0	102	98	95	3,18	2,02
P6	0	0	103	98	95	3,74	2,76
P7	-1	0	103	98	94	1,92	1,37
P8	-2	0	101	97	93	0,9	0,56
P9	-3	0	100	96	93	0,52	0,3
P10	-4	0	99	95	92	0,36	0,21
P11	-5	0	99	95	92	0,28	0,16
P12	5	1,5	98	93	91	0,3	0,32
P13	4	1,5	98	93	91	0,38	0,38
P14	3	1,5	98	93	91	0,49	0,47
P15	2	1,5	98	93	91	0,63	0,58
P16	1	1,5	98	94	91	0,71	0,66
P17	0	1,5	98	94	91	0,63	0,65
P18	-1	1,5	98	94	91	0,5	0,53
P19	-2	1,5	98	94	90	0,44	0,4
P20	-3	1,5	98	94	90	0,38	0,29
P21	-4	1,5	98	94	90	0,34	0,24
P22	-5	1,5	98	94	89	0,3	0,21

A figura 20 mostra a comparação entre os valores calculados e os valores de medição do campo magnético referentes à tabela 4.

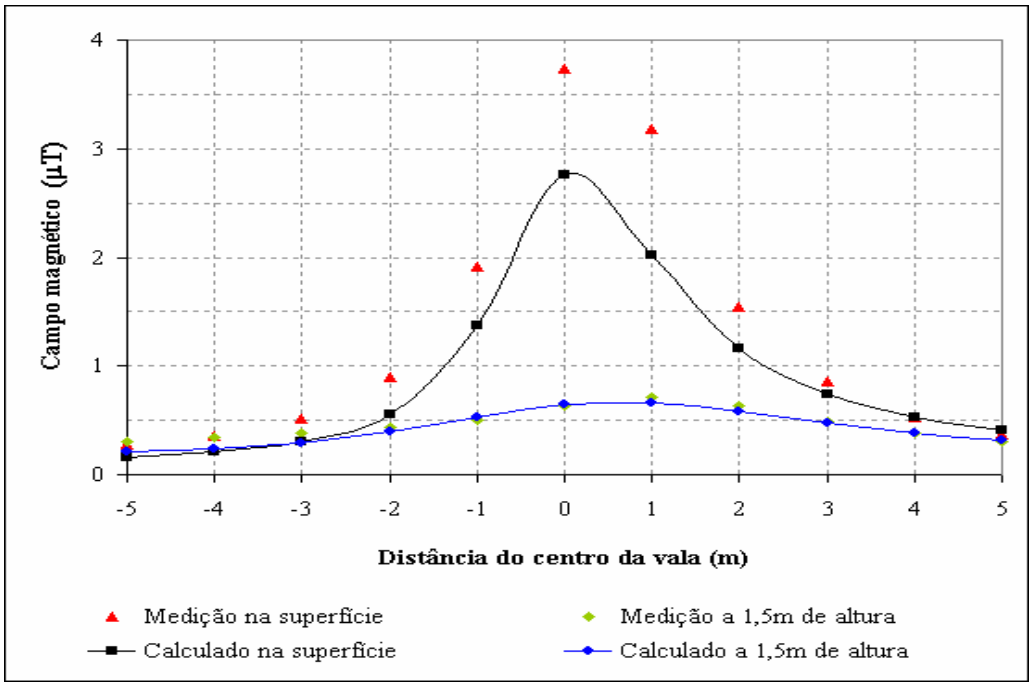

Figura 20 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 2

Neste caso pode-se observar uma maior proximidade entre os valores calculados e valores de medição nos pontos a 1,5 m de altura e nos pontos distantes do centro da vala. A maior discrepância entre os valores ocorre nos pontos na superfície e próximos ao centro da vala. Nestes pontos, há uma maior sensibilidade com relação a qualquer imprecisão entre os parâmetros de instalação adotados nos cálculos e os parâmetros reais.

4.4 Caso real 3

A linha de 88 kV é composta por 1 circuito instalado em disposição triangular com aterramento “both ends bonding”. Os cabos apresentam condutor de secção 400 mm² de cobre, isolação XLPE, blindagem de fios de cobre de secção 100 mm² e raio médio de 0,034 m e cobertura de PEAD. A figura 21 ilustra as características geométricas da linha e a localização dos pontos de medição.

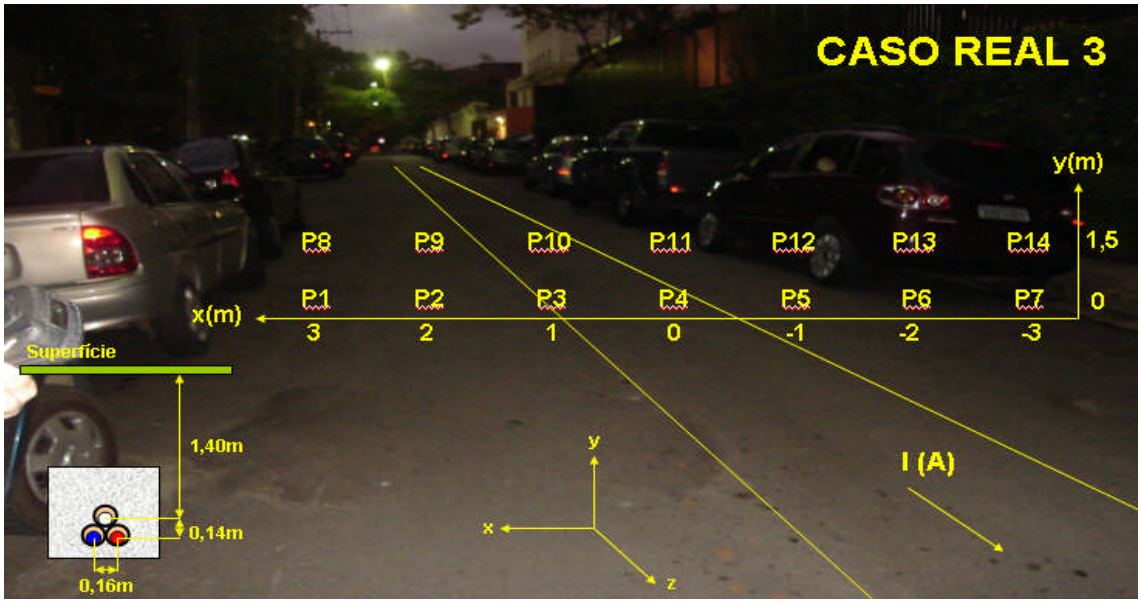

Figura 21 – Caso real 3 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição

A tabela 5 mostra os dados da medição realizada na linha. Os valores das correntes eficazes das fases foram informados pela concessionária da linha em momento posterior à medição. A temperatura de operação e a resistência em corrente alternada da blindagem dos cabos foram determinadas com base em [7] e [8], a partir das correntes circulantes nos condutores. Para isso, a temperatura e a resistividade térmica do solo foram consideradas 20°C e 1 K.m/W respectivamente. Nestas condições a resistência da blindagem é de 0,195 Ω/km para uma temperatura de operação de 35ºC. A resistividade elétrica do solo local foi considerada 100 Ω.m.

Tabela 5 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 3

Ponto de medição	Coordenada		Corrente eficaz (A)			Campo magnético (μT)	
	x (m)	y (m)	Fase VM	Fase BR	Fase AZ	Valor de Medição	Valor calculado
P1	3	0	317	335	316	0,92	0,95
P2	2	0	317	334	315	1,42	1,74
P3	1	0	317	334	315	2,38	3,40
P4	0	0	317	334	315	3,44	5
P5	-1	0	317	333	314	2,88	3,48
P6	-2	0	316	332	314	1,60	1,82
P7	-3	1,5	316	331	313	0,88	1,02
P8	3	1,5	316	331	313	0,52	0,61
P9	2	1,5	316	332	314	0,68	0,85
P10	1	1,5	316	333	314	0,73	1,13
P11	0	1,5	317	334	315	0,79	1,27
P12	-1	1,5	317	335	316	0,72	1,16
P13	-2	1,5	317	335	316	0,60	0,91
P14	-3	1,5	317	335	316	0,50	0,66

A figura 22 ilustra a comparação entre os valores calculados e de medição do campo magnético referentes à tabela 5.

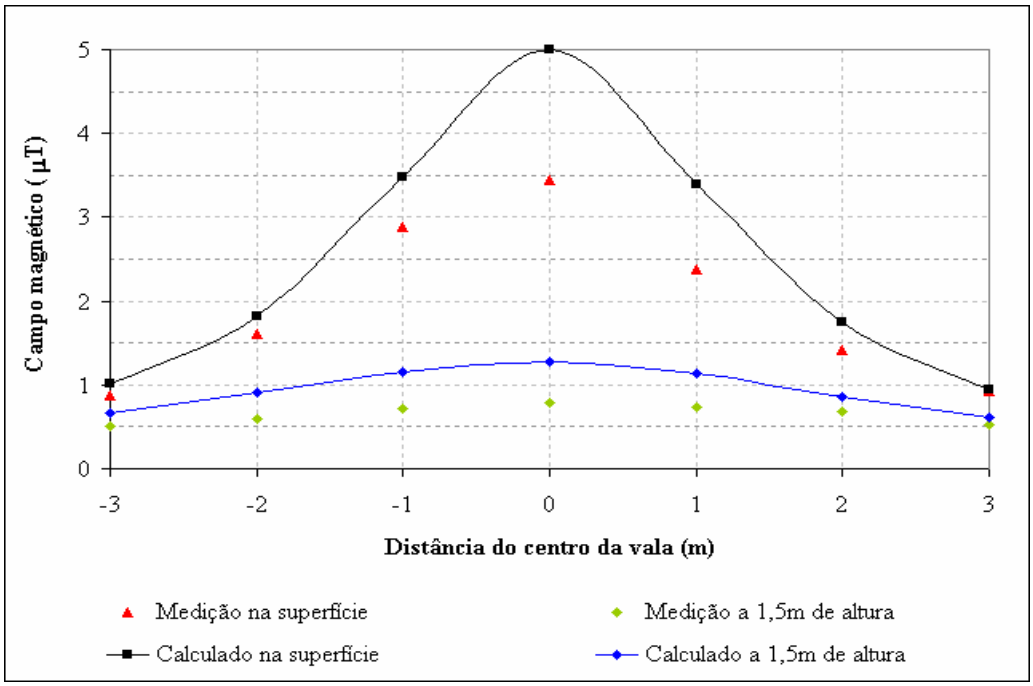

Figura 22 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 3

Assim como nos casos anteriores, a maior proximidade entre os valores calculados e os valores de medição ocorre em pontos distantes do centro e a 1,5 m de altura.

Como o campo magnético varia sensivelmente com a variação dos parâmetros de instalação, a discrepância entre os valores de medição e valores calculados pode estar relacionada a possíveis imprecisões entre os parâmetros reais e os parâmetros adotados nos cálculos.

4.5 Caso real 4

Para este caso, a medição de campo magnético foi realizada pela concessionária da linha. A linha de 138 kV é composta por 2 circuitos instalados em disposição plana vertical com aterramento “both ends bonding”. Os cabos apresentam condutor de secção 500 mm² de alumínio, isolação XLPE, blindagem de fios de cobre de secção 41,8 mm² e raio médio de 0,039 m e cobertura de PEAD. A figura 23 ilustra as características geométricas da linha e a localização dos pontos de medição.

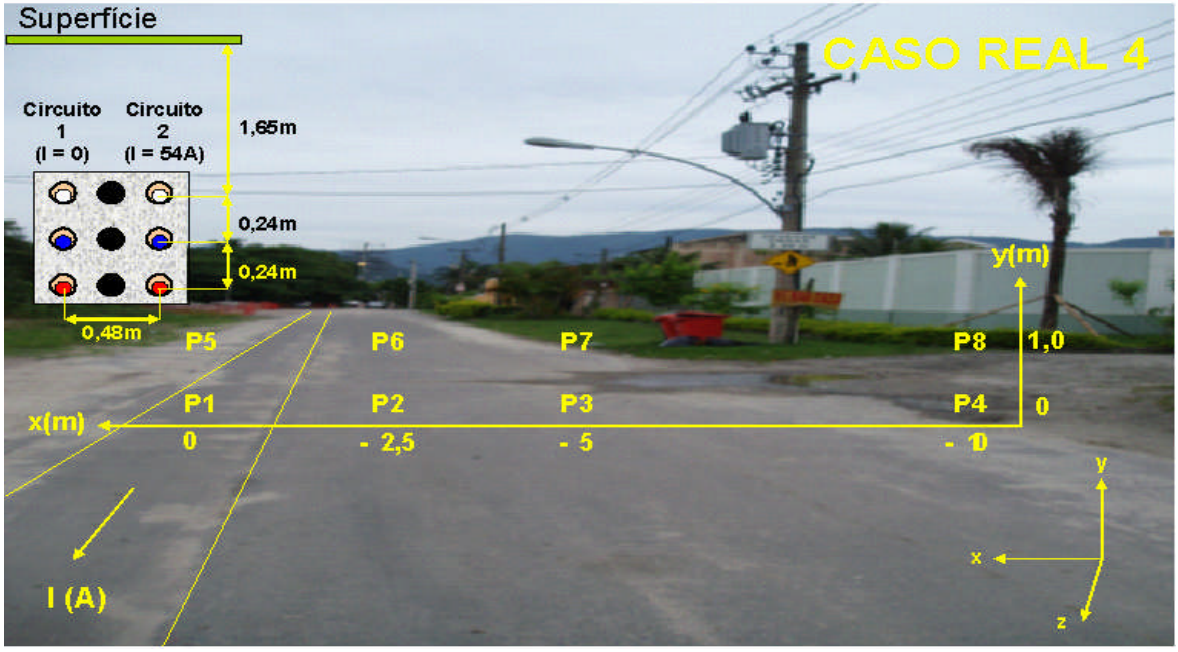

Figura 23 – Caso real 4 – Características geométricas da linha e localização dos pontos de medição

A tabela 6 mostra os dados da medição realizada na linha. Apenas o circuito 2 encontrava-se em operação durante as medições de campo magnético. A temperatura de operação e a resistência em corrente alternada da blindagem dos cabos foram determinadas com base em [7] e [8], a partir das correntes circulantes nos condutores. Para isso, a temperatura e a resistividade do solo foram consideradas 20°C e 1 K.m/W respectivamente. Nestas condições a resistência da blindagem é de 0,452 Ω/km para uma temperatura de operação de 26ºC. A resistividade elétrica do solo local foi considerada 26,74 Ω.m. Este valor foi obtido de relatório de medição realizada no solo durante a instalação da linha.

Tabela 6 – Valores de medição e valores calculados de campo magnético para o caso real 4

Ponto de medição	Coordenada		Corrente eficaz (A)			Campo magnético (μT)	
	x (m)	y (m)	Fase VM	Fase BR	Fase AZ	Valor de Medição	Valor calculado
P1	0	0	54	54	54	1,2	1,1
P2	-2,5	0	54	54	54	0,47	0,46
P3	-5	0	54	54	54	0,17	0,16
P4	-10	0	54	54	54	0,05	0,05
P5	0	1	54	54	54	0,6	0,46
P6	-2,5	1	54	54	54	0,34	0,29
P7	-5	1	54	54	54	0,17	0,13
P8	-10	1	54	54	54	0,05	0,05

A figura 24 mostra a comparação entre os valores calculados e valores de medição do campo magnético referentes à tabela 6.

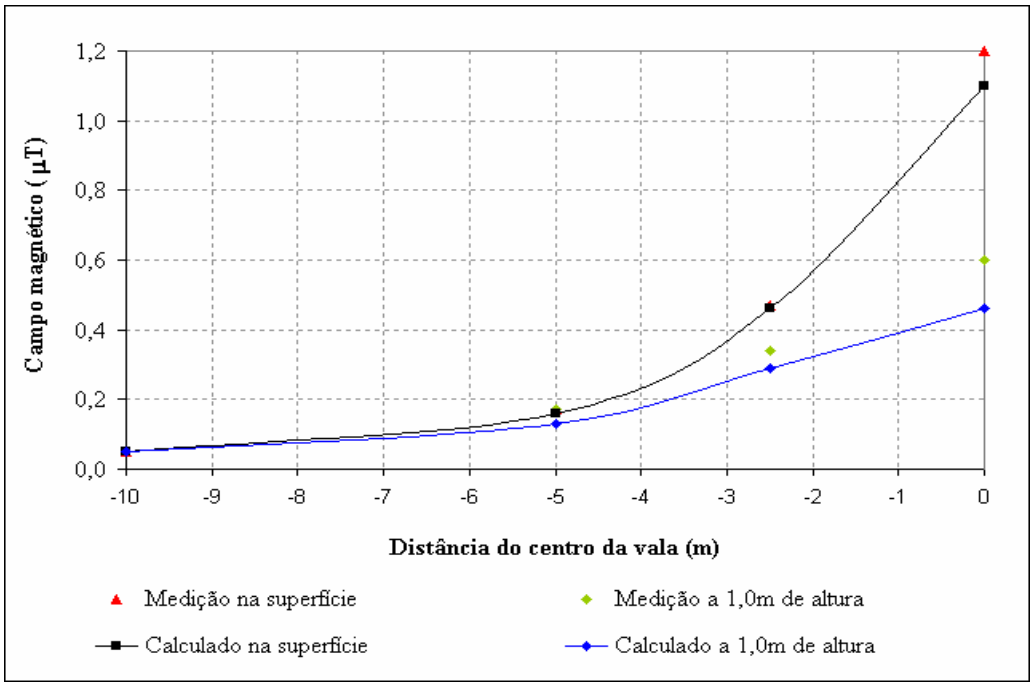

Figura 24 – Comparação gráfica entre valores calculados e valores de medição de campo magnético para o caso real 4

Pode-se verificar que o aumento da distância entre os pontos de interesse e os cabos tende a contribuir para a aproximação dos resultados calculados e de medição. Assim como no caso real 2, verifica-se também para este caso que para distâncias maiores que 4 m em relação ao centro, praticamente não há diferenças entre os valores calculados e de medição, tanto para pontos a 1,5 m de altura quanto pontos na superfície.

Verifica-se que a maior discrepância entre valores de medição e valores calculados ocorre novamente em pontos localizados no centro. Tal fato é atribuído a possíveis imprecisões nos parâmetros de instalação ou na localização dos pontos de medição.

5 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO PARA LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO

5.1 Introdução

De acordo com os princípios gerais do eletromagnetismo, um meio direto e lógico de reduzir o valor de campo magnético de uma determinada fonte é reduzir o valor da corrente da mesma. Por exemplo, a elevação da tensão de uma LTA permite a redução do valor da corrente, desde que mantida a mesma potência de transmissão. Apesar de ser tecnicamente factível, esta solução é descartada numa primeira fase de projeto de mitigação devido aos custos elevados envolvidos. Diante deste fato, torna-se mais interessante à procura por soluções eficazes de mitigação, que envolvam baixo custo de implantação e causam mínimo impacto no serviço de operação da linha.

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas de mitigação do campo magnético relacionadas para LSAT. Serão abordados de uma forma geral seus fundamentos e os parâmetros que, para cada técnica, têm uma influência relevante na eficácia da mitigação. Também serão apresentados exemplos reais de aplicação de cada técnica e os possíveis impactos nas condições de serviço de operação das LSAT.

As técnicas foram escolhidas em três grupos diferentes: ***técnica de compensação, técnica de mitigação com materiais ferromagnéticos e técnica de mitigação com materiais condutivos***.

5.2 Técnica de compensação

A técnica de compensação consiste em utilizar um ou mais cabos isolados de baixa tensão curto-circuitados em forma de laços, devidamente posicionados e dimensionados para obter maior eficiência na mitigação do campo magnético da

LSAT. Esta mitigação depende da corrente circulante nos laços, a qual, segundo a Lei de Lenz, gera fluxo magnético no sentido inverso ao fluxo magnético gerado pela LSAT, compensando assim seu efeito. Através da compensação entre os fluxos magnéticos ocorre a redução do campo magnético do sistema.

A técnica de compensação pode ser do tipo passiva ou ativa. A diferença básica entre elas está na forma de se obter a corrente circulante nos laços. A seguir serão apresentadas as características de ambas as técnicas, com destaque para os parâmetros que contribuem para o aumento da eficiência na mitigação do campo magnético.

5.2.1 Técnica de compensação passiva

Na técnica de compensação passiva, a corrente circulante nos laços é obtida segundo a Lei da indução de Faraday. O campo magnético variável gerado pelas correntes da LSAT induz uma FEM nos laços. Esta FEM, aliada ao circuito fechado formado pelos laços, provoca a circulação de corrente nos mesmos. A figura 25 representa de forma simplificada o conceito da técnica de compensação passiva.

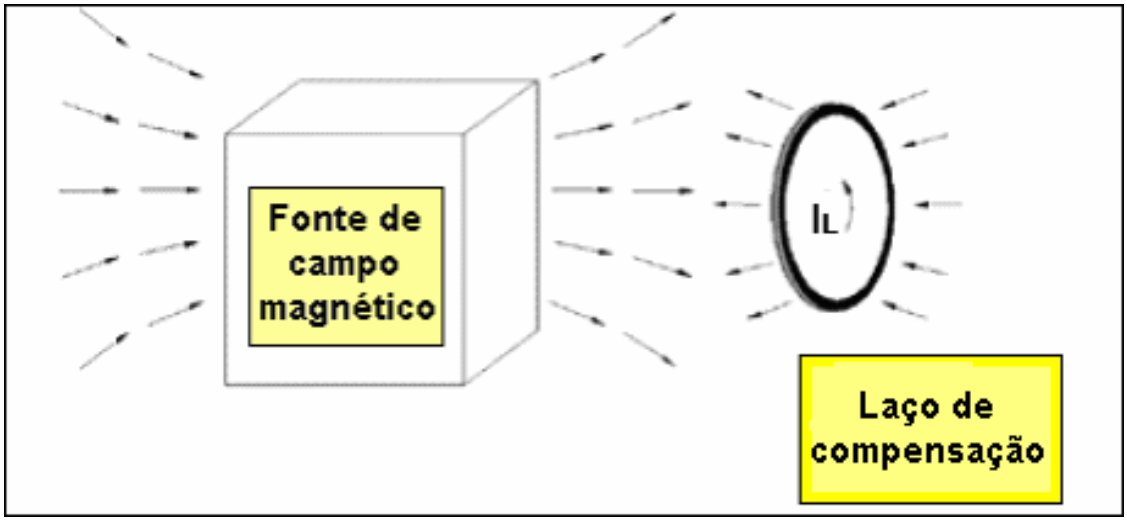

Figura 25 – Compensação passiva de campo magnético

A eficiência desta técnica na mitigação do campo magnético da LSAT depende da combinação de parâmetros geométricos e elétricos relacionados aos laços. Esses parâmetros serão a seguir discutidos separadamente.

Geometria dos laços: os laços geralmente apresentam uma geometria retangular, com dimensões definidas em função da largura e comprimento da vala projetada para a instalação dos cabos isolados da LSAT.

Número de laços: quanto maior for o número de laços presentes na instalação, menor será a intensidade do campo magnético no ponto de interesse. Para isso, estes laços devem ser adequadamente posicionados e espaçados entre si.

Posicionamento dos laços: os laços são normalmente posicionados no mesmo nível e acima dos cabos do circuito da LSAT. Tais posições visam atenuar a intensidade do campo magnético nas regiões próximas ao circuito da LSAT e nas regiões próximas à superfície do solo. Além disso, o posicionamento dos laços leva em consideração aspectos como a influência térmica sobre os cabos da LSAT e a disposição do circuito da mesma. Por exemplo, a figura 26 ilustra o posicionamento dos laços para uma LSAT composta por um circuito com disposição triangular e para uma LSAT composta por um circuito com disposição plana horizontal. Nota-se que o posicionamento dos laços apresenta estrutura semelhante à disposição do circuito.

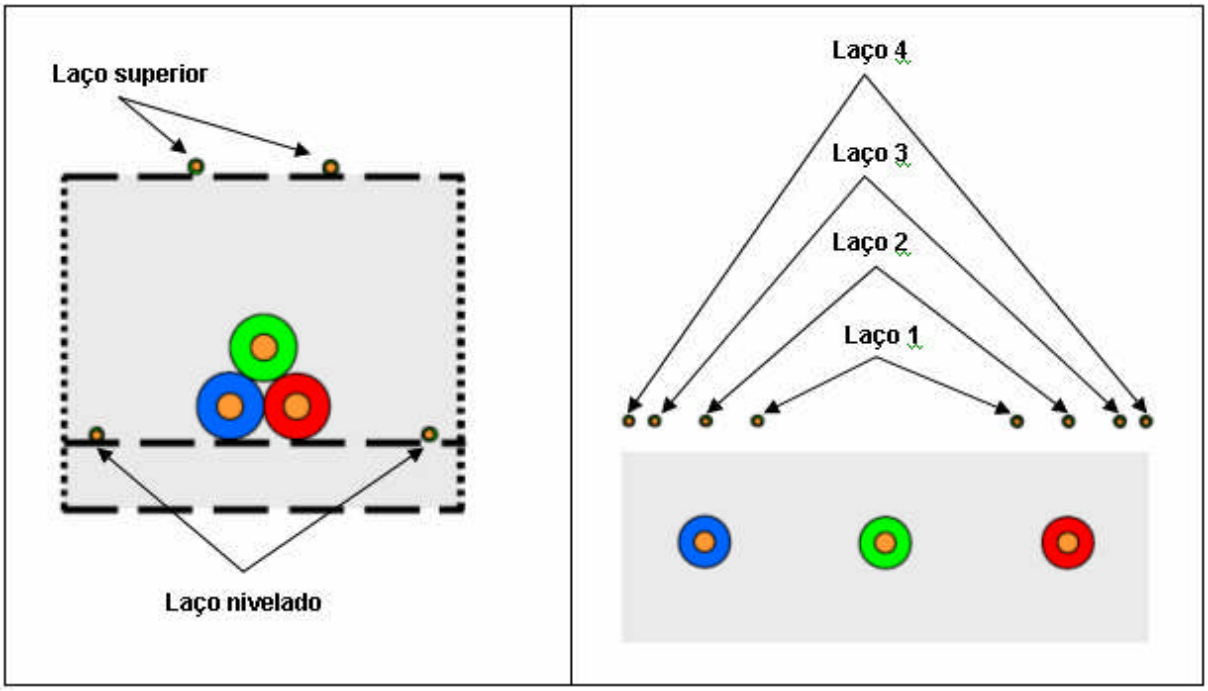

Figura 26 – Exemplos de posicionamento de laços para linhas compostas por circuito com disposição triangular e disposição plana horizontal.

Características elétricas dos laços: A corrente circulante nos laços é dependente da resistência e da reatância indutiva dos cabos dos laços. De uma maneira geral, quanto menor for o valor da resistência dos cabos dos laços, maior será a corrente

circulante nos mesmos e, consequentemente, maior será a atenuação do campo magnético no ponto de interesse.

A minimização da reatância indutiva também contribui para a redução da intensidade do campo magnético. Uma das possíveis soluções para minimizar a reatância indutiva é utilizar capacitores conectados em série com os laços.

5.2.2 Técnica de compensação ativa

Para os casos onde a compensação passiva não satisfaz as condições necessárias com relação à intensidade do campo magnético resultante em uma determinada região de interesse, há a possibilidade da utilização da técnica de compensação ativa. Nesta técnica, a corrente circulante no laço é aplicada através de um sistema de controle dedicado para obter a maior eficiência na mitigação do campo magnético. Esse sistema calcula a magnitude e o ângulo de fase da corrente de maneira a garantir um maior fator de redução do campo magnético em função da variação da corrente da LSAT.

A figura 27 ilustra de forma simplificada os principais componentes presentes na técnica de compensação ativa.

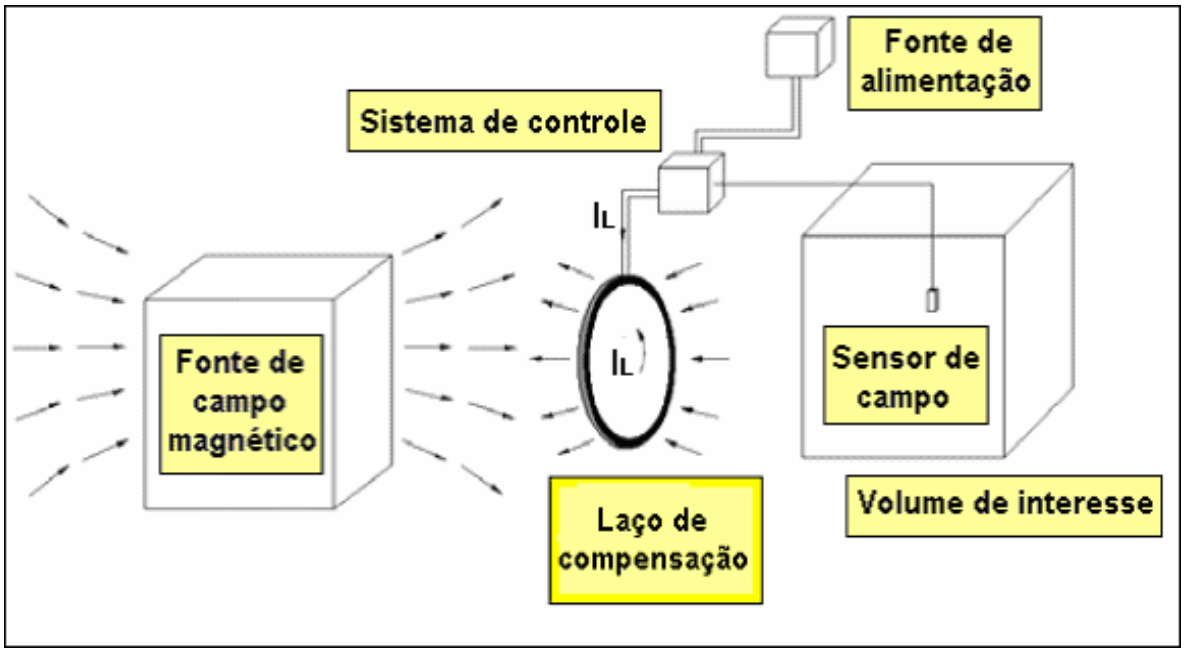

Figura 27 – Compensação ativa de campo magnético.

Comparando-se as técnicas de compensação passiva e ativa, podem-se destacar as seguintes vantagens e desvantagens:

- Na técnica de compensação ativa, o posicionamento do laço é um parâmetro menos relevante se comparado à técnica de compensação passiva, já que a corrente circulante do laço não depende do fluxo magnético gerado pelas correntes dos cabos da LSAT. Além disso, na técnica de compensação ativa, não há necessidade de vários laços para assegurar maior eficiência na mitigação do campo magnético da LSAT.
- A técnica de compensação ativa permite maior atenuação do campo magnético da LSAT, já que a corrente circulante no laço é calculada e aplicada através de um sistema de controle dedicado para este fim. Entretanto, deve-se optar pela utilização de cabos de maior secção transversal para possibilitar a aplicação de corrente de maior intensidade no laço, visando não só a maior mitigação do campo, mas também, o menor aquecimento devido perdas por calor (perdas joule).
- A eficiência na mitigação do campo magnético não depende diretamente de parâmetros como resistência e reatância indutiva do cabo do laço na técnica de compensação ativa.
- Na técnica de compensação ativa são necessários sofisticados equipamentos para aplicação da corrente no laço, o que representa elevado custo de implantação e manutenção. Além disso, possíveis desgastes ou falhas nos equipamentos do sistema de controle ao longo da vida útil diminuem a confiabilidade desta técnica.

5.2.3 Impacto da técnica de compensação na operação da linha subterrânea de alta tensão

A técnica de compensação pode impactar eletricamente e termicamente na operação da LSAT. Devido ao posicionamento dos laços de compensação ser assimétrico em relação a cada cabo da LSAT, pode ocorrer um desequilíbrio no transporte da corrente pelas fases do circuito da mesma. Além disso, as perdas por

calor geradas pela circulação de corrente nos laços de compensação causam um aumento da temperatura da região ao redor dos laços. Esse aumento da temperatura contribui para uma redução da capacidade de condução de corrente dos cabos da LSAT. Para evitar ou minimizar este problema, recomenda-se a utilização de cabos com maior secção de condutor nos laços de compensação.

5.2.4 Exemplo de aplicação

No caso de LSAT, a técnica de compensação passiva é geralmente aplicada nos pontos de emendas de cabos. Nestes pontos, os cabos da linha encontram-se mais espaçados, o que naturalmente contribui para o aumento do campo magnético.

O exemplo a seguir mostra a aplicação desta técnica nas caixas de emendas de uma linha subterrânea de 400 kV instalada em Viena (Áustria) no ano de 2005 [20],[25]. De acordo com as autoridades locais, o nível máximo de campo magnético na superfície do solo é 15 μT. As emendas de cabos foram dispostas nas caixas em disposição plana horizontal, com espaçamento entre centros de 300 mm e altura do piso de 250 mm. Nestas condições, a corrente nominal de 1500 A gera um campo magnético maior que 22 μT no nível do solo.

Com o objetivo de reduzir a intensidade do campo magnético, foram instalados dois laços constituídos de cabos 300 mm² de cobre com classe de tensão 0,6/1 kV.

A figura 28 ilustra a caixa de emendas com a posição dos laços de compensação.

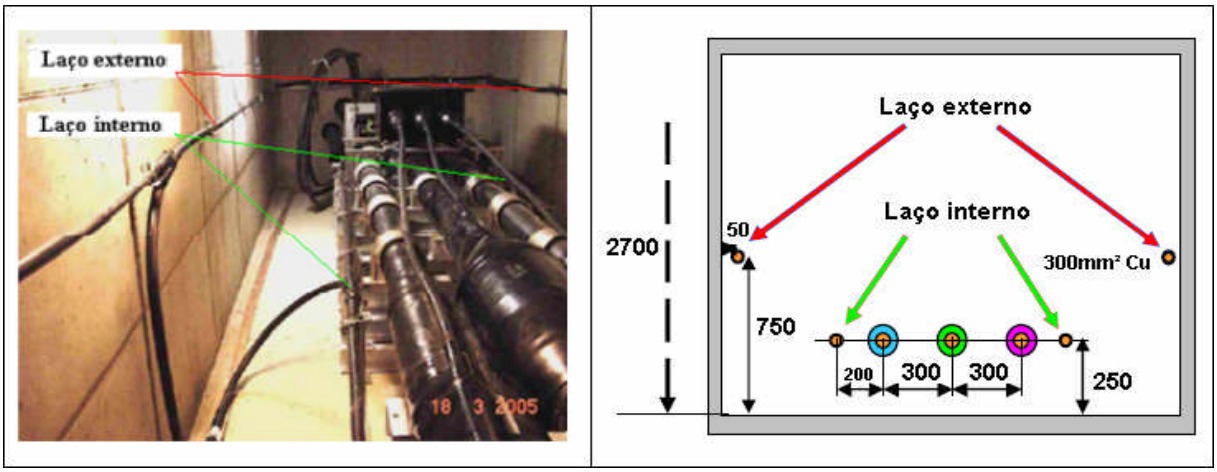

Figura 28 – Caixa de emendas com a posição dos laços de compensação.

A secção do condutor de 300 mm² é a secção ótima que permite a atenuação do campo magnético no nível de exposição exigido, considerando-se a presença dos dois laços. Ambos os laços são aterrados e suas conexões são protegidas com capas de borracha contraídas por aquecimento. As perdas nos laços não influenciam termicamente para a redução da capacidade de corrente dos cabos da linha, pois não são suficientes para aquecer o ar interno das caixas de emendas.

Os valores das medições de campo magnético realizadas nas caixas de emendas resultaram abaixo do limite especificado para a linha, como mostra a figura 29.

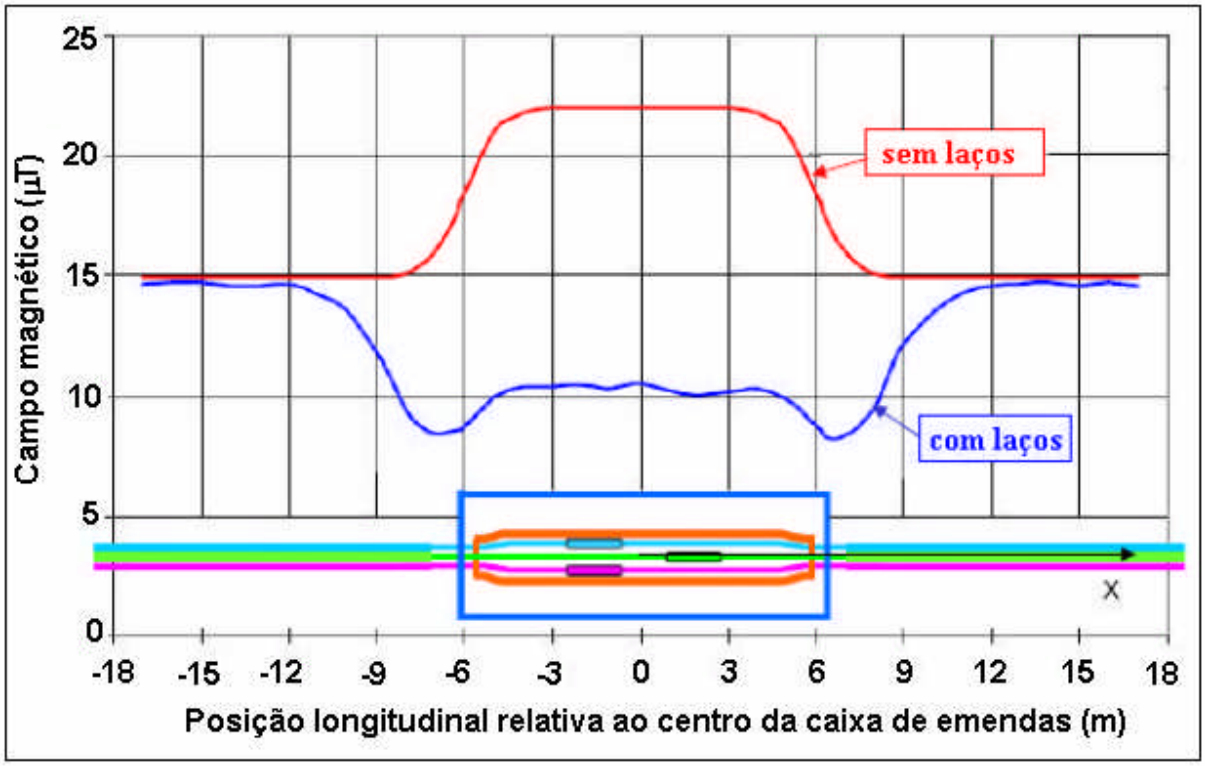

Figura 29 – Perfil do campo magnético eficaz ao longo do eixo transversal dos cabos, incluindo a caixa de emendas com os laços passivos

Com a técnica adotada, o campo magnético foi atenuado em aproximadamente duas vezes em relação ao valor sem a presença dos laços, ficando abaixo do limite de 15 μT exigido pela legislação local. Para a corrente de 1500 A nos cabos isolados 400 kV, foi registrada uma corrente de 337 A no laço interno e 86 A no laço externo. Embora os valores das correntes dos laços sejam diferentes, o mesmo cabo foi utilizado para ambos os laços devido a razões práticas de fabricação e instalação.

5.3 Técnica de mitigação com materiais ferromagnéticos (blindagem ferromagnética)

Esta técnica de mitigação consiste em utilizar materiais ferromagnéticos para alterar a distribuição espacial do campo magnético entre a fonte geradora e a área de interesse. Quando um material ferromagnético puro e com permeabilidade magnética "μ" é exposto no ar sobre a influência de uma determinada fonte, duas condições definem a conduta da intensidade do campo magnético (H) e da densidade de fluxo magnético (B) na superfície do material (se não houver corrente na superfície):

- De acordo com a Lei de Ampére, a componente tangencial da intensidade do campo magnético (H) deve ser contínua em toda a interface;
- Segundo a Lei de Gauss para o fluxo magnético, a componente normal da densidade de fluxo magnético (B) deve ser contínua em toda a interface;

Em função da grande diferença entre a permeabilidade magnética do material e do ar, tanto a intensidade do campo magnético (H) quanto a densidade de fluxo magnético (B) mudam de direção ao atingir a superfície do material, de forma a satisfazer simultaneamente às condições acima citadas.

A figura 30 ilustra as linhas de campo numa placa de material magnético sobre a influência de uma fonte geradora (bobina). Pode-se verificar que estas linhas mudam repentinamente de direção após atingir a interface ar-material magnético, ficando aproximadamente tangentes à superfície interna do material.

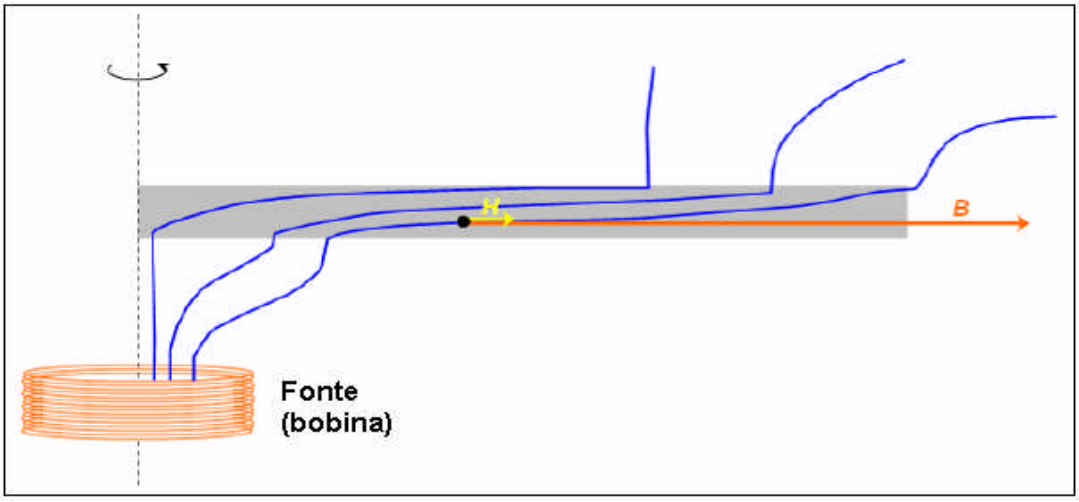

Figura 30 – Linhas de campo numa placa de material magnético sobre influência de uma fonte de campo magnético (bobina)

O mecanismo de atração e absorção das linhas de campo por parte do material magnético também é conhecido como blindagem magnetostática. A figura 31 mostra este fenômeno físico em função da geometria do material de blindagem e da localização da fonte.

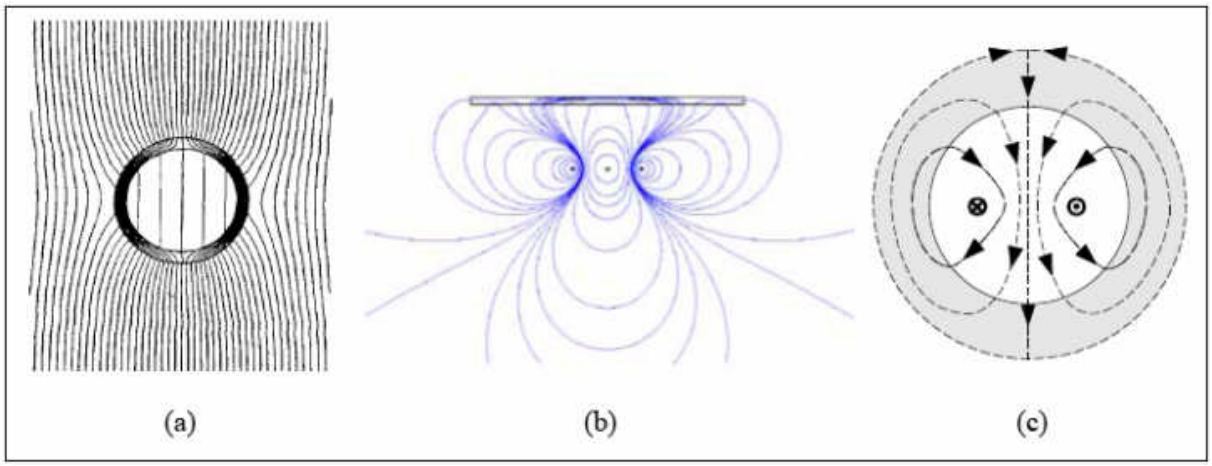

Figura 31 – Distribuição de linhas de campo magnético na presença de blindagens ferromagnéticas. (a) blindagem com geometria fechada e fonte externa. (b) blindagem com geometria aberta. (c) blindagem com geometria fechada envolvendo a fonte.

A quantidade de linhas de campo que são atraídas e absorvidas depende da permeabilidade magnética relativa e das dimensões da blindagem ferromagnética. Vale ressaltar que os materiais ferromagnéticos também apresentam condutividade elétrica e, portanto, correntes parasitas podem ser induzidas nos mesmos. Estas correntes parasitas podem contribuir para o aumento da eficiência das blindagens ferromagnéticas na mitigação do campo magnético. O mecanismo de blindagem através de correntes parasitas induzidas será posteriormente apresentado para o caso de blindagens constituídas por materiais condutivos.

A seguir serão apresentadas as principais características de blindagens ferromagnéticas de geometria fechada e aberta.

5.3.1 Blindagem ferromagnética de geometria fechada

No caso de LSAT, as blindagens ferromagnéticas de geometria fechada envolvem completamente os cabos do circuito, fornecendo assim um circuito magnético fechado para as linhas de campo geradas pelos mesmos.

De acordo com [16], [18], [19], [22], [23], [24] e [25], a blindagem ferromagnética de geometria fechada é a alternativa que proporciona maior redução da intensidade do campo magnético. Sua aplicação é justificada em LSAT que atravessam por locais onde são exigidos níveis muito baixos de exposição ao campo magnético, os quais não são possíveis de se obter com outras técnicas de mitigação.

Atualmente, tubos e “raceways” (peças ferromagnéticas moldadas em forma de “U” e complementadas com tampa de mesmo material) são utilizados como blindagem ferromagnética de geometria fechada.

5.3.1.1 Tubos ferromagnéticos

Os parâmetros que controlam a eficiência da blindagem ferromagnética constituída por tubos ferromagnéticos são as dimensões do tubo, a permeabilidade magnética do material utilizado e o contato entre os tubos ao longo do eixo longitudinal da LSAT. A figura 32 mostra a secção transversal de um tubo e o perfil longitudinal com detalhe do contato entre tubos.

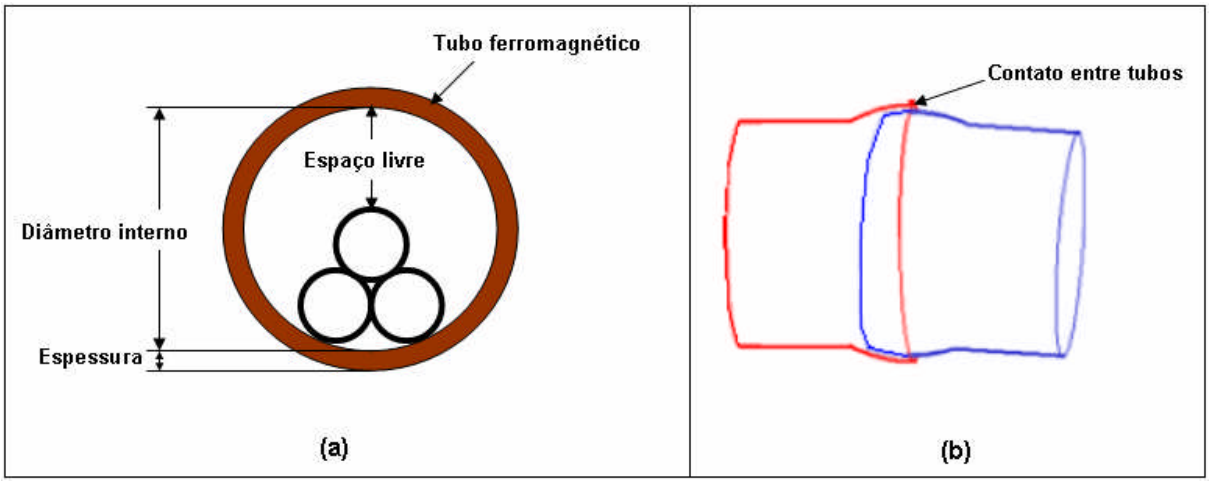

Figura 32 – Detalhes de blindagem ferromagnética constituída por tubos. (a) Secção transversal do tubo. (b) Perfil longitudinal com detalhe do contato entre tubos.

Dimensões do tubo ferromagnético: de acordo com [17] e [19], a redução do espaço livre entre tubo e cabos (ou dutos) proporciona maior atenuação do campo magnético externo ao tubo. Além disso, esta redução torna o tubo mais leve e mais fácil de manipular durante a instalação na vala. Por outro lado, esta redução do espaço livre pode dificultar o lançamento dos cabos, principalmente em rotas

sinuosas. Basicamente, o diâmetro interno do tubo é definido em função do diâmetro do cabo que será instalado, visando o espaço livre ideal que atenda tanto a eficiência de blindagem quanto o lançamento dos cabos e do próprio tubo.

Em relação à espessura do tubo, sua definição leva em consideração a eficiência de blindagem e o peso resultante para o tubo. De acordo com [19], espessuras entre 3 e 5 mm são suficientes para que ambas condições sejam satisfeitas. Além disso, estudos realizados indicam que o aumento da espessura para valores acima de 5 mm são irrelevantes para o aumento da eficiência da blindagem.

Permeabilidade magnética do material: segundo estudos realizados em [19], tubos constituídos de materiais ferromagnéticos com maiores permeabilidades são mais eficientes na mitigação do campo magnético. Os valores de permeabilidades magnéticas e de outras características de alguns materiais ferromagnéticos encontram-se no apêndice E deste documento.

Sabe-se que todos os materiais ferromagnéticos apresentam um comportamento não-linear com relação à permeabilidade magnética e, portanto, deve-se optar por um material que apresente permeabilidade magnética suficiente para evitar a saturação e a perda da eficiência da blindagem, quando submetida a níveis elevados de campo magnético. Além disso, deve-se prever no tubo ferromagnético uma proteção especial contra corrosão, já que o mesmo não é resistente a este problema. Uma alternativa de proteção já utilizada em blindagens constituídas de tubos ferromagnéticos é aderir uma capa de polietileno sobre os tubos.

Contato entre tubos ao longo do eixo longitudinal da LSAT: a ausência de espaços (gaps) entre os tubos é mais importante para eficiência da blindagem que a própria qualidade do contato entre eles. Para evitar estes espaços, normalmente utiliza-se solda nos contatos entre tubos e aplica-se uma capa de polietileno para proteção contra corrosão. Em trechos curvilíneos, o contato entre tubos torna-se impraticável, sendo necessário optar por outra técnica de mitigação.

5.3.1.2 “Raceways”

Assim como no caso de tubos ferromagnéticos, a eficiência da blindagem ferromagnética constituída por “raceways” também é influenciada pelas dimensões,

pela permeabilidade magnética do material e pelo contato entre as diferentes peças ao longo do eixo longitudinal da linha. A figura 33 mostra a secção transversal de um “raceway” e o perfil longitudinal com detalhe do contato entre peças.

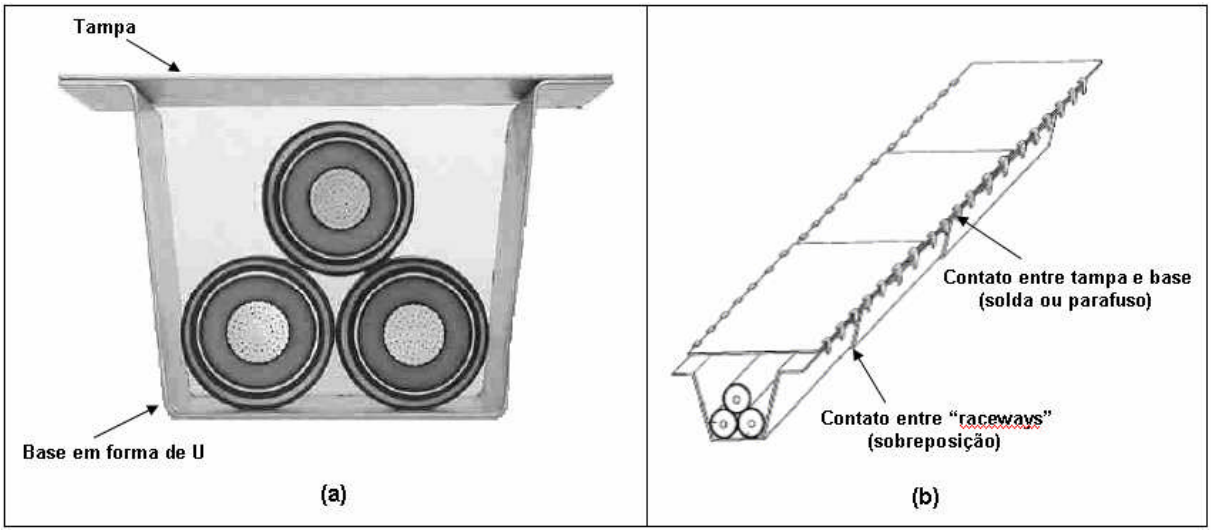

Figura 33 – Detalhes de blindagem ferromagnética constituída por “raceway”. (a) Secção transversal do “raceway”. (b) Perfil longitudinal com detalhe do contato entre “raceways” e tampa.

As vantagens da utilização de “raceways” em relação aos tubos ferromagnéticos estão associadas às facilidades de instalação em geral.

Dimensões do “raceway”: “o raceway” é formado por diferentes elementos, tais como a base em forma de “U”, a tampa e os parafusos de fixação. As dimensões destes elementos são projetadas em função do diâmetro dos cabos e da redução do espaço interno, visando o aumento da eficiência da blindagem e a facilidade de instalação das peças no local. Além disso, a geometria da base do “raceway” permite que as diferentes peças sejam sobrepostas, tornando assim a blindagem contínua ao longo do eixo longitudinal da linha, mesmo com presença de curvas e variação de perfil da rota de instalação.

Permeabilidade magnética do material: a utilização de material com permeabilidade magnética elevada contribui para o aumento da eficiência da blindagem constituída por “raceway”. Assim como no caso dos tubos ferromagnéticos, deve-se optar por um material que apresente permeabilidade magnética suficiente para evitar a saturação e a perda da eficiência de blindagem, quando submetido a níveis elevados de campo magnético. Além disso, deve-se prever uma proteção especial contra corrosão para o material do “raceway”. A galvanização do material é uma alternativa de proteção já utilizada em blindagens constituídas de “raceways”.

Contato entre "raceways" ao longo do eixo longitudinal da LSAT: a geometria cônica da base do "raceway" permite que as diferentes peças sejam sobrepostas ao longo da rota, mesmo em trechos com curvas. Nestas condições não há necessidade de utilizar soldas entre os contatos para eliminar os espaços (gaps) e garantir a continuidade da blindagem. Em relação aos contatos entre tampa e base, os mesmos podem ser realizados com parafusos ou solda.

5.3.2 Blindagem ferromagnética de geometria aberta

De acordo com [16], [18], [19], [22], [23], [24] e [25], as blindagens ferromagnéticas de geometria aberta são menos eficientes que as blindagens ferromagnéticas de geometria fechada. Isso é devido ao fato de que as linhas de campo não percorrem por um caminho fechado, sendo obrigadas a "escapar" para o meio externo que circunda a blindagem ferromagnética.

Os principais formatos das blindagens ferromagnéticas de geometria aberta são placas planas e placas na forma de "U invertido". A seguir serão descritos os parâmetros que influenciam na eficiência destas blindagens para a mitigação do campo magnético.

5.3.2.1 Placas planas ferromagnéticas

Os parâmetros que controlam a eficiência da blindagem ferromagnética constituída por placas planas são as dimensões da placa, a distância entre a placa e a LSAT, a permeabilidade magnética do material utilizado e o contato entre as placas ao longo do eixo longitudinal da LSAT.

A figura 34 mostra a secção transversal e o perfil longitudinal de um arranjo composto por um circuito instalado em plano vertical blindado com placas planas ferromagnéticas.

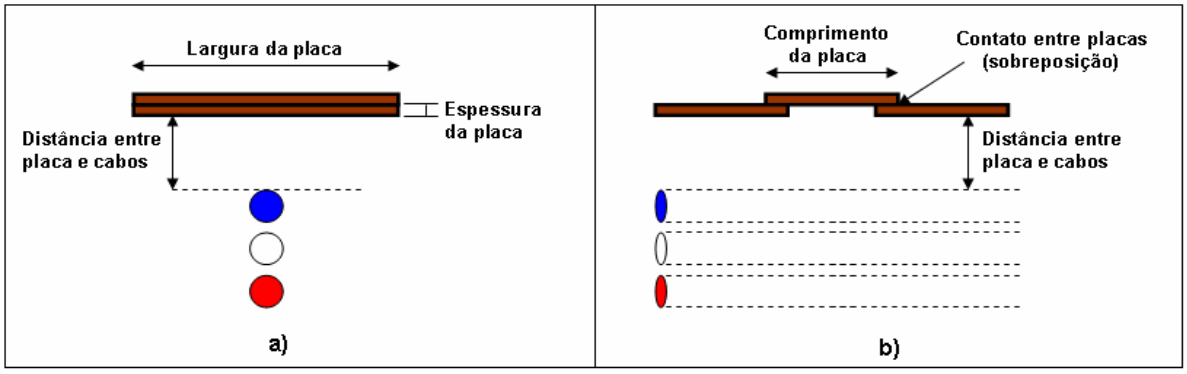

Figura 34 – Arranjo composto por circuito instalado em plano vertical blindado com placas planas ferromagnéticas. (a) Secção transversal. (b) Perfil longitudinal.

Dimensões da placa plana ferromagnética: de acordo com estudos realizados em [18] e [19], o aumento da largura e da espessura da placa plana contribui para o aumento da eficiência da blindagem em pontos acima da região central da placa. À medida que os pontos de interesse se afastam lateralmente sobre o eixo transversal da linha, o aumento destas dimensões torna-se irrelevante para a redução do campo magnético. O aumento do comprimento das placas reduz a quantidade de contatos entre as mesmas ao longo do eixo longitudinal da linha e contribui para a eficiência da blindagem. Além de aspectos relacionados à mitigação do campo magnético, a definição das dimensões das placas também leva em consideração às limitações físicas do local e as facilidades de manuseio durante a instalação das mesmas.

Distância entre a placa e os cabos da LSAT: de acordo com estudos realizados em [17] e [19], considerando-se constante a distância entre o ponto de interesse e a placa, a aproximação da placa plana ferromagnética contribui para eficiência da blindagem. Entretanto, a eficiência da blindagem decresce bruscamente quando a distância entre o ponto de interesse e a placa aumenta. Para os casos em que esta distância é maior que a própria largura da placa, a blindagem torna-se insignificante.

Permeabilidade magnética do material: de acordo com estudos realizados em [17], a eficiência da blindagem sofre influência da disposição do circuito e da permeabilidade magnética relativa do material. Para circuito com disposição plana horizontal, placas planas com menor permeabilidade magnética apresentam melhor performance de blindagem. Já o inverso ocorre para circuito com disposição plana vertical. Qualquer que seja o material ferromagnético utilizado, deve-se prever uma proteção especial contra corrosão.

Contato entre placas ao longo do eixo longitudinal: assim como no caso de tubos ferromagnéticos e “raceways”, a ausência de espaços (gaps) entre as

diferentes partes é mais importante para eficiência da blindagem que a própria qualidade do contato entre elas. No caso de placas planas, a sobreposição entre placas mostrada na figura 34(b) é suficiente para manter a blindagem contínua ao longo do eixo longitudinal da LSAT.

5.3.2.2 Placas na forma de "U invertido"

Segundo as análises realizadas por [18] e [19], as blindagens ferromagnéticas constituídas por placas unidas formando uma geometria de "U invertido" são mais eficientes na mitigação do campo magnético que as blindagens formadas por placas planas. A desvantagem da geometria "U invertido" está associada à dificuldade de instalação e manutenção do contato entre as placas ao longo da linha.

Os parâmetros que controlam a eficiência da blindagem ferromagnética constituída por placas na forma de "U invertido" são as dimensões da placa, a distância entre as placas e a LSAT, a permeabilidade magnética do material utilizado e o contato entre as placas ao longo do eixo longitudinal da LSAT.

A figura 35 mostra a secção transversal e o perfil longitudinal de um arranjo composto por um circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de "U invertido".

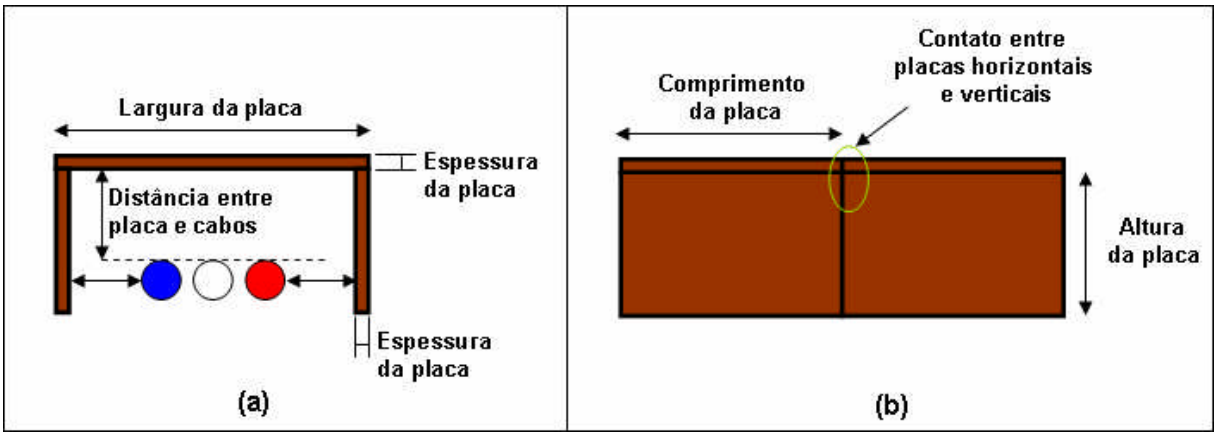

Figura 35 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de "U invertido". (a) Secção transversal. (b) Perfil longitudinal.

Distância entre as placas e os cabos da LSAT: a redução da distância entre as placas e os cabos contribui para maior atenuação do campo magnético externo à blindagem ferromagnética de geometria "U invertido". Particularmente, a definição da

distância entre a placa horizontal e os cabos leva em consideração a camada mínima de backfill a ser compactado sobre os mesmos, a qual é definida visando-se melhorar a dissipação térmica e a fixação dos cabos.

Dimensões das placas: a definição da largura da placa horizontal leva em consideração a redução das distâncias entre placas verticais e os cabos da LSAT. Fixando-se a distância entre a placa horizontal e os cabos, o aumento da altura das placas verticais contribui para o aumento da eficiência da blindagem. O aumento da espessura das placas horizontais e verticais também contribui para a redução da intensidade do campo magnético, principalmente nos pontos da região central acima da blindagem. Por sua vez, o aumento do comprimento das placas proporciona uma redução da quantidade de contatos entre as mesmas, contribuindo para a continuidade e eficiência da blindagem ao longo do eixo longitudinal da LSAT.

Permeabilidade magnética do material: a utilização de materiais ferromagnéticos com maiores permeabilidades proporciona maior eficiência da blindagem, principalmente nos pontos da região central acima da blindagem.

Contato entre placas ao longo do eixo longitudinal: deve-se evitar a presença de espaços (gaps) entre os contatos das placas para que a blindagem seja eficiente na mitigação do campo magnético. No caso da blindagem em forma de “U invertido”, devido a grande dificuldade de garantir um bom contato entre as placas através da sobreposição, a utilização de solda torna-se a alternativa mais adequada. Do ponto de vista de instalação, esta condição torna a utilização da blindagem em forma de “U invertido” uma alternativa menos vantajosa.

5.3.3 Impacto da técnica de blindagem ferromagnética na operação da linha subterrânea de alta tensão

A utilização de blindagem ferromagnética de geometria aberta (placas planas e placas na forma de “U invertido”) praticamente não afeta as características elétricas da LSAT, ou seja, não causa variação da impedância ou redução da capacidade de corrente da linha. Além da mitigação do campo magnético gerado, a presença da blindagem de geometria aberta também contribui para a proteção mecânica da LSAT

contra danos mecânicos causados por agentes externos (terceiros). No caso de placas na forma de “U invertido”, há maior dificuldade de acesso aos cabos quando da necessidade de um reparo devido a uma eventual falha do circuito.

Em relação à blindagem ferromagnética de geometria fechada (tubos ferromagnéticos e “raceways”), sua utilização pode impactar nas condições de operação da LSAT. A blindagem de geometria fechada, devido ao fato de envolver os cabos do circuito, apresenta perdas por calor causadas por correntes parasitas induzidas na mesma. Geralmente, estas perdas são levadas em consideração durante a fase de projeto da linha, seja para verificar o impacto na capacidade de corrente de um determinado cabo, seja para verificar os custos que estas perdas podem representar para a concessionária da linha.

Para o caso de tubos de aço, as perdas induzidas dentro dos tubos podem ser calculadas conforme a norma IEC 60287-1-1 [7], onde uma fórmula empírica é dada para cabos dispostos em formação trifólio e formação “cradle”. A formação trifólio é a alternativa que proporciona menores perdas e, consequentemente, redução da capacidade de corrente da linha. Além da formação dos cabos, a variação da permeabilidade magnética e da condutividade do aço também têm influência sobre a intensidade das perdas no tubo.

As perdas induzidas no “raceway” são similares às perdas calculadas para cabos em trifólio em tubos de aço, considerando-se o mesmo diâmetro médio do tubo e o mesmo diâmetro do cabo.

A presença da blindagem de geometria fechada também contribui para a proteção mecânica da LSAT contra danos mecânicos causados por agentes externos (terceiros). No caso de tubos, há maior dificuldade de acesso aos cabos para reparo de uma possível falha do circuito.

5.3.4 Exemplo de aplicação de blindagem ferromagnética

O exemplo dado em [19] e [24] mostra a utilização de blindagem ferromagnética constituída por “raceway” que envolve os cabos de uma LSAT de 380 kV na região de Milão (Itália). A linha é constituída de dois circuitos aterrados em sistema “cross-

bonding", instalados para atender uma corrente máxima de 1600 A por circuito. Estes circuitos são compostos por cabos para tensão 380 kV, com condutor de cobre secção 2000 mm², isolação XLPE, capa metálica de alumínio e cobertura de PEAD.

De acordo com a legislação local, nos trechos da rota onde as pessoas podem ficar expostas ao campo magnético por 4 horas ou mais, o limite máximo especificado para a intensidade do campo magnético é 3 μT. Nestes trechos, os cabos foram instalados em "raceways" dimensionados em função da profundidade e da disposição dos cabos.

O "raceway" utilizado é caracterizado por um material ferromagnético de alta permeabilidade magnética e alta resistência à corrosão (aço especial galvanizado). A figura 36 ilustra as características do "raceway" e o processo de instalação do mesmo. Neste trecho, devido a menor profundidade, os cabos foram instalados com disposição triangular para atenuar ao máximo a intensidade do campo magnético na região de interesse.

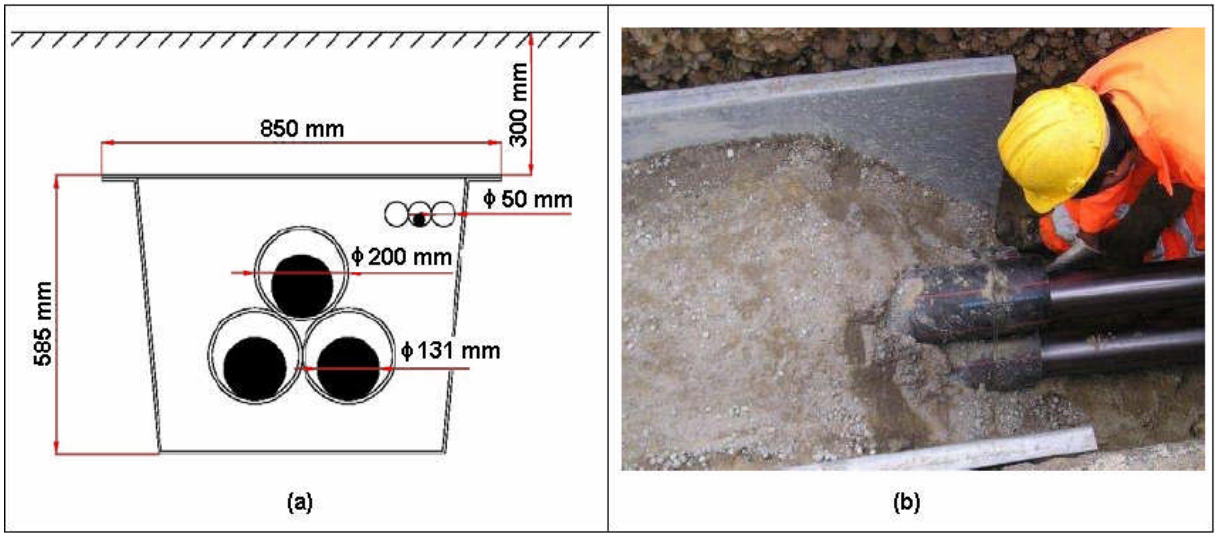

Figura 36 – Técnica de blindagem ferromagnética constituída por "raceway". (a) Secção transversal do "raceway". (b) Instalação do raceway.

Conforme apresentado na figura 37, a técnica de mitigação constituída por "raceway" permite uma redução significativa do campo magnético (fator de redução da ordem de 13 vezes), ficando abaixo do limite especificado. Neste caso, o campo magnético corresponde a pontos 1 m acima do solo, considerando-se dois circuitos com disposição plana horizontal, com distância entre circuitos de 6 m, espaçamento entre fases de 350 mm, profundidade do fundo da vala de 1,5 m e sequência de fases RST-TSR.

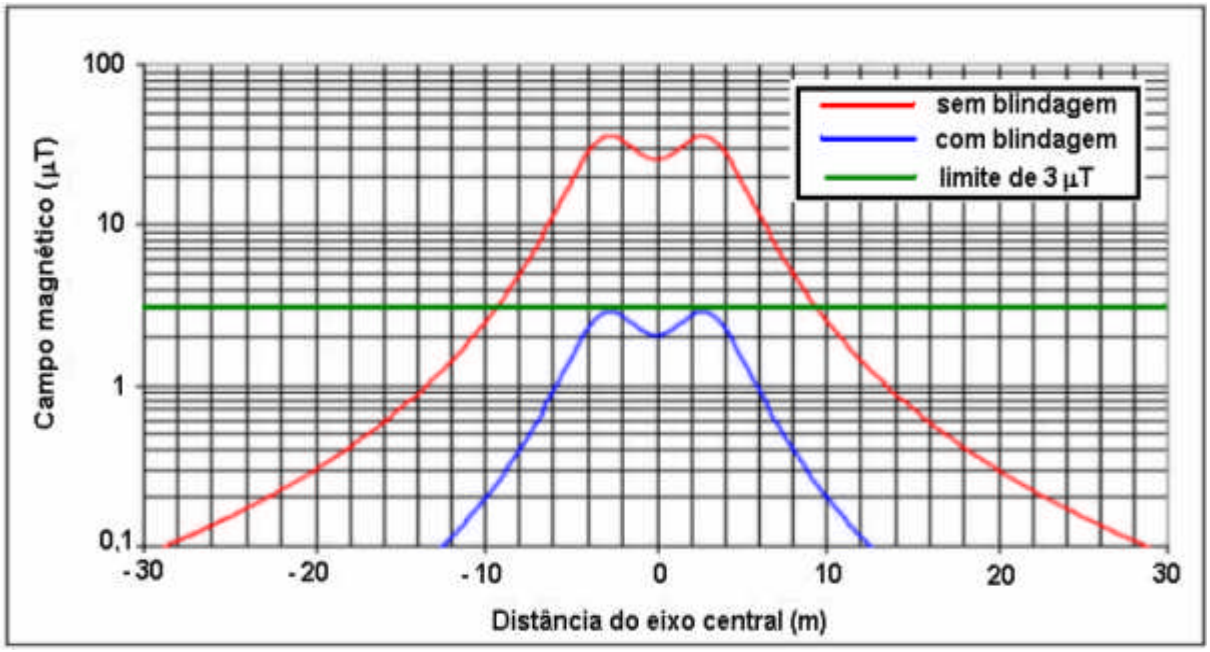

Figura 37 – Perfil do campo magnético eficaz ao longo do eixo transversal da linha, considerando-se a ausência e a presença da blindagem ferromagnética constituída por “raceway”.

O projeto do “raceway” associa a eficiência de uma blindagem de geometria fechada com a facilidade de instalação de uma blindagem de geometria aberta. Além de não necessitar de soldas entre os contatos, a geometria do “raceway” possibilita sua instalação em trechos com curvas e com variações de perfil longitudinal da rota.

5.4 Técnica de mitigação com materiais condutivos (blindagem condutiva)

Esta técnica de mitigação consiste em utilizar materiais condutivos para alterar a distribuição espacial do campo magnético entre a fonte geradora e a área de interesse. Quando um material condutivo puro é submetido numa região com presença de campo magnético variável no tempo, forças eletromotrizes geradas pelo campo induzem correntes elétricas no material. Estas correntes elétricas, também conhecidas como correntes parasitas, circulam no material condutivo e geram um campo magnético adicional. Este campo magnético adicional, por sua vez, opõe mudanças na direção das linhas de campo magnético da fonte geradora, quando estas atingem a superfície do material.

A distribuição das linhas de campo magnético na presença de blindagens condutivas pode ser visualizada na figura 38 para ambas geometrias, aberta e fechada. Este mecanismo de repulsão das linhas de campo por parte do material condutivo também é conhecido como blindagem por correntes parasitas.

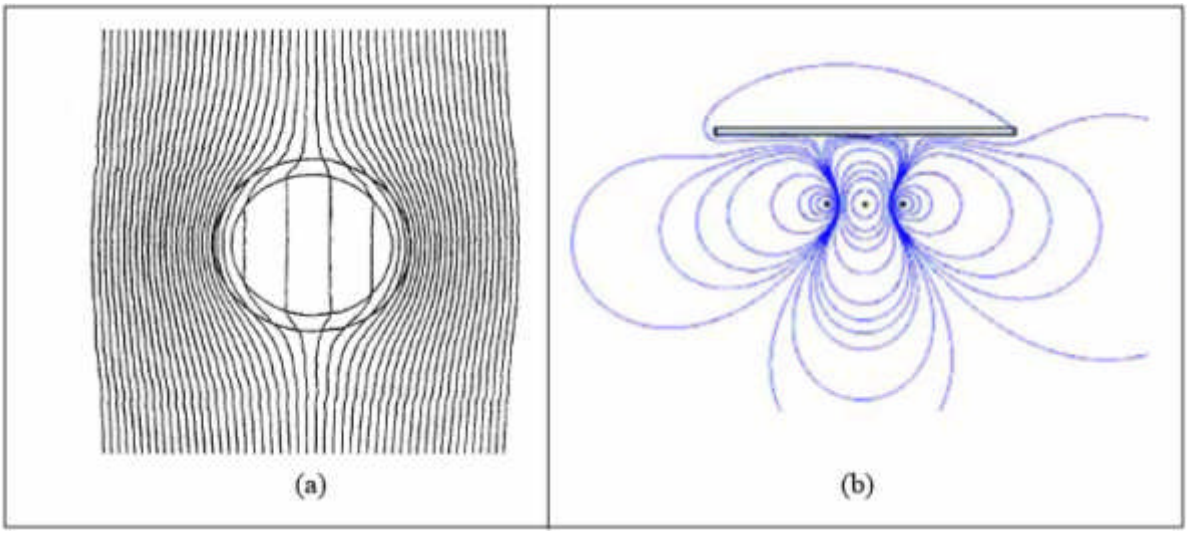

Figura 38 – Distribuição de linhas de campo magnético na presença de blindagens condutivas. (a) blindagem com geometria fechada e fonte externa. (b) blindagem com geometria aberta.

A indução eletromagnética é também responsável pelo efeito pelicular, o qual concentra a distribuição das correntes e do fluxo magnético nas regiões próximas da superfície do material. Como consequência, o efeito pelicular pode causar uma penetração incompleta do fluxo magnético e da densidade de corrente no material. Essa penetração incompleta é quantificada pela ***profundidade de penetração***, cuja equação pode ser visualizada no apêndice F deste documento.

O aumento da espessura do material condutivo puro para valores acima do valor da profundidade de penetração não contribui para melhorar a eficiência das blindagens condutivas na redução da intensidade do campo magnético. Por exemplo, em 60 Hz, a profundidade de penetração do cobre e do alumínio são 8,5 mm e 10,8 mm respectivamente e, portanto, a utilização de blindagens com espessuras acima destes valores representa apenas aumento de custos.

Normalmente os materiais mais utilizados nas blindagens condutivas são cobre, alumínio e suas ligas. O alumínio é mais utilizado devido ao menor peso e ao menor custo, apesar da sua eficiência na mitigação do campo magnético ser menor que a eficiência do cobre.

A seguir serão apresentadas as principais características de blindagens condutivas de geometria fechada e aberta.

5.4.1 Blindagem condutiva de geometria fechada

A blindagem condutiva de geometria fechada não é uma solução vantajosa, tanto do ponto de vista de mitigação do campo magnético, quanto do ponto de vista de custos e impactos no serviço de operação da LSAT. Neste tipo de geometria, recomenda-se a utilização de materiais ferromagnéticos devido às seguintes vantagens:

- Nas blindagens condutivas há necessidade de garantia de um ótimo contato (solda) entre as diferentes partes das blindagens, de forma a permitir a circulação das correntes parasitas, que são responsáveis pelo mecanismo de blindagem. No caso de blindagens ferromagnéticas, a ausência de espaços (gaps) entre as diferentes partes é mais importante para eficiência da blindagem que a própria qualidade do contato elétrico entre elas.
- De acordo com cálculos numéricos realizados em [17], blindagens ferromagnéticas de geometria fechada apresentam maior eficiência quando a área interna da blindagem é reduzida, enquanto blindagens condutivas apresentam maior eficiência quando a área interna da blindagem aumenta. Nestas condições, a utilização de blindagem condutiva torna-se inviável devido a grande dimensão da blindagem, ao elevado custo e a dificuldade de instalação.
- Segundo [19], as blindagens condutivas, quando instaladas muito próximas dos cabos, se aquecem, geram perdas e dificultam a dissipação do calor proveniente dos cabos da LSAT, o que contribui para a redução da capacidade de corrente da mesma. No caso de blindagens ferromagnéticas, estas perdas são menores e, consequentemente, menor é o impacto sobre o serviço de operação da LSAT.

As vantagens descritas acima das blindagens ferromagnéticas de geometria fechada podem justificar a ausência de casos práticos de aplicação da blindagem condutiva de geometria fechada em LSAT até o presente momento.

5.4.2 Blindagem condutiva de geometria aberta

Os principais formatos das blindagens condutivas de geometria aberta são placas planas, placas na forma de “U invertido” e placas na forma de “H”. A seguir serão descritos os parâmetros que influenciam na eficiência destas blindagens para a mitigação do campo magnético.

5.4.2.1 Placas planas condutivas

Os parâmetros que controlam a eficiência da blindagem condutiva constituída por placas planas são as dimensões da placa, a distância entre a placa e a LSAT, a condutividade elétrica do material utilizado e o contato entre as placas ao longo do eixo longitudinal da LSAT.

De acordo com estudos realizados em [17], placas planas condutivas são mais eficientes que placas planas ferromagnéticas quando utilizadas sobre circuitos com disposição plana horizontal. No caso de circuitos com disposição plana vertical, as placas ferromagnéticas apresentam melhor eficiência.

A figura 39 mostra a secção transversal e o perfil longitudinal de um arranjo composto por um circuito instalado em plano horizontal blindado com placas planas condutivas.

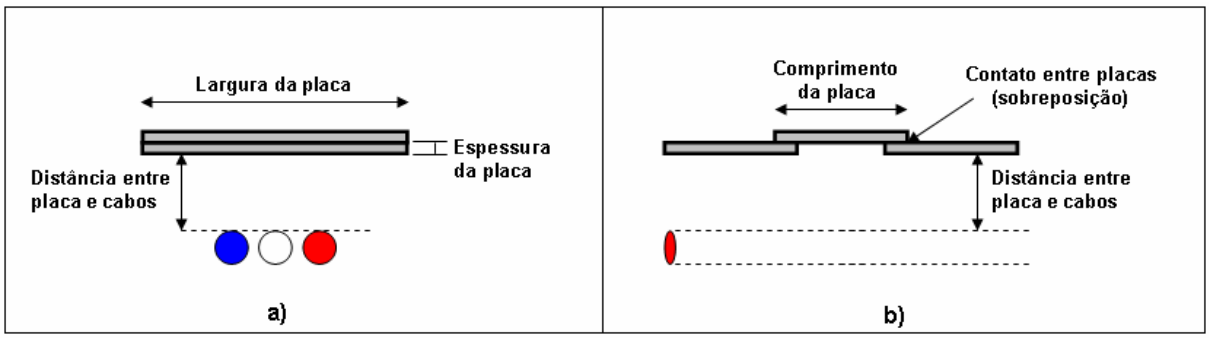

Figura 39 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal e blindado com placas planas condutivas. (a) Seção transversal. (b) Perfil longitudinal.

Dimensões da placa plana condutiva: de acordo com estudos realizados em [17], [19] e [26], o aumento da espessura de placas planas condutivas contribui para o

aumento da eficiência da blindagem na atenuação do campo magnético, principalmente em pontos na região central sobre a placa. Entretanto, o aumento da espessura para valores acima do valor da profundidade de penetração (skin depth) não proporciona melhor eficiência da blindagem. Segundo estes trabalhos, espessuras da ordem de 3 mm são recomendadas para se obter melhor eficiência de placas planas de alumínio, tanto na mitigação do campo magnético como também na proteção mecânica e resistência à corrosão.

De acordo com [19] e [26], a intensidade do campo magnético é reduzida ao longo da secção transversal da linha com o aumento da largura das placas planas condutivas. Entretanto, esta largura deve ser dimensionada com o objetivo de evitar a queda brusca da eficiência da blindagem em relação aos pontos próximos da região central sobre a placa. Para isso, Hoeffelman [26] recomenda que a razão entre a largura da placa plana e a distância da placa aos cabos seja superior a 4.

O aumento do comprimento das placas reduz a quantidade de contatos entre as mesmas ao longo do eixo longitudinal da linha e contribui para melhorar a eficiência da blindagem.

Distância entre a placa e os cabos da LSAT: de acordo com [26], é recomendado que a razão entre a largura da placa e a distância entre placa e cabos seja superior a 4. Além de evitar a presença de dois picos de campo magnético nos extremos da placa, essa recomendação praticamente não gera perdas na placa suficientemente para reduzir a capacidade de condução de corrente da LSAT.

Condutividade elétrica do material: cálculos numéricos realizados em [19] mostram que materiais com maior condutividade elétrica são mais eficientes na redução do campo magnético. Em outras palavras, placas de cobre são mais eficientes na mitigação do campo magnético que placas de alumínio.

Contato entre placas ao longo do eixo longitudinal: De acordo com Hoeffelman [26], a sobreposição entre placas planas condutivas é suficiente para que a eficiência da blindagem seja próxima da eficiência de uma blindagem contínua ao longo do eixo longitudinal da LSAT. Segundo estudo realizado neste trabalho, a qualidade do contato elétrico entre as placas planas não é determinante para a eficiência da blindagem.

5.4.2.2 Placas na forma de “U invertido”

Segundo as análises realizadas por [19] e [26], as blindagens condutivas constituídas por placas unidas formando uma geometria de “U invertido” são mais eficientes na mitigação do campo magnético que as blindagens formadas por placas planas. Entretanto, a desvantagem da utilização deste formato de blindagem está relacionada à dificuldade de instalação e a garantia de um ótimo contato entre as placas ao longo da linha.

Os parâmetros que controlam a eficiência da blindagem condutiva constituída por placas na forma de “U invertido” são as dimensões da placa, a distância entre as placas e os cabos da LSAT, a condutividade elétrica do material utilizado e o contato entre as placas ao longo do eixo longitudinal da LSAT.

A figura 40 mostra a secção transversal e o perfil longitudinal de um arranjo composto por um circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de “U invertido”.

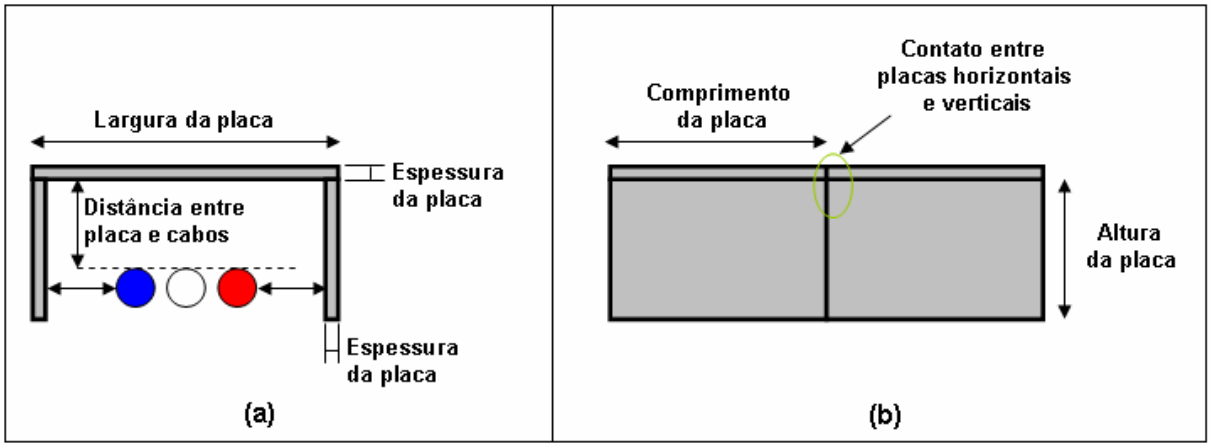

Figura 40 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal blindado com placas condutivas na forma de “U invertido”. (a) Secção transversal. (b) Perfil longitudinal.

Distância entre as placas e os cabos da LSAT: assim como no caso de blindagens constituídas de placas planas, é recomendado que a razão entre a largura da placa horizontal e a distância entre a placa horizontal e os cabos seja superior a 4. Essa recomendação praticamente não gera perdas na placa suficientemente para reduzir a capacidade de condução de corrente da LSAT.

Dimensões das placas: o aumento da espessura das placas da blindagem na forma de “U invertido” também contribui para o aumento da eficiência da blindagem.

Entretanto, o aumento da espessura para valores acima do valor da profundidade de penetração do material (skin depth) não proporciona melhor eficiência. Valores de espessura entre 3 mm e 5 mm são suficientes para tornar a blindagem na forma de "U invertido" eficiente na mitigação do campo magnético, além de contribuir para uma maior proteção mecânica e resistência à corrosão.

A largura da placa horizontal deve ser dimensionada levando-se em consideração a recomendação da distância mínima entre a mesma e os cabos. A altura das placas verticais é definida em função da distância entre a placa horizontal e a profundidade da base de apoio dos cabos. O aumento do comprimento das placas, por sua vez, reduz a quantidade de contatos entre as mesmas ao longo do eixo longitudinal da linha e contribui para melhorar a eficiência da blindagem.

Condutividade elétrica do material: a utilização de materiais com maior condutividade elétrica contribui para o aumento da eficiência da blindagem na forma de "U invertido".

Contato entre placas ao longo do eixo longitudinal: no caso da blindagem condutiva em forma de "U invertido", para obter maior eficiência de blindagem, deve-se garantir um ótimo contato entre as placas horizontais e verticais da peça "U invertido". Além disso, as placas verticais ao longo de todo eixo longitudinal da linha também devem apresentar um ótimo contato entre si, de forma a possibilitar a circulação das correntes parasitas nas partes laterais da blindagem "U invertido".

Do ponto de vista de instalação, esta condição torna a utilização da blindagem em forma de "U invertido" uma alternativa menos vantajosa, sendo mais favorável a utilização de blindagem na forma de "H".

5.4.2.3 Placas na forma de "H"

De acordo com as análises realizadas por [19] e [26], as blindagens condutivas constituídas por placas unidas formando uma geometria de "H" são mais eficientes na mitigação do campo magnético que às alternativas anteriores (placas planas e placas na forma de "U invertido"). A vantagem da utilização deste formato de blindagem está relacionada à facilidade de instalação das placas e à facilidade de

aplicação e compactação do “backfill”, o qual é necessário para melhorar a dissipação térmica dos cabos e proporcionar fixação mecânica do circuito.

Os parâmetros que controlam a eficiência da blindagem condutiva constituída por placas na forma de “H” são os mesmos descritos para as placas planas e para as placas na forma de “U invertido”.

A figura 41 mostra a secção transversal e a representação em planta de um arranjo composto por um circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de “H”.

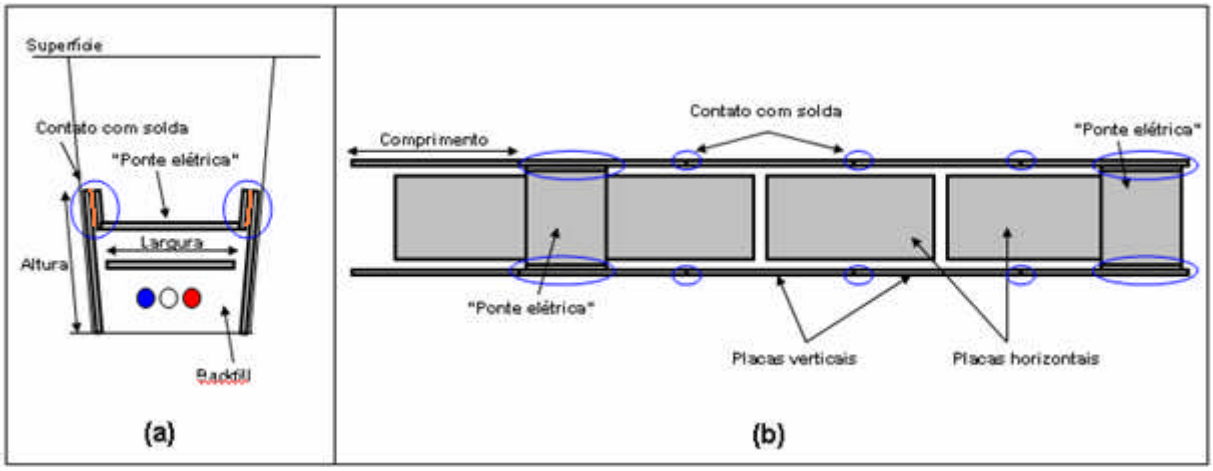

Figura 41 – Arranjo composto por circuito instalado em plano horizontal blindado com placas na forma de “H”. (a) Secção transversal. (b) Representação em planta.

No caso de placas na forma de “H”, duas placas verticais são instaladas na vala antes do preenchimento da primeira camada de “backfill”. De acordo com estudos realizados em [19] e [27], o posicionamento levemente inclinado das placas verticais contribui para melhorar a eficiência da blindagem na mitigação do campo magnético. As placas horizontais são instaladas após a instalação dos cabos e após a aplicação da segunda camada de “backfill”.

Dimensões das placas: por razões práticas, recomenda-se a utilização de placas horizontais e verticais de mesmas dimensões (comprimento, largura e espessura). Nestas condições, a altura das placas verticais e a largura da placa horizontal são equivalentes. Assim como informado nas alternativas anteriores, espessuras da ordem de 3 a 5 mm são recomendadas para as placas.

Contato entre placas ao longo do eixo longitudinal: deve-se assegurar um ótimo contato elétrico (através de solda) entre as diferentes placas verticais em ambos lados da vala. Além disso, em intervalos regulares e nas extremidades da blindagem em forma de “H”, deve-se interligar eletricamente as placas verticais de ambos os

lados da vala. Esta interligação, denominada de “ponte elétrica” na figura 41, pode ser formada pelas mesmas placas condutivas utilizadas na blindagem “H”. De acordo com estudos realizados em [19] e [26] para um circuito com disposição plana horizontal, a continuidade dos contatos envolvendo as placas horizontais é irrelevante para a eficiência da blindagem.

5.4.3 Impacto da técnica de blindagem condutiva na operação da linha subterrânea de alta tensão

Em relação aos materiais de alta condutividade elétrica, o aumento da temperatura da blindagem condutiva, quando instalada muito próxima aos cabos, pode afetar a capacidade de condução de corrente da LSAT. Por exemplo, a instalação de blindagens de alumínio próxima aos cabos de potência pode reduzir a dissipação de calor e, consequentemente, a capacidade de corrente da LSAT. Além do dimensionamento correto dos cabos, este fato deve ser levado em consideração para o cálculo da transferência de energia da LSAT ou simplesmente, para o conhecimento do custo das perdas por calor. Outros efeitos como a variação da impedância da linha, geralmente pode ser desprezada.

Em relação à manutenção e riscos de defeitos na LSAT, blindagens condutivas constituídas de placas podem ser consideradas como uma proteção extra contra agressões mecânicas externas (defeito causado por terceiros).

5.4.4 Exemplo de aplicação de blindagem condutiva

O exemplo dado em [19] e [27] mostra a utilização de placas de alumínio formando uma blindagem condutiva com geometria “H”, a qual foi aplicada numa LSAT de 150 kV na Bélgica. A linha é constituída de dois circuitos aterrados em sistema “cross-bonding”, instalados para atender uma corrente máxima de 1300 A por circuito. Estes circuitos são compostos por cabos 150 kV com condutor de alumínio secção

2000 mm² e isolação de XLPE, instalados com disposição plana horizontal a uma profundidade de 1,3 m aproximadamente. A distância entre fases do circuito é de 25 cm, enquanto a distância entre circuitos varia de 2 m a 5 m ao longo da rota.

Para evitar maior intensidade de campo magnético na região entre circuitos, ambos os circuitos foram instalados com a mesma sequência de fases (RST-RST). Foi verificado neste caso que, com a permutação das fases (RST-TSR), a intensidade de campo magnético no nível do solo atinge aproximadamente 100 μT na região entre os circuitos. Sem a permutação de fases, o campo magnético atinge seu ponto de ruptura, ou seja, os picos de campo magnético ocorrem com menor intensidade na direção acima de cada circuito.

A blindagem condutiva é formada por várias placas de alumínio com 200 cm de comprimento, 80 cm de largura e 3 mm de espessura. As placas horizontais foram instaladas 40 cm acima da base da vala e com espaçamentos de alguns centímetros entre as diferentes placas horizontais e verticais ao longo do eixo longitudinal.

A figura 42 ilustra a secção transversal e o processo de instalação da blindagem condutiva com geometria “H”.

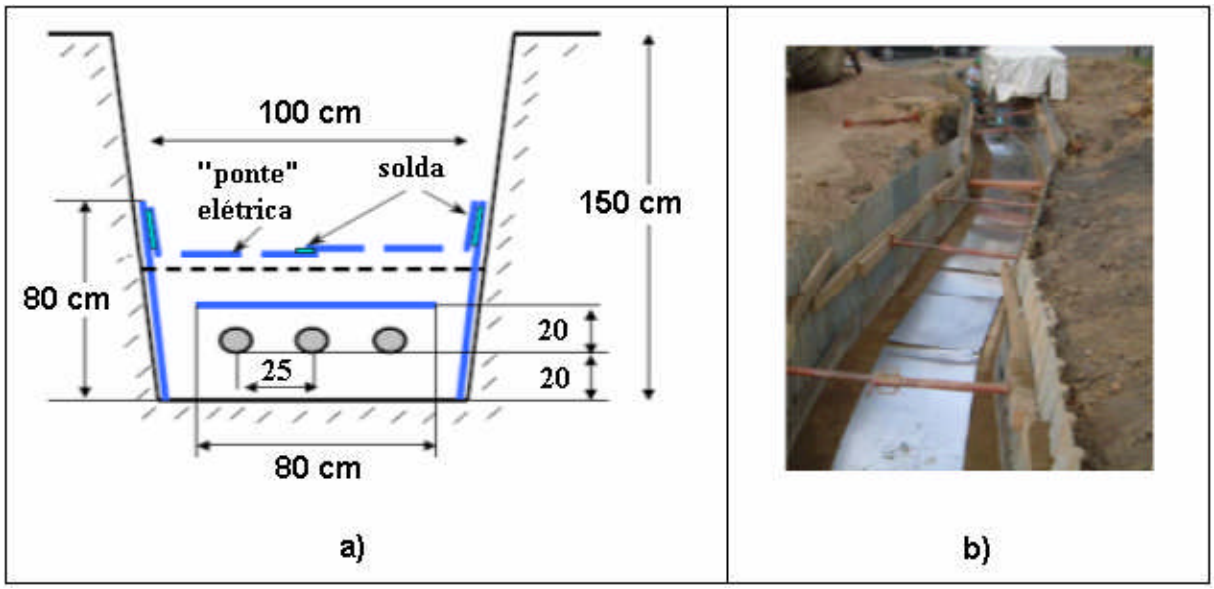

Figura 42 – Técnica de blindagem condutiva com geometria “H”. (a) Secção transversal da instalação. (b) Instalação das placas de alumínio.

Em ambos os lados da vala e ao longo do comprimento de 6,5 km da linha, as placas verticais foram instaladas sobrepostas entre si e seus contatos foram soldados. Além disso, em intervalos regulares e em ambas extremidades da blindagem condutiva, as placas verticais foram interligadas por meio de outras placas de alumínio (ponte elétrica), como mostra a figura 42. Esta interligação entre

as placas verticais de ambos os lados da vala é necessária para constituir um caminho fechado para a circulação das correntes parasitas, já que o espaçamento (gaps) entre estas placas e as placas horizontais não possibilita esta circulação.

Em relação à largura da blindagem condutiva, foi verificado experimentalmente que o aumento da distância entre paredes para 100 cm torna a blindagem condutiva mais eficiente, se comparada com a eficiência da blindagem com distância entre paredes de 80 cm. Entretanto, foi verificado que o aumento da largura da placa horizontal para 100 cm contribui para a perda de eficiência da blindagem nos pontos acima dos cabos (onde o campo magnético apresenta maior intensidade).

A figura 43 apresenta os resultados de medições de campo magnético realizados na superfície e a 1 m acima desta, considerando-se a presença e a ausência da blindagem condutiva de geometria “H”.

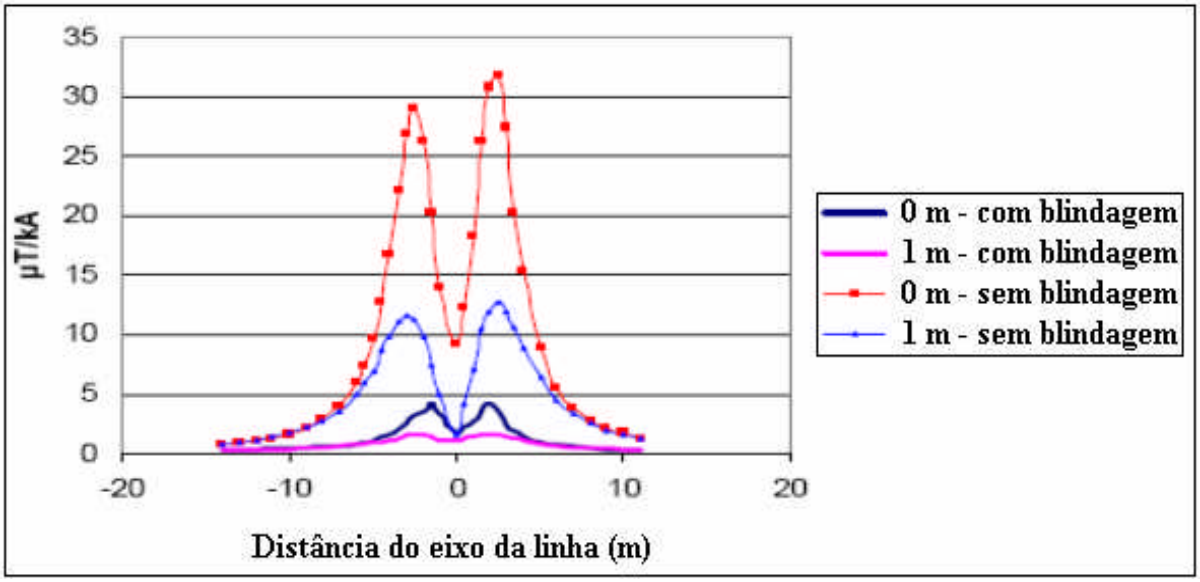

Figura 43 – Resultados de medições de campo magnético na superfície e a 1 m acima, com e sem presença da blindagem condutiva de geometria “H”.

Apesar da distância entre os dois circuitos no trecho com presença da blindagem ser diferente no trecho sem blindagem, a figura 43 mostra que um fator de blindagem de aproximadamente 10 vezes foi obtido em áreas diretamente acima dos cabos e em pontos distantes lateralmente dos mesmos.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram realizados estudos teóricos de campo magnético em função da variação dos parâmetros geométricos e elétricos de instalações típicas de linhas subterrâneas de alta tensão, como é o caso da disposição plana horizontal, plana vertical e triangular. Os estudos teóricos referem-se na aplicação do método analítico, baseado na Lei de Biot-Savart e no princípio da superposição.

A variação dos parâmetros geométricos adotados nas linhas estudadas, tais como espaçamento entre fases do circuito, distância entre circuitos, etc, foi baseada em vários projetos já executados de linhas de transmissão subterrânea. Logicamente, cada linha de transmissão apresenta sua particularidade e exige certos parâmetros de instalação, porém, pode-se considerar que a variação dos parâmetros considerada no trabalho engloba a maioria dos casos práticos.

Da análise dos estudos analíticos realizados verifica-se que o aumento da profundidade e a redução dos espaçamentos entre fases do(s) circuito(s) contribuem para a redução do campo magnético gerado no ponto de interesse, embora essas medidas não sejam favoráveis para a dissipação do calor dos cabos. Pode-se concluir que linhas compostas por 1 circuito apresentam menor intensidade de campo magnético quando o circuito é instalado com disposição triangular e aterrado em “both ends bonding”. No caso de 2 circuitos, a menor intensidade é obtida quando as fases são permutadas e são aterradas em “both ends bonding”.

Em relação à influência dos parâmetros geométricos e elétricos das linhas subterrâneas de alta tensão na intensidade e distribuição do campo magnético, podemos concluir que:

- A máxima intensidade do campo magnético ocorre no ponto da superfície logo acima dos cabos, sendo que para pontos distantes do centro, a intensidade do campo decresce consideravelmente;
- Para o caso de dois circuitos, a permutação de fases proporciona uma redução considerável na intensidade do campo magnético gerado. Dentre as configurações de fases possíveis, a maior intensidade do campo magnético ocorre quando ambos circuitos apresentam a mesma configuração de fases. Em alguns casos da disposição plana horizontal e plana vertical, a

permutação dos cabos possibilita que dois circuitos em operação gerem campo magnético menor em relação ao caso de apenas um circuito;

- Nos casos da disposição plana horizontal e plana vertical, para reduzir a intensidade de campo magnético, deve-se instalar um circuito para uma determinada configuração de fases e instalar o outro circuito permutando as fases externas e mantendo-se a mesma posição da fase central. No caso da disposição triangular, deve-se instalar um circuito para uma determinada configuração de fases e instalar o outro circuito permutando as fases em sentido horário;
- O aumento da distância entre circuitos tende a reduzir o campo magnético nos pontos do centro e acima dos circuitos dispostos em plano horizontal e vertical, com configuração de fases ABC-ABC, sendo o inverso para o caso ABC-CBA. A distância entre circuitos não tem influência significativa no campo magnético gerado por circuitos com disposição triangular;

Sabe-se que para cabos com blindagens aterradas pelo método “both ends bonding”, quanto maior for a distância entre as fases do circuito, maior será a intensidade da corrente circulante pelas blindagens, ou seja, as perdas por aquecimento na blindagem limitam a capacidade de corrente dos cabos, sendo necessário um cabo com secção de condutor maior. Em contra partida, essa corrente circulante nas blindagens gera campo magnético com sentido inverso ao campo magnético gerado pelas correntes dos condutores, reduzindo consideravelmente sua intensidade. Em relação aos métodos especiais de aterramento das blindagens, como é o caso do aterramento “cross-bonding” e do aterramento “single-point bonding”, a ausência da circulação de corrente nas blindagens permite uma maior capacidade de condução de corrente dos cabos, ou uma redução da secção do condutor para uma determinada potência de transmissão. Para compensar o efeito térmico, os circuitos são instalados com as fases espaçadas entre si (normalmente com duas vezes o diâmetro do cabo), e este espaçamento, conforme visto nos estudos realizados, influencia para uma maior intensidade do campo magnético.

Através da comparação entre os valores calculados e valores de medição obtidos para os casos de linhas existentes em operação, pode-se concluir que a metodologia de cálculo através da Lei de Biot-Savart e o princípio da superposição é válida para diagnosticar com boa precisão o campo magnético de linhas

subterrâneas de alta tensão, principalmente em pontos mais afastados da linha. Vale ressaltar que no caso de linhas constituídas de 2 circuitos com operação simultânea, a obtenção dos ângulos de fases reais das correntes durante as medições, quando possível, contribui para a redução da discrepância entre os valores reais e teóricos.

Em relação às técnicas de mitigação, pode-se concluir que:

A técnica de compensação passiva é uma ótima alternativa para mitigação de campo magnético, tanto para linhas existentes quanto para linhas em fase de projeto. Apesar de ser geralmente utilizada em caixas de emendas de cabos, sua utilização pode ser estendida ao longo de toda linha. Nestas condições, tantos os cabos da linha subterrânea de alta tensão quanto os cabos do(s) laço(s) devem ser dimensionados levando-se em consideração o aquecimento mútuo entre eles.

Para a implantação de novas linhas em locais com limites muito baixos de campo magnético, a melhor solução é envolver os cabos através de uma blindagem com material de alta permeabilidade magnética. Neste caso, a utilização de “raceways” é recomendada devido à facilidade de sua instalação e facilidade da instalação dos cabos, além de proporcionar um elevado fator de redução do campo magnético.

No caso de linhas existentes, além da técnica de compensação passiva, pode-se utilizar as técnicas envolvendo blindagens condutivas. Nesta condição, as blindagens na forma de “H” compostas por placas de alumínio ou cobre são recomendadas pela maior eficiência de atenuação do campo magnético.

REFERÊNCIAS

[1] INTERNATIONAL COMMISSION OF NON IONIZING RADIATION PROTECTION. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). **Health Physics**. v. 74, n. 4, p. 494-522, Apr. 1998. Disponível em: <http://www.icnirp.de/documents/emfgdl.pdf>. Acesso em: 06 out. 2009.

[2] Estabelecendo um diálogo sobre riscos de campos eletromagnéticos. Genebra: Organização Mundial da Saúde, 2002 – Disponível em: <http://www.who.int/peh-emf/publications/Risk_Portuguese.pdf>. Acesso em: 06 out. 2009.

[3] SÃO PAULO (Município). Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. Regulamenta os procedimentos para o controle ambiental da instalação e da operação de subestações e de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica do município. Portaria n. 80, 13 de outubro de 2005. **Diário Oficial do Município**, São Paulo, p. 30, out. 2005.

[4] BRASIL. Lei nº 11.934, de 05 de maio de 2009. Dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 06 de maio de 2009. Seção 1, p.1-3.

[5] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Regulamenta a Lei 11.934 de 05 de maio de 2009, no que refere-se aos limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica na frequência de 60 Hz. Resolução normativa n.398, de 23 de março de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, Volume 147, Número 59, Seção 1, p.70, 29 mar. 2010.

[6] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE (EPRI). **Underground transmission systems reference book**. 2006 ed. California: 2007. 778 p.

[7] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60287-1-1**: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – general. Geneva, 2006. 74 p.

[8] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60287-2-1**: Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. Geneva, 2006. 88 p.

[9] _____. **IEC 60853-2**: Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables – Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages. Geneva, 1989. 60 p.

[10] _____. **IEC 60949**: Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects. Geneva, 1988. 13 p.

[11] WORKING GROUP 07 OF STUDY COMMITTEE n. 21 OF CIGRÉ. The design of specially bonded cable systems. **Electra**, Paris, n. 28, p. 55-81, May 1973.

[12] WORKING GROUP 07 OF STUDY COMMITTEE n. 21 OF CIGRÉ. The design of specially bonded cable systems (Second part). **Electra**, Paris, n. 47, p. 61-86, June 1976.

[13] ANTONISSEN, J.P.M. et al. **Construction, laying and installation techniques for extruded and self contained fluid filled cable systems**. Technical brochure 194. Paris: Cigré, WG 21.17, Oct. 2001. 145 p.

[14] COOPER, J. **Single conductor transmission cable magnetic fields**. EPRI Report EL-7340, Aug. 1991.

[15] VÉRITÉ, J.C. et al. **Magnetic field in HV cable systems 1:** Systems without ferromagnetic component. Technical brochure 104. Paris: Cigré, JTF 36.01/21, June 1996. 30 p.

[16] BUCEA, G.; KENT, H. **Shielding techniques to reduce magnetic fields associated with underground power cables**: Case study from Sydney Australia. Session 21-201. Paris: Cigré, 1998.

[17] D´AMORE, M.; MENGHI, E.; SARTO, M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from cable power lines. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 18., 2003, Istanbul. **Anais.** Istanbul: IEEE Electromagnetic Compatibility, 2003. p. 203-208.

[18] BASCOM, E. C. et al. Magnetic field management considerations for underground cable duct bank. In: IEEE TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXHIBITION, 8., 2005, New Orleans. **Anais.** Dallas: IEEE Power Engineering Society, 2006. p. 414-420.

[19] SALINAS, E. et al. **Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems**. Technical brochure 373. Paris: Cigré, WG C4.204, Feb. 2009. 172 p.

[20] MAIOLI, P.; ZACCONE, E. Passive loops technique for electromagnetic fields mitigation: applications and theoretical considerations. In: JICABLE, 7th., 2007, Versailles. **Cables and environment.** Versailles: 2007: JICABLE, 2007. Disponível em: <http://www.jicable.org/Former_Conferences/ssession.php?ssession=2007-A8>. Acesso em: 03 Mar. 2010.

[21] CRUZ, P.; HOEFFELMAN, J.; DEL PINO, J. C. Passive loop-based mitigation of magnetic fields from underground power cable. **IEEE Latin America Transactions**, v. 6, n. 1, p. 59-65, Mar. 2008.

[22] VÉRITÉ, J.C. et al. Magnetic field calculation in underground cable systems with ferromagnetic components. **Electra**, Paris, n. 174-4, June 1997.

[23] BOLZA, A., DONAZZI, F., MAIOLI, P. **Campi elettrici e magnetici**: possibilità offerte dagli elettrodotti in cavo. Italia: Pirelli Cavi e Sistemi S.p.A, Nov. 2000. 5 p.

[24] RENDINA, R. et al. **The new Turbigo-RHO 380kV Transmission Line:** An example of the use of underground XLPE cables in a meshed transmission grid. Session B1-302. Paris: Cigré, 2006. 11 p.

[25] CONTI, R. et al. **Some italian experiences in the utilization of HV underground cable systems to solve local problems due to magnetic field and other environmental issues**. Session C4-303. Paris: Cigré, 2006. 9 p.

[26] HOEFFELMAN, J. Shielding of underground power cables, from theory to practical implementation. In: CIRED 2003, 17th, May 2003, Barcelona. **Anais**. Barcelona: 2003. Round Table on Magnetic Field Mitigation Methods.

[27] GILLE, A. et al. **Double 150kV link, 32km long, in Belgium:** Design and construction. Session B1-305. Paris: Cigré, 2004. 8 p.

[28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (WENNER). Rio de Janeiro, 1981. 15 p.

[29] _____. **NBR 15415**: Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50Hz e 60Hz. Rio de Janeiro, 2006. 56 p.

[30] POLLACZEK, F. Sur le champ produit par un conducteur simple infiniment long parcouru par un courant alternatif. **Revue Générale de l'Electricité**, v. 29, n. 2, p. 851-867, 1931.

APÊNDICE A – METODOLOGIA DE CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO

Neste apêndice serão apresentados o procedimento e o formulário destinado ao cálculo de campo magnético de linhas subterrâneas de alta tensão. Este cálculo é baseado na Lei de Biot-Savart e no princípio da superposição, e sua aplicação é válida considerando-se as premissas citadas no item 3.2 deste documento.

Este apêndice está subdividido em três itens. O primeiro item mostra as equações destinadas ao cálculo das correntes e do campo magnético de um sistema composto por "N" cabos aterrados em ambas extremidades. O segundo item faz uma abordagem em forma de matrizes para o cálculo das correntes. O terceiro item apresenta as fórmulas simplificadas que podem ser aplicadas para linhas constituídas de um circuito com disposição plana horizontal e disposição triangular.

A1 Formulário

As grandezas vetoriais estão indicadas por letras em negrito, por exemplo **Z, B, E, I**, enquanto as grandezas escalares estão representadas por caracteres itálicos, por exemplo *R, D, f,* ρ*, r*.

A figura 44 apresenta um sistema de transmissão composto por N cabos aterrados em ambas extremidades.

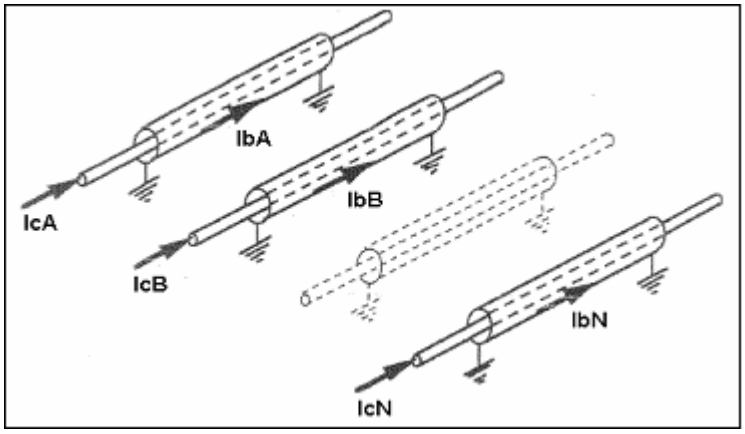

Figura 44 – Sistema de transmissão aterrado em ambas extremidades

As equações de malha de Kirchhoff que regem os circuitos das blindagens do sistema da figura 44 são dadas por (1):

$$
\begin{aligned}
0 &= I_{cA} \cdot Z_{cAbA} + I_{cB} \cdot Z_{cBbA} + \dots + I_{cN} \cdot Z_{cNbA} + I_{bA} \cdot Z_{bAbA} + I_{bB} \cdot Z_{bAbB} + \dots + I_{bN} \cdot Z_{bAbN} \\
0 &= I_{cA} \cdot Z_{cAbB} + I_{cB} \cdot Z_{cBbB} + \dots + I_{cN} \cdot Z_{cNbB} + I_{bA} \cdot Z_{bAbB} + I_{bB} \cdot Z_{bBbB} + \dots + I_{bN} \cdot Z_{bBbN} \\
&\vdots \\
0 &= I_{cA} \cdot Z_{cAbN} + I_{cB} \cdot Z_{cBbN} + \dots + I_{cN} \cdot Z_{cNbN} + I_{bA} \cdot Z_{bAbN} + I_{bB} \cdot Z_{bBbN} + \dots + I_{bN} \cdot Z_{bNbN}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

onde:

$$\mathbf{Z_{cnbn}} = \frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \cdot d_n \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} + j \cdot \left[ln\left(\frac{D}{r_{bn}} \right) - \frac{4}{3} \cdot d_n \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} \right] \right\} \cdot 10^3 \tag{2}$$

$$\mathbf{Z_{cnbm}} = \frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \cdot \left(d_n + d_m\right) \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} + j \cdot \left[ln\left(\frac{D}{D_{nm}} \right) - \frac{2}{3} \cdot \left(d_n + d_m\right) \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} \right] \right\} \cdot 10^3 \tag{3}$$

$$\mathbf{Z_{bnbn}} = R_{bn} + \frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \cdot d_n \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} + j \cdot \left[ln\left(\frac{D}{r_{bn}} \right) - \frac{4}{3} \cdot d_n \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} \right] \right\} \cdot 10^3 \tag{4}$$

$$\mathbf{Z_{bnbm}} = \frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \cdot \left(d_n + d_m\right) \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} + j \cdot \left[ln\left(\frac{D}{D_{nm}} \right) - \frac{2}{3} \cdot \left(d_n + d_m\right) \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{2 \cdot \rho}} \right] \right\} \cdot 10^3 \tag{5}$$

$$D_{nm} = \sqrt{\left(X_n - X_m\right)^2 + \left(d_n - d_m\right)^2} \tag{6}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \tag{7}$$

$$D = \frac{\sqrt{2 \cdot e}}{\gamma \cdot \sqrt{\frac{\omega \cdot \mu r \cdot \mu o}{\rho}}} \tag{8}$$

Sendo:

γ = 1,7811 (constante de Euler-Mascheroni)

e = 2,718282 (constante matemática)

As equações 2, 3, 4 e 5 representam as impedâncias próprias e mútuas de retorno pelo solo, determinadas por F. Pollaczek [30].

As equações em (1) podem ser reescritas conforme abaixo:

$$\begin{aligned} \mathbf{E_A} &= \mathbf{I_{bA}} \cdot \mathbf{Z_{bAbA}} + \mathbf{I_{bB}} \cdot \mathbf{Z_{bAbB}} + \ldots + \mathbf{I_{bN}} \cdot \mathbf{Z_{bAbN}} \\ \mathbf{E_B} &= \mathbf{I_{bA}} \cdot \mathbf{Z_{bAbB}} + \mathbf{I_{bB}} \cdot \mathbf{Z_{bBbB}} + \ldots + \mathbf{I_{bN}} \cdot \mathbf{Z_{bBbN}} \\ &\vdots \\ \mathbf{E_N} &= \mathbf{I_{bA}} \cdot \mathbf{Z_{bAbN}} + \mathbf{I_{bB}} \cdot \mathbf{Z_{bBbN}} + \ldots + \mathbf{I_{bN}} \cdot \mathbf{Z_{bNbN}} \end{aligned} \tag{9}$$

As correntes dos condutores dos cabos são calculadas em função da potência e da tensão de operação da linha.

$$I_c = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} \cdot 10^3 \tag{10}$$

Para um sistema equilibrado, as correntes dos condutores apresentam mesma magnitude e são defasadas de 120º entre si. Por convenção, as fases serão consideradas conforme abaixo:

$$\begin{aligned} \mathbf{I_{cA}} &= I_c \\ \mathbf{I_{cB}} &= I_c \cdot \boldsymbol{\alpha} \\ \mathbf{I_{cC}} &= I_c \cdot \boldsymbol{\alpha}^{\mathbf{2}} \end{aligned} \tag{11}$$

onde:

$$\boldsymbol{\alpha} = -\frac{1}{2} + \mathrm{j}\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{12}$$

Como as correntes dos condutores são conhecidas, $\mathbf{E_n}$ pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\mathbf{E_n} = -(\mathbf{I_{cA}} \cdot \mathbf{Z_{cAbn}} + \mathbf{I_{cB}} \cdot \mathbf{Z_{cBbn}} + \ldots + \mathbf{I_{cn}} \cdot \mathbf{Z_{cnbn}} + \mathbf{I_{cN}} \cdot \mathbf{Z_{cNbn}}) \tag{13}$$

Isolando-se as correntes induzidas nas blindagens na equação (9), calcula-se a corrente induzida na blindagem do cabo “n” pela seguinte equação:

$$\mathbf{I_{bn}} = \frac{\begin{bmatrix} \mathbf{Z_{bAbA}} & \mathbf{Z_{bAbB}} & \cdots & \mathbf{E_A} & \cdots & \mathbf{Z_{bAbN}} & \mathbf{Z_{bAb0}} \\ \mathbf{Z_{bAbB}} & \mathbf{Z_{bBbB}} & \cdots & \mathbf{E_B} & \cdots & \mathbf{Z_{bBbN}} & \mathbf{Z_{bBb0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{bAbn}} & \mathbf{Z_{bBbn}} & \cdots & \mathbf{E_n} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbN}} & \mathbf{Z_{bnb0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{bAbN}} & \mathbf{Z_{bBbN}} & \cdots & \mathbf{E_N} & \cdots & \mathbf{Z_{bNbN}} & \mathbf{Z_{bNb0}} \\ \mathbf{Z_{bAb0}} & \mathbf{Z_{bBb0}} & \cdots & \mathbf{E_0} & \cdots & \mathbf{Z_{bNb0}} & \mathbf{Z_{b0b0}} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \mathbf{Z_{bAbA}} & \mathbf{Z_{bAbB}} & \cdots & \mathbf{Z_{bAbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bAbN}} & \mathbf{Z_{bAb0}} \\ \mathbf{Z_{bAbB}} & \mathbf{Z_{bBbB}} & \cdots & \mathbf{Z_{bBbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bBbN}} & \mathbf{Z_{bBb0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{bAbn}} & \mathbf{Z_{bBbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbN}} & \mathbf{Z_{bnb0}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{bAbN}} & \mathbf{Z_{bBbN}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbN}} & \cdots & \mathbf{Z_{bNbN}} & \mathbf{Z_{bNb0}} \\ \mathbf{Z_{bAb0}} & \mathbf{Z_{bBb0}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnb0}} & \cdots & \mathbf{Z_{bNb0}} & \mathbf{Z_{b0b0}} \end{bmatrix}} \tag{14}$$

A corrente total que gera o campo magnético é dada por:

$$\mathbf{I_n} = \mathbf{I_{cn}} + \mathbf{I_{bn}} \tag{15}$$

A figura 45 representa um filamento condutor infinitamente longo, que transporta uma determinada corrente. Em qualquer plano perpendicular em relação ao condutor, o campo magnético é dado por:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{I}}{2 \cdot \pi \cdot r} \tag{16}$$

Assumindo-se a permeabilidade magnética relativa do meio igual a 1, a equação (16) reduz para a seguinte equação:

$$\mathbf{B} = \frac{0{,}2 \cdot \mathbf{I}}{r} \tag{17}$$

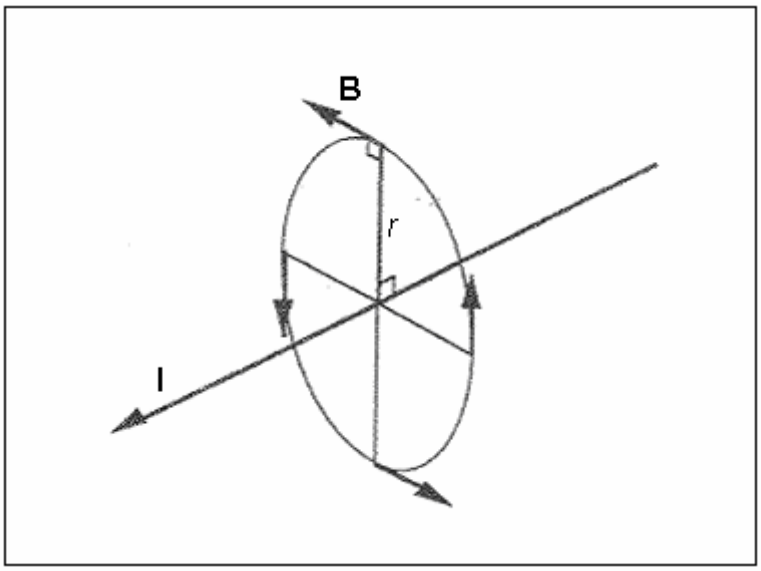

Figura 45 – Campo magnético gerado por um filamento condutor infinitamente longo

A figura 46 representa um sistema de N cabos enterrados a uma profundidade d_n.

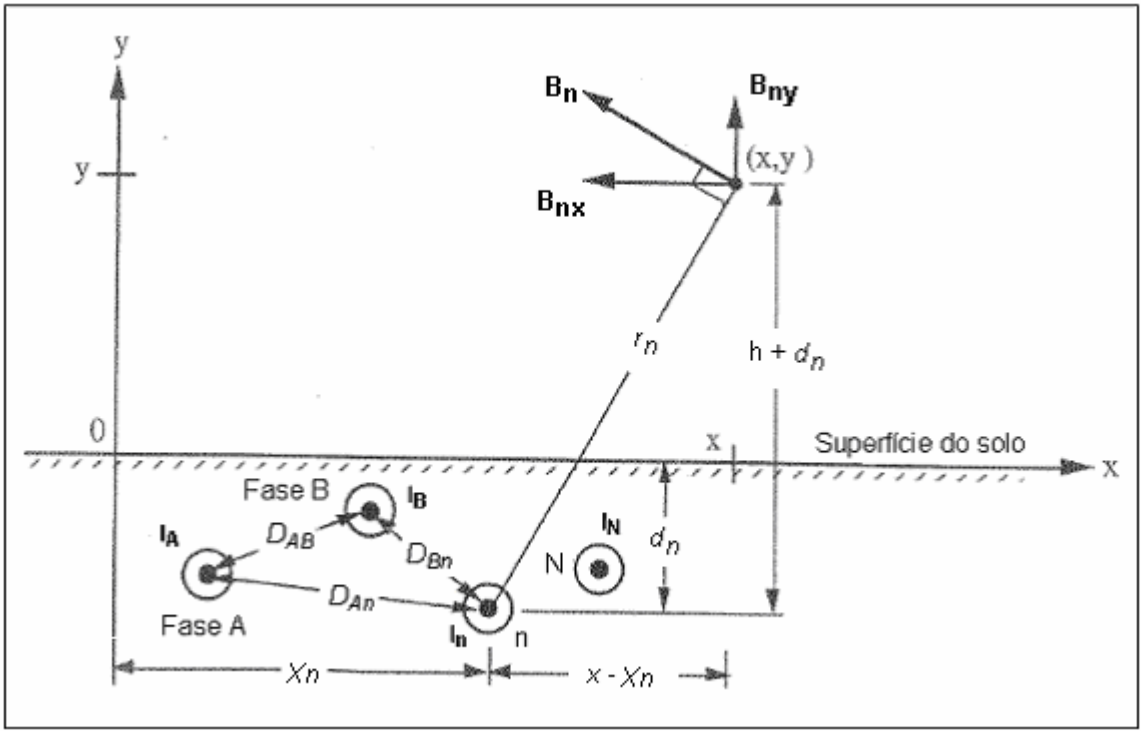

Figura 46 – Esquema de sistema subterrâneo para cálculo do campo magnético

O campo magnético num ponto (x,y) do espaço, gerado pela corrente circulante em um cabo, é dado por:

$$\mathbf{B_n} = \frac{0{,}2 \cdot \mathbf{I_n}}{r_n} \tag{18}$$

As componentes de $\mathbf{B_n}$ nas direções x e y são dadas por:

$$\mathbf{B_{nx}} = -\frac{0{,}2 \cdot I_n \cdot (\mathrm{h} + d_n)}{(\mathrm{h} + d_n)^2 + (x - X_n)^2} \tag{19}$$

$$\mathbf{B_{ny}} = \frac{0{,}2 \cdot I_n \cdot (x - X_n)}{(\mathrm{h} + d_n)^2 + (x - X_n)^2} \tag{20}$$

O campo magnético total no ponto (x,y) é dado pela somatória dos campos magnéticos gerados por todos os cabos do sistema:

$$\mathbf{B_x} = \sum_{n=1}^{N} \mathbf{B_{nx}} \tag{21}$$

$$\mathbf{B_y} = \sum_{n=1}^{N} \mathbf{B_{ny}} \tag{22}$$

Os campos magnéticos podem ser decompostos em suas componentes reais e imaginárias conforme abaixo:

$$\mathbf{B_x} = B_{xr} + \mathrm{j}B_{xi} \tag{23}$$

$$\mathbf{B_y} = B_{yr} + \mathrm{j}B_{yi} \tag{24}$$

O vetor $\mathbf{B_x}$ na figura 47 pode ser visualizado como um vetor que rotaciona no plano (xj) a uma velocidade angular ω e com ângulo de fase ϕ_x. A projeção deste vetor no plano (xy) resulta num vetor $\mathbf{B_{xr}}$, e a projeção no plano (yj), resulta num vetor $\mathbf{B_{xi}}$. Similarmente para o vetor $\mathbf{B_y}$, a projeção no plano (xy) resulta num vetor $\mathbf{B_{yr}}$ e no plano (xj) num vetor $\mathbf{B_{yi}}$. O vetor soma de $\mathbf{B_{xr}}$ e $\mathbf{B_{yr}}$ corresponde ao vetor **B**, que rotaciona no plano (xy) formando uma superfície elíptica.

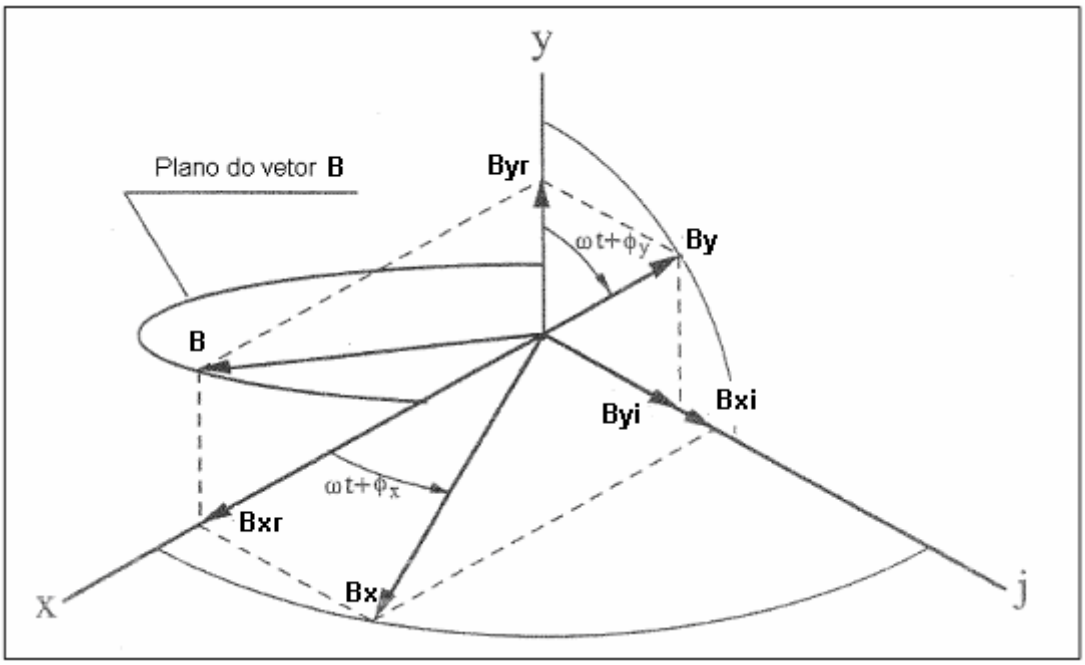

Figura 47 – Diagrama vetorial para o cálculo do campo magnético máximo

O máximo valor do vetor **B** é calculado conforme a seguinte equação:

$$B = (B_{xr})^2 + (B_{yr})^2 \tag{25}$$

onde:

$$B_{xr} = |\mathbf{B_x}| \cdot \cos(\omega t + \phi_x) = |\mathbf{B_x}| \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\phi_x) - |\mathbf{B_x}| \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\phi_x) \tag{26}$$

$$B_{yr} = |\mathbf{B_y}| \cdot \cos(\omega t + \phi_y) = |\mathbf{B_y}| \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\phi_y) - |\mathbf{B_y}| \cdot \text{sen}(\omega t) \cdot \text{sen}(\phi_y) \tag{27}$$

Sendo:

$$\cos(\phi_x) = \frac{B_{xr}}{|\mathbf{B_x}|} \tag{28}$$

$$\text{sen}(\phi_x) = \frac{B_{xi}}{|\mathbf{B_x}|} \tag{29}$$

$$\cos(\phi_y) = \frac{B_{yr}}{|\mathbf{B_y}|} \tag{30}$$

$$\text{sen}(\phi_y) = \frac{B_{yi}}{|\mathbf{B_y}|} \tag{31}$$

Substituindo-se as equações (28), (29), (30) e (31) nas equações (26) e (27), resulta:

$$B_{xr} = B_{xr} \cdot \cos(\omega t) - B_{xi} \cdot \text{sen}(\omega t) \tag{32}$$

$$B_{yr} = B_{yr} \cdot \cos(\omega t) - B_{yi} \cdot \text{sen}(\omega t) \tag{33}$$

Substituindo-se as equações (32) e (33) na equação (25), resulta:

$$B = \sqrt{\left[B_{xr} \cdot \cos(\omega t) - B_{xi} \cdot \text{sen}(\omega t)\right]^2 + \left[B_{yr} \cdot \cos(\omega t) - B_{yi} \cdot \text{sen}(\omega t)\right]^2} \tag{34}$$

Para determinar o máximo valor de *B*, deve-se conhecer o valor de ωt, o qual é obtido derivando-se a equação (34) em relação a ωt e igualando-se a zero.
Logo:

$$\frac{dB}{d(\omega t)} = 0 = \left[\text{Tan}(\omega t)\right]^2 - M \cdot \text{Tan}(\omega t) - 1 \tag{35}$$

onde:

$$M = \frac{(B_{xr})^2 - (B_{xi})^2 + (B_{yr})^2 - (B_{yi})^2}{B_{xr} \cdot B_{xi} + B_{yr} \cdot B_{yi}} \tag{36}$$

Portanto:

$$\omega t = \arctan\left[\frac{M}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1}\right] \tag{37}$$

Substituindo-se os valores de ωt obtidos da equação (37) na equação (34), determinam-se os valores mínimo e máximo de *B*. Caso sejam utilizados os valores eficazes das correntes, os valores do campo magnético calculados também são eficazes. Como o valor mínimo de B raramente é nulo, é mais apropriado considerar o campo magnético efetivo calculado conforme a seguinte equação:

$$B_{ef} = \sqrt{(B_{\max})^2 + (B_{\min})^2} \tag{38}$$

A2 Formulário na forma de matriz

O formulário apresentado neste item é referente às linhas aterradas pelo método “both ends bonding”. Para sistemas aterrados pelos métodos “single-point bonding” ou “cross-bonding”, as correntes circulantes nas blindagens são nulas.

As impedâncias mútuas entre condutores e blindagens são representadas por uma matriz quadrada:

$$[\mathbf{Z_{cb}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z_{cAbA}} & \mathbf{Z_{cAbB}} & \cdots & \mathbf{Z_{cAbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{cAbN}} \\ \mathbf{Z_{cAbB}} & \mathbf{Z_{cBbB}} & \cdots & \mathbf{Z_{cBbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{cBbN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{cAbn}} & \mathbf{Z_{cBbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{cnbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{cnbN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{cAbN}} & \mathbf{Z_{cBbN}} & \cdots & \mathbf{Z_{cnbN}} & \cdots & \mathbf{Z_{cNbN}} \end{bmatrix} \tag{39}$$

As impedâncias próprias das blindagens e mútuas entre blindagens metálicas também são representadas por uma matriz quadrada:

$$[\mathbf{Z_{b}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z_{bAbA}} & \mathbf{Z_{bAbB}} & \cdots & \mathbf{Z_{bAbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bAbN}} \\ \mathbf{Z_{bAbB}} & \mathbf{Z_{bBbB}} & \cdots & \mathbf{Z_{bBbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bBbN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{bAbn}} & \mathbf{Z_{bBbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbn}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{Z_{bAbN}} & \mathbf{Z_{bBbN}} & \cdots & \mathbf{Z_{bnbN}} & \cdots & \mathbf{Z_{bNbN}} \end{bmatrix} \tag{40}$$

As correntes circulantes nos condutores das fases são representadas por uma matriz composta por uma coluna:

$$[\mathbf{I_{c}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{I_{cA}} \\ \mathbf{I_{cB}} \\ \vdots \\ \mathbf{I_{cn}} \\ \vdots \\ \mathbf{I_{cN}} \end{bmatrix} \tag{41}$$

As correntes circulantes nos condutores das fases A, B e C são determinadas através das equações (10), (11) e (12).

As tensões induzidas nas blindagens são calculadas pela seguinte equação:

$$[\mathbf{E_b}] = -[\mathbf{Z_{cb}}] \cdot [\mathbf{I_c}] \tag{42}$$

As correntes circulantes nas blindagens dos cabos são calculadas pela seguinte equação:

$$[\mathbf{I_b}] = [\mathbf{Z_b}]^{-1} \cdot [\mathbf{E_b}] \tag{43}$$

As correntes resultantes que geram campo magnético são calculadas pela seguinte equação:

$$[\mathbf{I_n}] = [\mathbf{I_c}] + [\mathbf{I_b}] \tag{44}$$

Para sistemas aterrados pelos métodos “single-point bonding” ou “cross-bonding”, o campo magnético é gerado pelas correntes dos condutores das fases, ou seja:

$$[\mathbf{I_n}] = [\mathbf{I_c}] \tag{45}$$

Após determinar as correntes resultantes para cada cabo da linha, o campo magnético num determinado ponto de interesse é calculado seguindo o procedimento do item anterior deste apêndice.

A3 Equações simplificadas

Como alternativa à metodologia aplicada neste trabalho, equações simplificadas podem ser utilizadas para o cálculo do campo magnético de LSAT composta por um circuito que apresenta disposição plana horizontal ou triangular.

A equação (46) permite o cálculo de campo magnético eficaz para um circuito com disposição plano horizontal:

$$B_{ef} = 0{,}2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{s \cdot I}{(h+d)^2 + x^2} \tag{46}$$

A equação (47) permite o cálculo de campo magnético para um circuito com disposição triangular:

$$B_{ef} = \frac{0{,}2 \cdot \sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{s \cdot I}{\left(h + d + \frac{s}{\sqrt{3}}\right)^2 + x^2} \tag{47}$$

As equações (46) e (47) são válidas para os casos em que a distância entre a fonte e ponto de interesse é muito maior que o espaçamento entre fases.

APÊNDICE B – EXEMPLOS DE CÁLCULO DE CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS DE ALTA TENSÃO

Neste apêndice serão apresentados dois exemplos de aplicação da metodologia de cálculo descrita no apêndice A. No primeiro exemplo a metodologia será aplicada numa linha constituída por um circuito com disposição triangular e aterramento pelo método “both ends bonding”. No segundo exemplo a metodologia será aplicada numa linha constituída por dois circuitos com disposição plana vertical e aterramento pelo método “cross-bonding”.

B1 Um circuito com disposição triangular e aterramento “both ends bonding”

A figura 48 ilustra os parâmetros elétricos e geométricos para o cálculo do campo magnético.

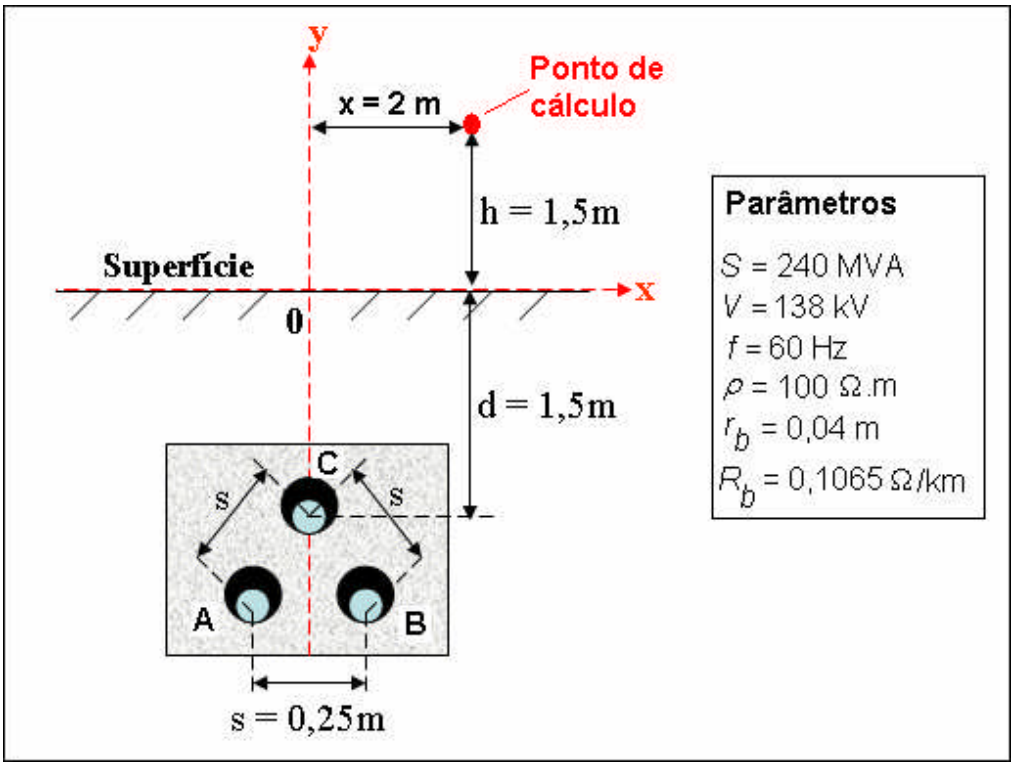

Figura 48 – Exemplo de cálculo 1 – Um circuito com disposição triangular e aterramento “both ends bonding”

Através da equação (6), calcula-se a distância entre centros de cabos.

$$D_{AB} = D_{AC} = D_{BC} = 0{,}25 \text{ (m)}$$

Através das equações (2) e (3), determinam-se as impedâncias mútuas entre condutores e blindagens dos cabos. Agrupam-se os valores obtidos na matriz de impedâncias mútuas entre condutores e blindagens conforme (39).

$$[\mathbf{Z_{cb}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z_{cAbA}} & \mathbf{Z_{cAbB}} & \mathbf{Z_{cAbC}} \\ \mathbf{Z_{cAbB}} & \mathbf{Z_{cBbB}} & \mathbf{Z_{cBbC}} \\ \mathbf{Z_{cAbC}} & \mathbf{Z_{cBbC}} & \mathbf{Z_{cCbC}} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z_{cb}}] = \begin{bmatrix} 0{,}059 + j0{,}725 & 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}059 + j0{,}587 \\ 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}059 + j0{,}725 & 0{,}059 + j0{,}587 \\ 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}059 + j0{,}725 \end{bmatrix} \text{ (}\Omega\text{/km)}$$

Através das equações (4) e (5), determinam-se as impedâncias próprias das blindagens e mútuas entre blindagens dos cabos. Agrupam-se os valores obtidos na matriz de impedâncias próprias das blindagens e mútuas entre blindagens metálicas conforme (40).

$$[\mathbf{Z_b}] = \begin{bmatrix} \mathbf{Z_{bAbA}} & \mathbf{Z_{bAbB}} & \mathbf{Z_{bAbC}} \\ \mathbf{Z_{bAbB}} & \mathbf{Z_{bBbB}} & \mathbf{Z_{bBbC}} \\ \mathbf{Z_{bAbC}} & \mathbf{Z_{bBbC}} & \mathbf{Z_{bCbC}} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{Z_b}] = \begin{bmatrix} 0{,}166 + j0{,}725 & 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}059 + j0{,}587 \\ 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}166 + j0{,}725 & 0{,}059 + j0{,}587 \\ 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}059 + j0{,}587 & 0{,}166 + j0{,}725 \end{bmatrix} \text{ (}\Omega\text{/km)}$$

Através da equação (10), calcula-se a corrente nominal dos condutores dos cabos.

$$I_C = 1004 \text{ (A)}$$

Define-se o sistema simétrico e equilibrado através de (11) e (12). Agrupam-se os valores das correntes na matriz das correntes circulantes nos condutores das fases conforme (41).

$$[\mathbf{I_c}] = \begin{bmatrix} \mathbf{I_{cA}} \\ \mathbf{I_{cB}} \\ \mathbf{I_{cC}} \end{bmatrix} \qquad [\mathbf{I_c}] = \begin{bmatrix} 1004 \\ -502 + j869{,}6 \\ -502 - j869{,}6 \end{bmatrix} \text{ (A)}$$

Através da equação (42), calculam-se as tensões induzidas nas blindagens metálicas dos cabos.

$$[\mathbf{E_b}] = \begin{bmatrix} \mathbf{E_{bA}} \\ \mathbf{E_{bB}} \\ \mathbf{E_{bC}} \end{bmatrix} \qquad [\mathbf{E_b}] = \begin{bmatrix} -0{,}02 - j138{,}74 \\ 120{,}13 + j69{,}36 \\ -120{,}17 + j69{,}36 \end{bmatrix} \text{ (V)}$$

Calculam-se as correntes circulantes nas blindagens metálicas dos cabos através da equação (43).

$$[\mathbf{I_b}] = \begin{bmatrix} \mathbf{I_{bA}} \\ \mathbf{I_{bB}} \\ \mathbf{I_{bC}} \end{bmatrix} \qquad [\mathbf{I_b}] = \begin{bmatrix} -629{,}9 - j485{,}5 \\ 735{,}4 - j302{,}75 \\ -105{,}5 + j788{,}24 \end{bmatrix} \text{ (A)}$$

Através da equação (44), calculam-se as correntes resultantes que geram campo magnético.

$$[\mathbf{I_n}] = \begin{bmatrix} \mathbf{IA} \\ \mathbf{IB} \\ \mathbf{IC} \end{bmatrix} \qquad [\mathbf{I_n}] = \begin{bmatrix} 374{,}2 - j485{,}5 \\ 233{,}35 + j566{,}8 \\ -607{,}56 - j81{,}32 \end{bmatrix} \text{ (A)}$$

Calculam-se as componentes do campo magnético nas direções x e y conforme as equações (19) e (20) respectivamente.

$$\mathbf{B_{Ax}} = -16{,}2 + j21{,}02 \ \ (\mu\text{T})$$

$$\mathbf{B_{Bx}} = -10{,}83 - j26{,}31 \ (\mu T)$$

$$\mathbf{B_{Cx}} = 28{,}04 + j3{,}75 \ (\mu T)$$

$$\mathbf{B_{Ay}} = 10{,}7 - j13{,}88 \ (\mu T)$$

$$\mathbf{B_{By}} = 6{,}31 + j15{,}33 \ (\mu T)$$

$$\mathbf{B_{Cy}} = -18{,}69 - j2{,}5 \ (\mu T)$$

Através das equações (21) e (22), determinam-se as componentes resultantes do campo magnético nas direções x e y.

$$\mathbf{B_x} = \mathbf{B_{Ax}} + \mathbf{B_{Bx}} + \mathbf{B_{Cx}} \qquad \mathbf{B_x} = 1 - j1{,}54 \ (\mu T)$$

$$\mathbf{B_y} = \mathbf{B_{Ay}} + \mathbf{B_{By}} + \mathbf{B_{Cy}} \qquad \mathbf{B_y} = -1{,}68 - j1{,}05 \ (\mu T)$$

Através das equações (23) e (24), isola-se a parte real e a parte imaginária destas componentes resultantes.

$$B_{xr} = 1 \ (\mu T)$$

$$B_{xi} = -1{,}54 \ (\mu T)$$

$$B_{yr} = -1{,}68 \ (\mu T)$$

$$B_{yi} = -1{,}05 \ (\mu T)$$

Calcula-se o coeficiente *M* através da equação (36).

$$M = 1{,}81$$

Através da equação (37), determinam-se os valores máximo e mínimo de ωt.

$$\omega t_{\min} = -0{,}42 \ (\text{rad/s})$$

$$\omega t_{\max} = 1{,}15 \ (\text{rad/s})$$

Substituindo-se os valores de ωt obtidos da equação (37) na equação (34), determinam-se os valores mínimo e máximo de *B*.

$$B_{\min} = 1{,}84 \ (\mu\text{T})$$

$$B_{\max} = 1{,}99 \ (\mu\text{T})$$

Finalmente, calcula-se o campo magnético eficaz no ponto de interesse através da equação (38).

$$B_{ef} = 2{,}7 \ (\mu\text{T})$$

Para um circuito com disposição triangular, o campo magnético eficaz pode ser calculado de forma simplificada pela equação (47). Antes disso, é necessário obter o módulo da corrente resultante que gera campo magnético.

$$[\mathbf{I_n}] = \begin{bmatrix} 374{,}2 - j485{,}5 \\ 233{,}35 + j566{,}8 \\ -607{,}55 - j81{,}32 \end{bmatrix} \ (\text{A})$$

$$\text{I} = |\mathbf{IA}| = |\mathbf{IB}| = |\mathbf{IC}| = 613 \ (\text{A})$$

$$B_{ef} = 2{,}7 \ (\mu\text{T})$$

B2 Dois circuitos com disposição plana vertical e aterramento "cross-bonding"

A figura 49 ilustra os parâmetros elétricos e geométricos para o cálculo do campo magnético.

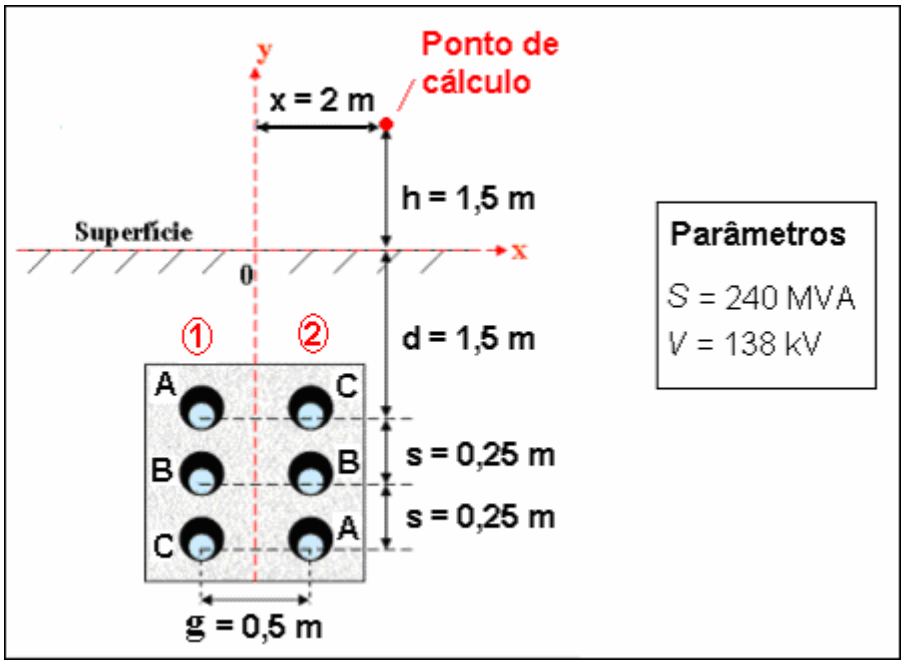

Figura 49 – Exemplo de cálculo 2 – Dois circuitos com disposição plana vertical e aterramento "cross-bonding"

Através da equação (10), calcula-se a corrente nominal dos condutores dos cabos.

$$I_c = 1004 \ \text{(A)}$$

Defini-se o sistema simétrico e equilibrado através de (11) e (12).

$$\mathbf{I_{cA1}} = \mathbf{I_{cA2}} = 1004 \ \text{(A)}$$

$$\mathbf{I_{cB1}} = \mathbf{I_{cB2}} = -502 + j869{,}6 \ \text{(A)}$$

$$\mathbf{I_{cC1}} = \mathbf{I_{cC2}} = -502 - j869{,}6 \ \text{(A)}$$

Para linhas com aterramento "cross-bonding", não há corrente circulante nas blindagens metálicas dos cabos. De acordo com a equação (15), a corrente total que

gera o campo magnético é a própria corrente circulante nos condutores dos cabos isolados.

$$\mathbf{IA1} = \mathbf{IA2} = 1004 \ \ (\mathrm{A})$$

$$\mathbf{IB1} = \mathbf{IB2} = -502 + \mathrm{j}869{,}6 \ \ (\mathrm{A})$$

$$\mathbf{IC1} = \mathbf{IC2} = -502 - \mathrm{j}869{,}6 \ \ (\mathrm{A})$$

Calculam-se as componentes do campo magnético nas direções x e y conforme as equações (19) e (20) respectivamente.

$$\mathbf{B_{A1x}} = -42{,}84 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{B1x}} = 20{,}89 - \mathrm{j}36{,}17 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{C1x}} = 20{,}3 + \mathrm{j}35{,}16 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{A2x}} = -45{,}9 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{B2x}} = 23{,}95 - \mathrm{j}41{,}48 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{C2x}} = 24{,}97 + \mathrm{j}43{,}25 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{A1y}} = 32{,}13 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{B1y}} = -14{,}46 + \mathrm{j}25{,}04 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{C1y}} = -13{,}05 - \mathrm{j}22{,}6 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{A2y}} = 22{,}95 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{B2y}} = -12{,}9 + \mathrm{j}22{,}34 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_{C2y}} = -14{,}57 - \mathrm{j}25{,}23 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

Através das equações (21) e (22), determinam-se as componentes resultantes do campo magnético nas direções x e y.

$$\mathbf{B_x} = \mathbf{B_{A1x}} + \mathbf{B_{B1x}} + \mathbf{B_{C1x}} + \mathbf{B_{A2x}} + \mathbf{B_{B2x}} + \mathbf{B_{C2x}}$$

$$\mathbf{B_x} = 1{,}36 + \mathrm{j}0{,}75 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

$$\mathbf{B_y} = \mathbf{B_{A1y}} + \mathbf{B_{B1y}} + \mathbf{B_{C1y}} + \mathbf{B_{A2y}} + \mathbf{B_{B2y}} + \mathbf{B_{C2y}}$$

$$\mathbf{B_y} = 0{,}11 - \mathrm{j}0{,}45 \ \ (\mu\mathrm{T})$$

Através das equações (23) e (24), isola-se a parte real e a parte imaginária destas componentes resultantes.

$$B_{xr} = 1{,}36 \ (\mu\text{T})$$

$$B_{xi} = 0{,}75 \ (\mu\text{T})$$

$$B_{yr} = 0{,}11 \ (\mu\text{T})$$

$$B_{yi} = -0{,}45 \ (\mu\text{T})$$

Calcula-se o coeficiente *M* através da equação (36).

$$M = 1{,}12$$

Através da equação (37), determinam-se os valores máximo e mínimo de ωt.

$$\omega t_{\text{min}} = -0{,}53 \ (\text{rad/s})$$

$$\omega t_{\text{max}} = 1{,}04 \ (\text{rad/s})$$

Substituindo-se os valores de ωt obtidos da equação (37) na equação (34), determinam-se os valores mínimo e máximo de *B*.

$$B_{\text{min}} = 0{,}45 \ (\mu\text{T})$$

$$B_{\text{max}} = 1{,}56 \ (\mu\text{T})$$

Finalmente, calcula-se o campo magnético eficaz no ponto de interesse através da equação (38).

$$B_{ef} = 1{,}62 \ (\mu\text{T})$$

APÊNDICE C – CURVA CAMPO MAGNÉTICO VERSUS RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

A resistividade elétrica do solo é um parâmetro utilizado para calcular as impedâncias próprias e mútuas entre condutores e blindagens metálicas dos cabos isolados, com retorno pelo solo. Essas impedâncias são calculadas apenas para linhas com aterramento pelo método “both ends bonding”, ou seja, aterramento em ambos os extremos das linhas.

A figura 50 mostra a curva do campo magnético em função da variação da resistividade elétrica do solo para diversas condições de instalação das linhas. Os valores adotados da resistividade elétrica do solo foram baseados na norma ABNT NBR 7117 [28].

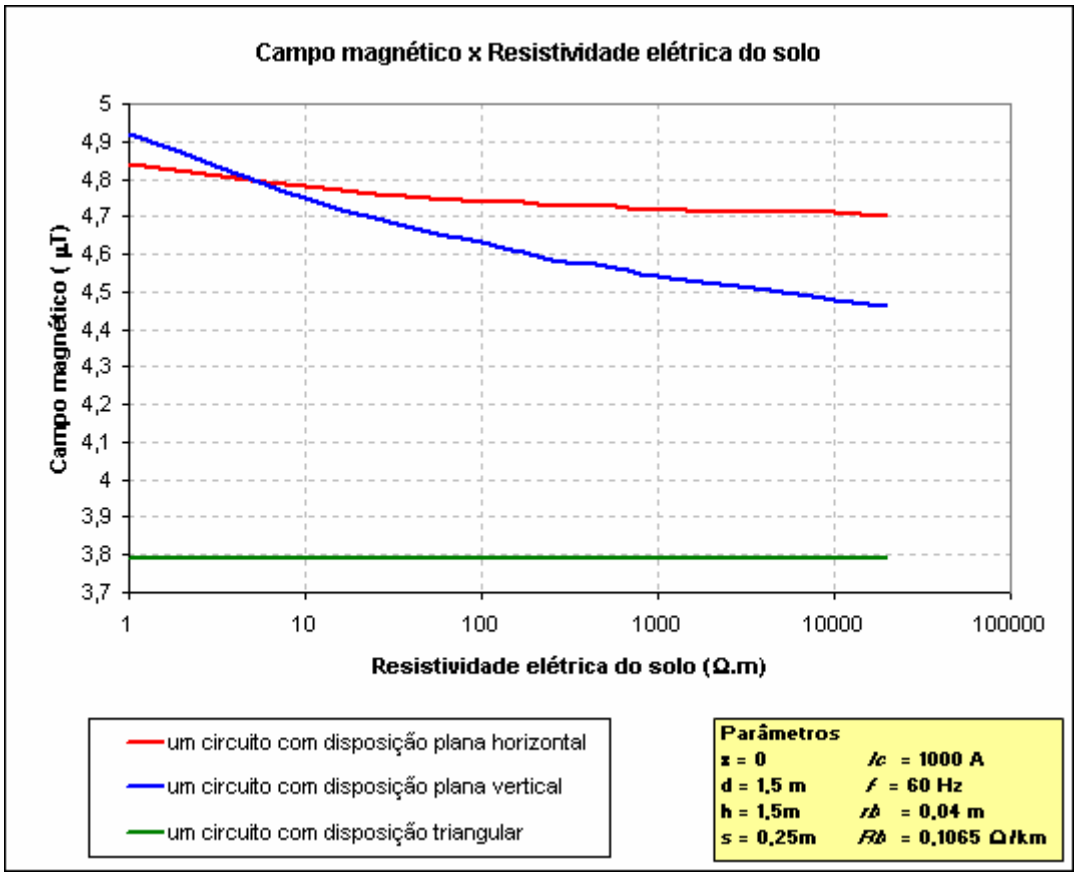

Figura 50 – Curva campo magnético versus resistividade elétrica do solo

APÊNDICE D – CURVA CAMPO MAGNÉTICO VERSUS RESISTÊNCIA ELÉTRICA EM CORRENTE ALTERNADA DA BLINDAGEM METÁLICA DO CABO ISOLADO

A resistência elétrica em corrente alternada da blindagem metálica é um parâmetro utilizado para calcular as impedâncias próprias das blindagens metálicas dos cabos isolados, com retorno pelo solo. Essas impedâncias são calculadas apenas para linhas com aterramento pelo método “both ends bonding”, ou seja, aterramento em ambos os extremos das linhas.

A figura 51 mostra a curva do campo magnético em função da variação da resistência elétrica em corrente alternada da blindagem metálica para diversas condições de instalação das linhas. Os valores adotados da resistência elétrica são referentes às blindagens a fios de cobre com secções variando de 25 mm² até 300 mm² e temperatura de operação fixada em 80ºC.

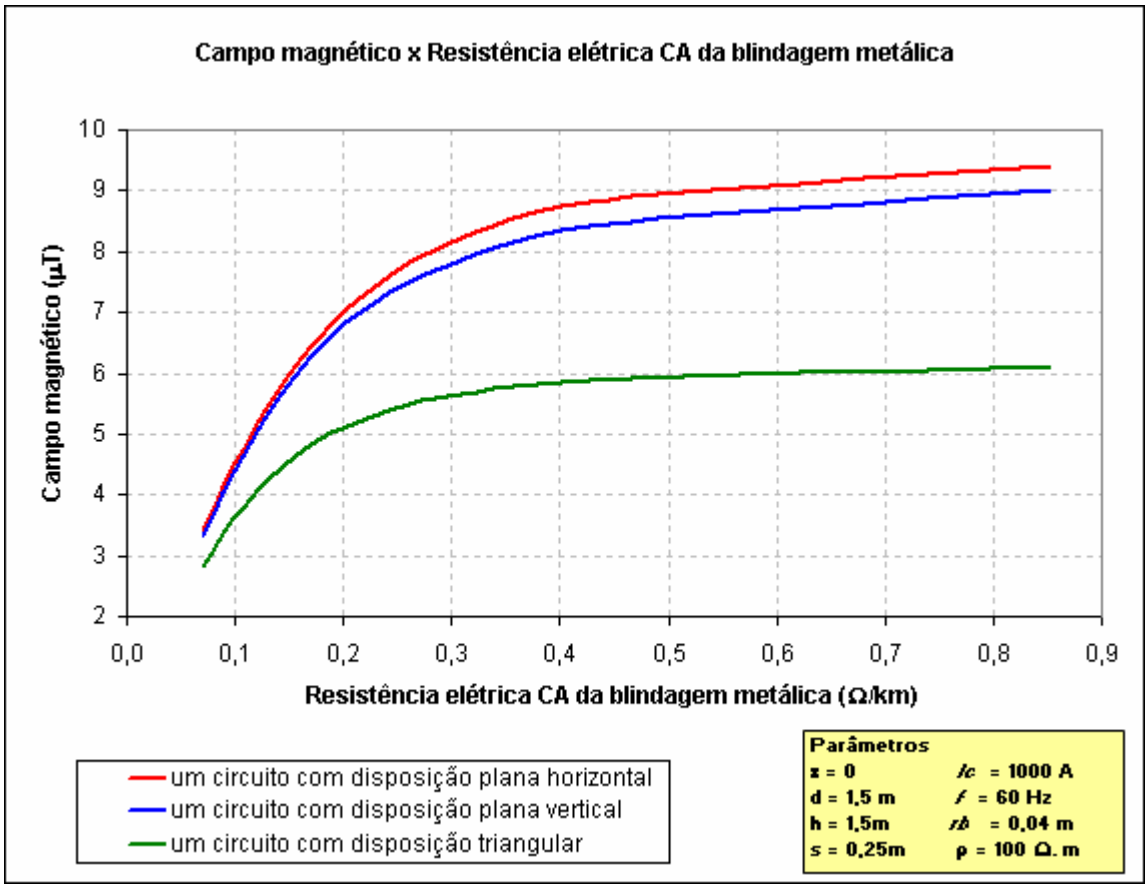

Figura 51 – Curva campo magnético versus resistência elétrica CA da blindagem metálica do cabo

APÊNDICE E – PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS EM BLINDAGENS FERROMAGNÉTICAS

De acordo com [19], os principais materiais utilizados como blindagem ferromagnética podem ser classificados como materiais de baixo custo e materiais de alto custo. Os materiais de baixo custo referem-se ao ferro, ao aço magnético, às ligas de baixo carbono e às ligas de ferro-silício (material com grãos orientados e não orientados). Já os materiais de alto custo correspondem às ligas de cobalto, mumetal e permalloy. Por apresentarem permeabilidade magnética elevada, a utilização de materiais de alto custo é justificada em locais onde é necessário maior precisão na mitigação do campo magnético.

A figura 52 mostra as curvas de magnetização típicas de materiais geralmente utilizados como blindagens ferromagnéticas.

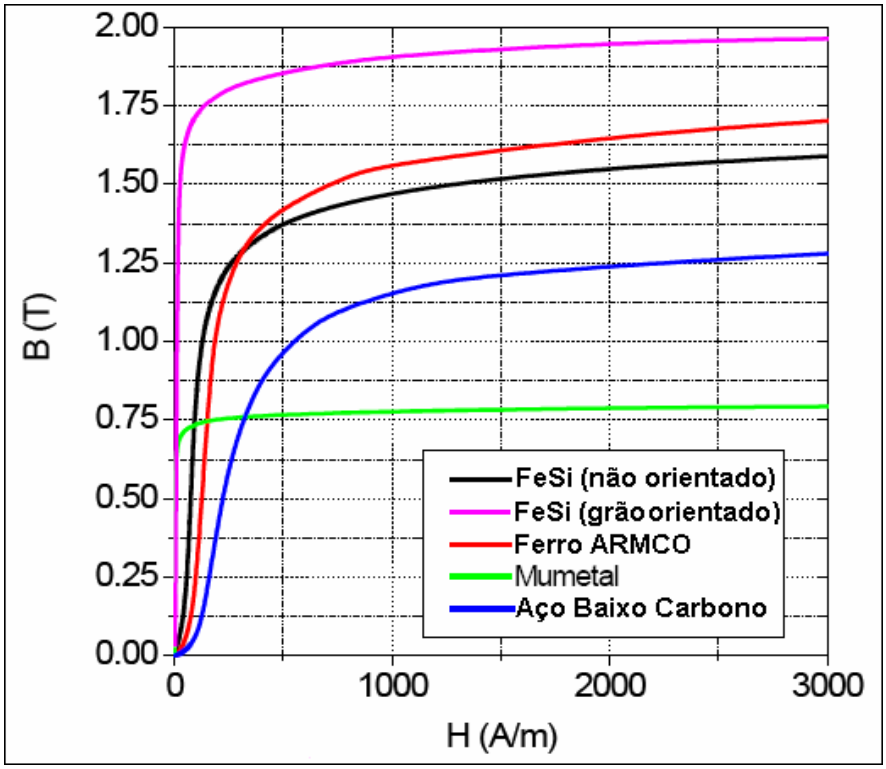

Figura 52 – Curva de magnetização de materiais ferromagnéticos normalmente empregados em blindagens para mitigação do campo magnético

Em blindagens com geometria fechada ou blindagens na presença de níveis elevados de campo magnético, pode ocorrer redução da eficiência da blindagem por

saturação. Nestes casos, a eficiência da blindagem depende essencialmente da parte inicial das características magnéticas dos materiais, ou seja, antes do ponto da curva em que a permeabilidade magnética do material atinge seu valor máximo (Regiões de Rayleigh e linear). As propriedades dos principais materiais ferromagnéticos podem ser visualizadas na tabela.

Tabela 7 – Propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos utilizados como blindagens

Material	Permeabilidade relativa inicial	Permeabilidade relativa máxima	Campo coercitivo [A/m]
Ferro (99,8% pureza)	150	5000	80
Ferro (99,95% pureza)	10000	200000	4
Aço (0,9% C)	50	100	5600
Aço Baixo Carbono	300-400	2000	50-100
Aço Ultra Baixo Carbono	250	1100	150
Aço-silício (Si 3%) – Grão orientado	-	40000	8
Permalloy 78	8000	100000	4
Superpermalloy	100000	1000000	0,16
Cobalto (99% de pureza)	70	250	800
Níquel (99% de pureza)	110	600	56

Os materiais ferromagnéticos também apresentam condutividade elétrica, a qual contribui para a eficiência das blindagens ferromagnéticas na mitigação do campo magnético. A tabela mostra os valores de condutividade elétrica para alguns materiais ferromagnéticos.

Tabela 8 – Condutividade elétrica de alguns materiais ferromagnéticos

Material	Condutividade elétrica (MS/m)
Ferro	10
Aço	6
Aço (Grão orientado)	2
Permalloy	1,8

APÊNDICE F – CÁLCULO DA PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

O cálculo da profundidade de penetração serve para determinar a espessura máxima das blindagens condutivas levando-se em consideração a eficiência na mitigação do campo magnético.

No caso de materiais condutivos puros, a permeabilidade μ é igual a permeabilidade magnética do espaço livre.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \tag{48}$$

Permeabilidade do espaço livre: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

APÊNDICE G – PRINCIPAIS MATERIAIS UTILIZADOS EM BLINDAGENS CONDUTIVAS

De acordo com [19], os principais materiais utilizados como blindagens condutivas são o cobre e o alumínio. Estes materiais são puramente condutivos, ou seja, a permeabilidade μ destes materiais é igual a permeabilidade magnética do espaço livre. A tabela mostra os valores de condutividade elétrica do cobre e do alumínio.

Tabela 9 – Condutividade elétrica dos principais materiais condutivos

Material	Condutividade elétrica (MS/m)
Cobre	59
Alumínio	36

APÊNDICE H – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

Certificate of Calibration

The calibration of this instrument was controlled by documented procedures as outlined on the attached calibration report using equipment traceable to N.I.S.T. , ..ISO 17025, and ANIZ540-1 COMPLIANT

Instrument Model : Emdex II

Frequency : 60

Serial Number : 3234

Date of Calibration : August - 25 - 2008

Re-Calibration suggested at one year from above date.

etc. Electronic Service & Consulting Services Established 1981

ENERTECH Consultants

ENERTECH Consultants
494 Salmar Ave. Suite 200
Campbell, California 95008
(408) 866-7266 FAX : (408) 866-7279

Calibration Inspector