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

# PROJETO OTIMIZADO DE *LOOPS* PARA A MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHAS E REDES SUBTERRÂNEAS

Diogo Sampaio César Souza Belo Horizonte 2015

#### DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 879

#### PROJETO OTIMIZADO DE LOOPS PARA A MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHAS E REDES SUBTERRÂNEAS

#### Diogo Sampaio César Souza

DATA DA DEFESA: 06/08/2015

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

### PROJETO OTIMIZADO DE *LOOPS* PARA A MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO GERADO POR LINHAS E REDES SUBTERRÂNEAS

Diogo Sampaio César Souza

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Hélder de Paula Coorientador: Prof. Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte – MG

Agosto de 2015

S729p	Souza, Diogo Sampaio César. Projeto otimizado de <i>loops</i> para a mitigação do campo magnético gerado por linhas e redes subterrâneas [manuscrito] / Diogo Sampaio César Souza. – 2015. 136 f., enc.: il.
	Orientador: Hélder de Paula. Coorientador: Ivan José da Silva Lopes.
	Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
	Anexos: f. 125-136.
	Bibliografia: f. 121-124.
	<ol> <li>Engenharia elétrica - Teses. 2. Campos magnéticos - Teses.</li> <li>Linhas elétricas subterrâneas - Teses. 4. Blindagem magnética - Teses. I. Paula, Hélder de. II. Lopes, Ivan José da Silva. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</li> </ol>
	CDU: 621.3(043)

Г

"Projeto Otimizado de Loops para a Mitigação do Campo Magnético Gerado por Linhas e Redes Subterrâneas" Diogo Sampaio César Souza Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Aprovada em 06 de agosto de 2015. Por: Prof. Dr. Helder de Paula DEE (UFMG) - Orientador laufopr. Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes DEE (UFMG) - Coorientador the Prof. Dr. Felipe Campelo França Pinto DEE (UFMG) N Pnu Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino DEE (UFMG) Rodrigo Otavio Carneiro Moreira Gerência de Gestão da Expansão de Subestações e Linhas de Distribuição

#### AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a minha querida mãe Rosângela, pois sem você nada disso seria possível. Agradeco por todos seus os sacrificios realizados e, principalmente, pelo o amor incondicional sempre presente na minha vida. Todas as frases são insuficientes para demonstrar minha gratidão, mas é sempre importante dizer muito obrigado. À Deus e ao meu pai Danilo, que mesmo estando no céu, continuou iluminando minha caminhada. Agradeço de maneira muito especial a toda minha família pelo incentivo e apoio fundamental nesse momento importante. Aos meus amigos do colégio, agradeco pela amizade de longa data. Aos meus amigos da faculdade, em especial aos do GEEE, pelo companheirismo e apoio tanto na época de graduação quanto nesta etapa do mestrado. Aos meus amigos do laboratório, um agradecimento especial pelo ótimo ambiente de trabalho e pelas ótimas conversas do dia a dia. Ao meu orientador, Hélder, meu agradecimento mais que especial, pelo incentivo, orientação no desenvolvimento deste trabalho e, sobretudo, por ter se tornado um grande amigo. Ao meu co-orientador Ivan e ao professor José Osvaldo, por todos os ensinamentos e ajudas na execução deste trabalho. Aos professores, Wallace e Glássio, e aos companheiros do LEAT, Sérgio e José Luis, por todo apoio e amizade encontrada em vocês. Ao Engenheiro Rodrigo Moreira, por todo o auxílio e contribuição durante este percurso.

#### RESUMO

A crescente demanda de energia elétrica nos centros urbanos vem ocasionando um aumento de linhas de distribuição e transmissão subterrâneas nesses locais e, consequentemente, de fontes de campos eletromagnéticos de baixa frequência. Isto tem motivado discussões acerca dos problemas causados pela exposição da população a estes campos, tornando mais restritivas as normas e legislações que estabelecem os seus limites. Logo, para algumas situações, faz-se necessária a utilização de blindagens para a mitigação do campo magnético gerado por linhas e redes subterrâneas. Isto posto, tem-se que os objetivos desse estudo foram analisar a técnica de mitigação baseada em loops passivos e implementar um algoritmo de otimização para se determinar as suas melhores configurações. Para isso, foram desenvolvidas metodologias para os cálculos do campo magnético na ausência e na presença da blindagem (problema magnético) e da máxima corrente admissível da linha de transmissão (problema térmico). Os fatores considerados na otimização da configuração dos loops foram a eficácia da blindagem, a perda causada na capacidade de transmissão de corrente da linha e o custo financeiro do material utilizado. Uma vez que os objetivos estipulados no projeto dos loops são conflitantes, técnicas de otimização multiobjetivo foram empregadas para a determinação dos resultados, sendo utilizado no presente trabalho o algoritmo do NSGA-II e o método da Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal. Ao final, são apresentados os conjuntos soluções para a blindagem tanto de um trecho convencional como de uma caixa de emendas de uma linha de transmissão subterrânea.

Palavras chave: Campo magnético, linha de transmissão subterrânea, blindagem, *loops* passivos, ampacidade, otimização multiobjetivo.

#### ABSTRACT

The growing demand for electricity in urban centers has been causing an increase in underground distribution and transmission lines and, hence, sources of low frequency electromagnetic fields. This has motivated discussions about the problems caused by the exposure of the population to these fields, making stricter the rules and laws that establish field limit values. Therefore, for some situations, it is necessary to use shields to mitigate the magnetic field generated by underground lines. That said, the objectives of this study were to analyze the mitigation technique based on passive loops and to implement an optimization algorithm to determine the best configuration for the loops. To this end, we developed methodologies for the calculation of the magnetic field in the presence and absence of the shield (magnetic problem) and the maximum permissible current in the transmission line (thermal problem). Thus, the factors considered in the optimization of the loop configuration were the efficacy of shielding, the decrease in the transmission line ampacity and the financial cost of the material. However, the goals stipulated in the design of loops are conflicting, requiring the use of multi-objective optimization techniques for the determination of the results. In the end, we present the solutions sets obtained by optimization for the shielding of the conventional stretch and the junction zone an underground transmission line.

Keywords: Magnetic field, underground cables, shielding, passive loops, ampacity, multiobjective optimization.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Correntes parasitas induzidas na blindagem condutiva em "U" invertido
(retirado de [5])
Figura 2.2 - Configurações de blindagens condutivas abertas
Figura 2.3 - Junção metálica em formato de "L" para a conexão da placa horizontal com as verticais (retirado de [18])
Figura 2.4 - Blindagem com material ferromagnético (adaptado de [5]) 11
Figura 2.5 - Configurações fechadas de blindagem ferromagnéticas (retirado de [17]). 12
Figura 2.6 - Loops de compensação ativa (adaptado de [5]) 14
Figura 2.7 - Loops de compensação passiva (adaptado de [5]) 14
Figura 2.8 - Loops passivos instalados na caixa de emendas (adaptado de [5]) 15
Figura 2.9 - <i>Loops</i> com alto acoplamento (retirado de [6])
Figura 2.10 - Diagrama do arranjo com alto acoplamento para a distância "H" dos loops
para os cabos de alta tensão17
Figura 2.11 - "High Magnetic Coupling Passive <i>Loop</i> " (adaptado de [11])
Figura 2.12 - Fotografia da utilização da configuração do HMCPL nos trechos de
junção dos cabos subterrâneos (retirado de [11])
Figura 3.1 - Sistema subterrâneo com três condutores (retirado de [21])
Figura 3.2 - Tipos de configurações de loops passivos: (a) loop com volta independente,
(b) loop encadeado, (c) disposição do loop com volta independente e (d) disposição do
loop encadeado
Figura 3.3 - Campo magnético gerado por um par de condutores conduzindo corrente I
em direção oposta (retirado de [5])
Figura 3.4 - Comparação do perfil do fator de redução para o condutor a 50°C
Figura 3.5 - Comparação do perfil do fator de redução a 1,5 m de altura (50°C) para o
arranjo com compensação capacitiva
Figura 3.6 - Análise paramétrica da influência da distância (d) e do fator de
acoplamento (FA) para a eficiência do HMCPL (adaptado de [11])
Figura 3.7 - Resultados obtidos para o fator de redução quando da variação paramétrica
da distância (d) e do fator de acoplamento (CF) do arranjo HMCPL
Figura 3.8 - Fator de redução com a variação da distância (d), para um fator de
acoplamento constante em 95%
Figura 3.9 - Disposição longitudinal dos arranjos de loops estudados para a variação de
voltas e da seção transversal
Figura 3.10 - Análise do fator de redução para a variação do número de voltas e da
seção transversal
Figura 3.11 - Fator de redução do loop com baixo acoplamento em função de sua
distância à linha subterrânea
Figura 3.12 - Fator de redução do loop com capacitor de compensação em função de sua
distância à linha subterrânea
Figura 3.13 - Fator de Redução do <i>loop</i> passivo com alto acoplamento (50, 80 e 100%)
em função de sua distância para a linha subterrânea
Figura 3.14 - Variação da altura no cálculo do fator de redução

Figura 3.15 - Valores obtidos para o fator de redução para diferentes alturas do ponto de cálculo 42
Figura 3 16 - Constituição de um cabo elétrico isolado (retirado de [21]) 43
Figura 3.17 - Sistema de blindagem por <i>loops</i> passivos utilizados para validação do
cálculo da temperatura nos condutores da linha
Figura 4 1 - Arranio experimental da caixa de emendas montada no LEAT (retirado de
[20])
Figura 4.2 - Montagem experimental da caixa de emendas da linha trifásica
Figura 4.3 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagem
(pontos medidos a 1,50 metros acima da linha)
Figura 4.4 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagem
(pontos medidos a 0,90 metro acima da linha)
Figura 4.5 - 1 <i>loop</i> em volta independente
Figura 4.6 - 2 <i>loops</i> em volta independente
Figura 4.7 - 4 <i>loops</i> em volta independente
Figura 4.8 - 8 <i>loops</i> em volta independente (retirado de [20])
Figura 4.9 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de loop
passivo com 1 volta
Figura 4.10 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de <i>loop</i>
passivo com 2 voltas
Figura 4.11 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de <i>loop</i>
passivo com 4 voltas
Figura 4.12 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de loop
passivo com 8 voltas
Figura 4.13 - Fatores de Redução medidos e simulados para os arranjos de loops
passivos com 1, 2, 4 e 8 voltas
Figura 4.14 - Fotografia dos três núcleos magnéticos projetados (retirado de [20]) 67
Figura 4.15 - Dimensões do transformador de corrente projetado
Figura 4.16 - Fotografia do arranjo de <i>loops</i> com alto acoplamento (retirado de [20]). 68
Figura 4.17 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de <i>loops</i>
encadeados com baixo acoplamento
Figura 4.18 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de <i>loops</i>
encadeados com alto acoplamento (80%, no caso analisado)
Figura 4.19 - Fatores de redução medidos e simulados para o arranjo encadeado de
<i>loops</i> passivos de baixo e alto acoplamento
Figura 4.20 - Configuração do High Magnetic Coupling Passive <i>Loop</i> (HMCPL) 71
$\Gamma'$ $A \cap 1$ $\Gamma'$ $C' \cap 1$ $1 \cap 1$ $1' \cap 1' \cap 1' \cap 2' \cap 1$
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i>
rigura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL.       72         Figura 4.22 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagem       72         para os cabos espaçados em 0,30 m.       72         Figura 4.23 - Fotografia do arranjo HMCPL implementado no LEAT.       73         Figura 4.24 - Fotografia aproximada da disposição dos cabos no arranjo HMCPL.       74
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL.72Figura 4.22 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagempara os cabos espaçados em 0,30 m.72Figura 4.23 - Fotografia do arranjo HMCPL implementado no LEAT.73Figura 4.24 - Fotografia aproximada da disposição dos cabos no arranjo HMCPL.74Figura 4.25 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo HMCPL.74
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL.72Figura 4.22 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagempara os cabos espaçados em 0,30 m.72Figura 4.23 - Fotografia do arranjo HMCPL implementado no LEAT.73Figura 4.24 - Fotografia aproximada da disposição dos cabos no arranjo HMCPL.74Figura 4.25 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo HMCPL.74Figura 4.26 - Fatores de redução medidos e simulados para o arranjo HMCPL.76
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL.72Figura 4.22 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagempara os cabos espaçados em 0,30 m.72Figura 4.23 - Fotografia do arranjo HMCPL implementado no LEAT.73Figura 4.24 - Fotografia aproximada da disposição dos cabos no arranjo HMCPL.74Figura 4.25 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo HMCPL.74Figura 4.26 - Fatores de redução medidos e simulados para o arranjo HMCPL.76Figura 4.27 - Campo magnético medido e simulado para a situação sem blindagem
Figura 4.21 - Fotografia das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos <i>loops</i> no arranjo do HMCPL.72Figura 4.22 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagempara os cabos espaçados em 0,30 m.72Figura 4.23 - Fotografia do arranjo HMCPL implementado no LEAT.73Figura 4.24 - Fotografia aproximada da disposição dos cabos no arranjo HMCPL.74Figura 4.25 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo HMCPL.74Figura 4.26 - Fatores de redução medidos e simulados para o arranjo HMCPL.76Figura 4.27 - Campo magnético medido e simulado para a situação sem blindagem77Figura 4.28 - Campo magnético medido e simulado para a situação com os <i>loops</i> na

Figura 4.29 - Configuração dos <i>loops</i> passivos utilizada na otimização	)
Figura 4.30 - Campo magnético medido e simulado para os <i>loops</i> na posição otimizada	
Figura 4.31 - Fatores de Redução medidos e simulados para as configurações dos <i>loops</i> na posição original e otimizada	s )
Figura 4.32 - Resumo dos fatores de redução encontrados no estudo experimental 81	ĺ
Figura 5.1 - Corte transversal da vala típica de uma linha subterrânea	ł
Figura 5.2 - <i>Loop</i> passivo com compensação capacitiva	5
Figura 5.3 - Perfil do campo magnético sem o uso de blindagem, para o trecho convencional e para a caixa de emendas	) 7
Figura 5.4 - Resultados do NSGA-II para o trecho convencional do problema com dois objetivos	5
Figura 5.5 - Resultados do NSGA-II para o trecho convencional do problema com dois	S
objetivos (análise do Fator de Redução)	2
Figura 5.6 - Disposição dos condutores para o trecho convencional do problema com 2 objetivos	<u>2</u> 3
Figura 5.7 - Perfis de campo magnético para o trecho convencional do problema com dois objetivos	1 1
Figura 5.8 - Digrama fasorial das correntes para o trecho convencional do problema com 2 objetivos	1 5
Figura 5.9 - Curva de magnetização de diferentes tipos de metais [17]	5
Figura 5.10 - Resultados da Soma Ponderada com Algoritmo Elipsoidal para o trecho convencional do problema com dois objetivos	) 7
Figura 5.11 - Comparação dos resultados dos loops com alto acoplamento para o trecho	)
convencional (NSGA-II e Soma Ponderada)	3
Figura 5.12 - Comparação dos resultados dos loops com compensação capacitiva para o	)
trecho convencional (NSGA-II e Soma Ponderada) 98	3
Figura 5.13 - Resultados do NSGA-II para a caixa de emendas do problema com dois objetivos	5 )
Figura 5.14 - Comparação dos resultados dos loops com alto acoplamento para a caixa	1
de emendas (NSGA-II e Soma Ponderada) 101	L
Figura 5.15 - Comparação dos resultados dos loops com compensação capacitiva para a	1
caixa de emendas (NSGA-II e Soma Ponderada) 101	l
Figura 5.16 - Disposição dos condutores para a caixa de emendas do problema com dois	3
objetivos	5
Figura 5.17 - Perfis de campo magnético para a caixa de emendas do problema com dois objetivos	3 1
Figura 5.18 - Conjunto de soluções com os resultados dos loops com alto acoplamento	)
para o trecho convencional (sem restrição construtiva) 106	5
Figura 5.19 - Curva com os resultados dos loops com alto acoplamento para o trecho	)
convencional (sem limitação construtiva) 106	5
Figura 5.20 - Análise do crescimento do custo financeiro dos loops com alto	)
acoplamento	1
Figura 5.21 - Curva com os resultados dos loops com alto acoplamento para o trecho	)
convencional (com limitação construtiva)	)
Figura 5.22 - Fronteira Pareto com os resultados dos loops com compensação capacitiva	1
para o trecho convencional (sem restrição construtiva) 110	)

Figura 5.23 - Curva com os resultados dos loops com compensação capacitiva para o
trecho convencional (sem limitação construtiva) 110
Figura 5.24 - Curva com os resultados dos loops com compensação capacitiva para o
trecho convencional (com limitação construtiva)111
Figura 5.25 - Fronteira Pareto com os resultados dos loops com alto acoplamento para a
caixa de emendas (sem restrição construtiva) 113
Figura 5.26 - Curva com os resultados dos loops com alto acoplamento para a caixa de
emendas (sem restrição construtiva)
Figura 5.27 - Comparação entre os resultados dos loops com alto acoplamento para as
situações sem e com limitação construtiva (caixa de emendas) 114
Figura A.1 - Mapeamento do espaço das variáveis X no espaço dos objetivos Y
(retirado de [15])
Figura A.2 - Conceito de Dominância Pareto (retirado de [15])127
Figura A.3 - Fronteira Pareto no espaço dos objetivos 128
Figura A.4 - Diagrama básico de um algoritmo genético (retirado de [35]) 129
Figura A.5 - Níveis de não dominância
Figura A.6 - Cálculo da distância de aglomeração (retirado de [40]) 131
Figura A.7 - Diagrama do funcionamento do NSGA-II (adaptado de [14]) 131
Figura B.1 - Curva de magnetização do SAE 1006 [27] 136
Figura B.2 - Dimensões do núcleo ferromagnético utilizado na blindagem de loops com
alto acoplamento

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1 - Limites de exposição à indução magnética para o Brasil e para alguns
países que não adotam os parâmetros definidos pela Comissão Internacional de
Radiação Não-Ionizante
Tabela 3-1 - Parâmetros dos condutores de cobre dos loops passivos [10]
Tabela 3-2 - Comparação dos resultados com a variação da bitola e temperatura dos
condutores
Tabela 3-3 - Comparação dos resultados com a variação do nível de compensação
capacitiva inserido. 30
Tabela 3-4 - Posição geométrica dos loops passivos [10]     32
Tabela 3-5 - Comparação dos resultados com a variação do número de voltas e da
compensação canacitiva inserida no circuito
Tabela 3-6 - Propriedades térmicas da linha subterrânea       49
Tabela 3-7 - Comparação dos resultados da temperatura com a metodologia apresentada
em [7] para os loops passivos espacados de 0.30 m
Tabela 3-8 - Comparação dos resultados da temperatura com a metodologia apresentada
am [7] para os loops passivos espacados em 0.10 m
Tabala 3.9. Comparação dos resultados da temperatura com a metodologia apresentada
am [7] para a casa das loops passivas sa tacanda
Tabala 2 10 Drass per metro des esbes
Tabela 3-10 - Fleço por metro dos cabos
Tabela 5-11 - Pieço dos capacitores
(nontos medidos a 1.50 metros acima da linha)
Tabela 4-2 - Comparação entre os valores medidos e simulados sem o uso de blindagem
(nontos medidos a 0.00 metro acima da linha)
Tabala 4.2 Comparação entre os valores medidos o simulados para o arranio de loon
rabela 4-5 - Comparação entre os valores medidos e sinturados para o arranjo de loop
passivo com 1 volta
Tabela 4-4 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de loop
passivo com 2 voltas
Tabela 4-5 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de loop
passivo com 4 voltas
Tabela 4-6 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de loop
$passivo \ com \ 8 \ voltas$
Tabela 4-/ - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de loops
encadeados de baixo acoplamento
Tabela 4-8 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de loops
encadeados de alto acoplamento (80%, no presente caso)
Tabela 4-9 - Comparação entre os valores medidos e simulados sem o uso de blindagem
para os cabos espaçados em 0,30 m
Tabela 4-10 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo
HMCPL
Tabela 4-11 - Comparação entre os valores medidos e simulados para a situação sem
blindagem

Tabela 4-12 - Comparação entre os valores medidos e simulados para a situação com os
loops na posição original
Tabela 4-13 - Comparação entre os valores medidos e simulados para a situação com os
loops na posição otimizada
Tabela 5-1 - Parâmetros do cabo da linha subterrânea
Tabela 5-2 - Restrições para trecho convencional do problema com dois objetivos 90
Tabela 5-3 - Variáveis de decisão para o treco convencional do problema com 2
objetivos (FR igual a 4,2 e perda de 0,81%)
Tabela 5-4 - Restrição para a caixa de emendas do problema com dois objetivos 99
Tabela 5-5 - Restrições para o trecho convencional do problema com três objetivos. 105
Tabela 5-6 - Restrição para a caixa de emendas do problema com três objetivos 112
Tabela 5-7 - Resumo dos resultados obtidos no Capítulo 5 116

# SUMÁRIO

1. I	NTRODU	JÇÃO	1
1.1.	Motiv	ação	1
1.2.	Blinda	agem do Campo Magnético	3
1.3.	Objeti	vos	4
1.4.	Organ	ização do Texto	5
2. 1	TÉCNICA	S DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE	LINHAS
SUBT	ERRANI	EAS	6
2.1.	Introd	ução	6
2.2.	Rearra	injo de Cabos	6
2.3.	Utiliza	ação de Materiais Metálicos	7
	2.3.1.	Materiais condutivos	8
	2.3.2.	Materiais ferromagnéticos	11
2.4.	Loops	de Compensação	13
2.5.	Consi	derações Finais	19
3. N CAM	AODELA PO MAG	GEM E ANALISE DE <i>LOOPS</i> PASSIVOS PARA A BLINDA NÉTICO	AGEM DE 20
3.1.	Introd	ução	20
3.2.	Proble	ma Estudado	20
3.3.	Proble	ma Magnético	21
	3.3.1.	Metodologia de cálculo do campo magnético	
	3.3.2.	Validação da metodologia utilizada para o cálculo do campo magné	ético 28
	3.3.3.	Estudo de loops passivos	
	3.3.3.1. dos <i>loop</i>	Efeito da variação do dimensionamento dos condutores e do númer os na atenuação do campo magnético	o de voltas 36
	3.3.3.2.	Influência da posição dos <i>loops</i> na atenuação do campo	
	3.3.3.3.	Variação do fator de redução com a posição do ponto de cálculo	41
3.4.	Proble	ma Térmico	43
	3.4.1.	Metodologia de cálculo da ampacidade	
	3.4.2.	Validação da metodologia do cálculo da ampacidade	
3.5.	Proble	ema Econômico	51
3.6.	Consi	derações Finais	53
4. E	ESTUDO	EXPERIMENTAL DE <i>LOOPS</i> PASSIVOS	55
4.1.	Introd	ução	55
4.2.	Arran	o Experimental	55

4.3.	3. Loops Passivos com Baixo Acoplamento		
4.4.	. Loops Passivos com Alto Acoplamento		
4.5.	5. Otimização		
4.6.	Consic	derações Finais	81
5. La	<i>OOPS</i> PA	ASSIVOS – ESTUDOS DE CASOS	83
5.1.	Introdu	ução	83
5.2.	Linha	Subterrânea	83
	5.2.1.	Variáveis de decisão	
	5.2.2.	Restrições	85
	5.2.3.	Funções objetivo	
	5.2.4.	Definição matemática do problema	
5.3.	Estudo	o de Caso com Dois Objetivos	89
	5.3.1.	Trecho convencional	
	5.3.2.	Caixa de emendas	
5.4.	Estudo	o de Caso com Três Objetivos	104
	5.4.1.	Trecho convencional	105
	5.4.1.1.	Loops com alto acoplamento	106
	5.4.1.2.	Loops com compensação capacitiva	110
	5.4.2.	Caixa de emendas	
	5.4.2.1.	Loops com alto acoplamento	
5.5.	Consic	derações Finais	115
6. C	ONCLUS	SÕES	117
BIBLI	OGRAFI	IA	121
APÊNI	DICE A -	– Otimização Multiobjetivo	125
A.1.	Introduçã	ão	125
A.2.	A.2. "Nondominated Sorting Genetic Algorithm" II: NSGA-II		
A.3.	A.3. Soma Ponderada		
	A.3.1. A	lgoritmo Elipsoidal	
APÊNI	DICE B -	– Dimensionamento do Transformador de Corrente	135

### 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1. Motivação

Na busca por atender a crescente demanda de energia elétrica, há toda uma estrutura envolvida que contempla desde a geração até o transporte e a distribuição da mesma, trazendo consigo fontes de radiação eletromagnética para os grandes centros urbanos. Dessa forma, estudos envolvendo os possíveis problemas causados por essas radiações vêm ganhando destaque nos dias atuais, o que levou a Comissão Internacional de Radiação Não-Ionizante (ICNIRP), em colaboração com a Organização Mundial de Saúde (OMS), a desenvolver protocolos estabelecendo limites de exposição a campos eletromagnéticos de baixa frequência [1]. As questões mais preocupantes acerca da exposição contínua a esses campos são as interferências eletromagnéticas em equipamentos eletrônicos e os possíveis efeitos danosos à saúde humana.

Em julho de 2014, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº 616, estabelecendo os limites à exposição humana a campos magnéticos originários de instalações de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, na frequência de 60 Hz [2]. Essa norma adequa os limites de campo no Brasil aos preconizados pela ICNIRP e recomendados pela OMS. Tais limites são previstos para dois tipos de exposição: a população em geral e ocupacional. Segundo a OMS, a população submetida à exposição ocupacional consiste em profissionais treinados, que no exercício de suas atividades laborais relacionadas à geração, transmissão e distribuição de um dado local, região ou cidade, independentemente da faixa etária, que podem ou não estar expostas aos campos elétricos e magnéticos [3].

No entanto, como os efeitos biológicos da exposição de seres humanos a campos eletromagnéticos de baixa frequência ainda não são completamente conhecidos, alguns países adotam limites mais conservadores para regiões próximas às áreas de risco (escolas, parques, hospitais, asilos e zonas residenciais), não levando em conta os valores mencionados na ICNIRP. A Tabela 1-1 apresenta os limites de campo adotados atualmente no Brasil e em países que não adotam as recomendações da ICNIRP.

1

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

Tabela 1-1 - Limites de exposiçã	o à indução magnética par	a o Brasil e para alguns p	aíses que não adotam
os parâmetros defini	dos pela Comissão Interna	cional de Radiação Não-I	onizante.

\* Valor retirado de [1]. \*\* Valor retirado de [4].

Neste contexto, os sistemas de transmissão e distribuição subterrâneos apresentam-se como uma das principais fontes de campos magnéticos de baixa frequência. As linhas subterrâneas, devido à proximidade entre os cabos e o nível do solo, produzem maior intensidade de fluxo magnético quando comparadas às aéreas. Além disso, para agravar o problema, devido à falta de espaços nas grandes cidades, a utilização dos sistemas subterrâneos vem sendo cada vez mais frequente, de maneira que as linhas encontram-se enterradas sob vias públicas, resultando, assim, numa exposição contínua e imperceptível à população a campos magnéticos de baixa frequência. Dessa forma, cresce a necessidade de monitoramento e de prováveis reduções dos limites de campo, sendo necessário o desenvolvimento de alternativas de blindagem para atenuação do campo magnético gerado por linhas e redes subterrâneas.

Nesse âmbito, foi realizado um Projeto de P&D CEMIG D – ANEEL Nº 318, "Linhas de Distribuição Subterrânea: Soluções para Mitigação de Interferências Eletromagnéticas e Monitoramento da Integridade do Isolamento, sem Comprometimento da Capacidade de Transmissão de Energia", numa parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). Este projeto de P&D teve como objetivo o estudo de várias técnicas de mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas, avaliando o impacto de cada alternativa de blindagem na capacidade de transmissão de corrente da linha. Logo, a presente dissertação de mestrado foi desenvolvida no transcorrer deste projeto de P&D, com o intuito de analisar algumas das técnicas de mitigação do campo magnético gerado por linhas e redes subterrâneas.

#### 1.2. Blindagem do Campo Magnético

Conforme exposto anteriormente, em virtude do crescente aumento da utilização de linhas subterrâneas nos aglomerados urbanos, vêm sendo realizados estudos acerca das técnicas de blindagem do campo magnético nas proximidades de tais linhas, dentre as quais destacam-se a utilização de chapas metálicas, canaletas ou *loops* de compensação. Contudo, a instalação desses equipamentos próximo às linhas subterrâneas pode causar uma elevação adicional na temperatura dos condutores, reduzindo a capacidade de condução de corrente da linha. Portanto, para se determinar a técnica a ser empregada na blindagem do campo magnético, é imprescindível uma análise detalhada a respeito do impacto causado na capacidade de transmissão de energia do sistema.

Nos últimos anos, estudos sobre a eficácia de diferentes métodos de blindagem para o campo magnético gerado por linhas subterrâneas encontram-se disponíveis na literatura [5-11]. Da mesma maneira, tem se tornado cada vez mais frequente a análise das limitações causadas por essas configurações de blindagem na corrente de operação do sistema [7,8,12].

A região considerada mais crítica no sistema de transmissão subterrâneo é o ponto de junção dos cabos, denominado de caixa de emendas. Nesse trecho da linha, devido ao tamanho das emendas realizadas nas conexões dos cabos, o espaçamento entre as fases é maior, resultando em um campo magnético mais elevado que o campo em um trecho típico da linha, onde os cabos encontram-se geralmente mais próximos. Assim, faz-se necessária a utilização de técnicas de mitigação específicas para essas regiões, como, por exemplo, os *loops* de compensação.

O uso desta técnica tem-se mostrado uma solução viável para a atenuação do campo magnético em situações específicas. Além disso, a eficácia dessa técnica pode ser calculada analiticamente, diferentemente de outras configurações de blindagem, que

exigem métodos computacionais mais complexos. Logo, os parâmetros dos *loops* de compensação podem ser otimizados para a determinação das melhores configurações de blindagem [6,9,13].

#### 1.3. Objetivos

O objetivo deste estudo é de analisar os *loops* de compensação como técnica para a redução de campo magnético gerado por linhas de transmissão subterrâneas. Para isto, foi utilizado um algoritmo de otimização para determinar as melhores configurações dos *loops*, considerando os três fatores fundamentais de uma blindagem: eficácia (problema magnético), impacto causado na capacidade de corrente admissível do sistema (problema térmico) e custo financeiro dos materiais utilizados (problema econômico). Todavia, uma vez que os objetivos estipulados no projeto dos *loops* são conflitantes, técnicas de otimização multiobjetivo foram empregadas para se determinar as melhores configurações dos *loops*.

Para a resolução do problema magnético, é apresentada uma metodologia de cálculo analítico do campo na ausência e na presença do sistema de blindagem. Além disso, foi realizado um estudo acerca das relações de compromisso existentes entre os parâmetros dos *loops* e a influência dos mesmos na eficiência da blindagem. Para o cálculo da capacidade de condução de corrente da linha, é apresentada uma metodologia baseada na norma IEC 60287, possibilitando quantificar, assim, o impacto térmico causado pelo uso da blindagem.

Neste trabalho, foram utilizados o algoritmo do "*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*" II (NSGA-II) [14] e o método da Soma Ponderada ( $P_{\lambda}$ ) [15] com algoritmo Elipsoidal [16] para a resolução do problema multiobjetivo. Dessa forma, são obtidas as melhores configurações de *loops* passivos a serem utilizadas na atenuação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas, sendo realizado um estudo de casos para a blindagem em um trecho convencional e em uma caixa de emendas. Cabe ressaltar que, neste trabalho, não se pretende avaliar diferentes métodos de otimização e tampouco, se determinar o melhor algoritmo a ser aplicado ao problema de blindagem em questão.

#### 1.4. Organização do Texto

De forma a alcançar com os objetivos propostos, o presente documento foi estruturado em seis capítulos e dois apêndices, conforme descrito a seguir.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica abordando as principais técnicas de mitigação do campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão subterrâneas, descrevendo seus mecanismos físicos e também suas vantagens e desvantagens, com ênfase na técnica de *loops* de compensação, principal foco do trabalho.

No Capítulo 3, são apresentadas as metodologias utilizadas para se projetar um sistema de compensação baseado em *loops* passivos. Para isto, foram considerados os três fatores principais de uma blindagem, a saber: eficácia, limitação causada na corrente de operação do sistema e custo financeiro do material utilizado. Além disso, são realizadas validações computacionais das metodologias de cálculos propostas.

No capítulo 4, encontra-se um estudo experimental relativo à mitigação do campo magnético proporcionada por diferentes configurações de *loops* de compensação e análises comparativas dos resultados obtidos experimentalmente com aqueles determinados a partir da metodologia proposta no Capítulo 3, de forma a validá-la.

No capítulo 5, são apresentados os resultados da otimização multiobjetivo para a determinação das melhores configurações de *loops* passivos, utilizando os métodos descritos no Capítulo 3. Estes resultados foram obtidos em um estudo de casos no qual foi analisada a utilização dos *loops* passivos tanto em trecho convencional como em uma caixa de emendas da linha subterrânea.

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

No Apêndice A, é apresentada uma breve descrição sobre a otimização multiobjetivo e, por fim, discutidos os métodos de otimização do NSGA-II e da Soma Ponderada com o algoritmo Elipsoidal.

Ao final, o Apêndice B traz o dimensionamento dos núcleos magnéticos utilizados na blindagem com *loops* passivos de alto acoplamento.

# 2. TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO DE LINHAS SUBTERRÂNEAS

#### 2.1. Introdução

Neste capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito das principais técnicas de mitigação do campo magnético no entorno de linhas de transmissão e de redes subterrâneas. Além da descrição dos mecanismos físicos, são discutidas as principais vantagens e desvantagens de cada uma das alternativas apresentadas, enfatizando-se a sua eficácia no que se refere ao efeito de blindagem obtido e também às possíveis perdas na capacidade de corrente admissível da linha. Dessa forma, as soluções analisadas neste capítulo dividem-se nos seguintes grupos:

- rearranjo de cabos;
- utilização de matérias metálicos:
  - condutivos;
  - ferromagnéticos.
- *loops* de compensação.

#### 2.2. Rearranjo de Cabos

O rearranjo de cabos é uma alternativa que não utiliza a inserção de elementos externos para a redução do campo magnético, mas uma reconfiguração do posicionamento dos cabos. Sendo assim, a alteração do tipo de arranjo dos condutores proporciona intensidades distintas do campo resultante, ou seja, para a mesma profundidade dos cabos, a utilização das fases em trifólio (arranjo triangular) apresenta níveis menores de densidade de fluxo magnético do que no arranjo planar (horizontal ou vertical) [5]. Além disso, a redução do espaçamento entre as fases também proporciona a diminuição do campo magnético resultante [5]. Vale também ressaltar que a intensidade do campo magnético originado pela fonte é inversamente proporcional à distância ao ponto de medição. Logo, o acréscimo na profundidade de instalação da linha subterrânea irá provocar uma redução adicional do campo magnético [5,17]. No

entanto, essas alternativas são consideradas apenas na etapa inicial do projeto de uma linha subterrânea, pois, neste momento, o custo adicional de alteração do posicionamento dos cabos não é tão expressivo comparado às situações nas quais a linha já está construída e em estado de operação.

Uma outra alternativa para a redução do campo é a técnica de divisão de fases ("*phase splitting*"). Nesta situação, o número de condutores é dividido por fase para a reconfiguração do sistema numa posição otimizada. Por exemplo, para o circuito trifásico, geralmente são divididas duas fases em um número maior de condutores e dispostos, de maneira simétrica, no entorno da terceira fase [5]. Contudo, o custo elevado e a dificuldade de manutenção tornam essa alternativa raramente utilizada, apesar da sua eficiência na mitigação do campo [17].

Vale ressaltar que, embora essas alternativas não insiram novas fontes de calor no sistema, a reconfiguração dos cabos pode alterar a distribuição do fluxo de calor no entorno da linha e, consequentemente, limitar sua capacidade de transmissão.

#### 2.3. Utilização de Materiais Metálicos

Uma das principais estratégias para a mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas é a utilização de materiais metálicos na região de interesse. Esta blindagem é constituída por placas de espessura reduzida que podem formar uma superfície aberta ou fechada no espaço, ou seja, blindagem aberta ou fechada, respectivamente [5]. O nível de atenuação do campo está diretamente relacionado às propriedades da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética do material empregado nas placas. Desta forma, pode ser definida a ocorrência de dois fenômenos físicos distintos que contribuem para a atenuação do campo, sendo estes: a circulação de correntes induzidas nas chapas em materiais condutivos e a alteração da distribuição espacial do fluxo magnético entre a fonte e a área de interesse em materiais ferromagnéticos.

#### 2.3.1. Materiais condutivos

De acordo com a Lei de Faraday, a incidência de um fluxo magnético variante no tempo induz um campo elétrico nessa região do espaço. Se esse campo elétrico é induzido num dado material condutor, ocorrerá a circulação de correntes no mesmo. Dessa maneira, o campo magnético gerado por essas correntes deverá se opor àquele gerado pela fonte original do fluxo e, assim, atenuá-lo [5]. A Figura 2.1 ilustra as correntes induzidas nas chapas condutivas quando a blindagem é colocada na proximidade dos cabos.



Figura 2.1 - Correntes parasitas induzidas na blindagem condutiva em "U" invertido (retirado de [5]).

Os materiais utilizados nesse tipo de blindagem devem possuir elevada condutividade elétrica, maior do que 10 MS/m, sendo cobre e alumínio os mais comumente utilizados. As chapas de cobre apresentam as seguintes vantagens em relação as de alumínio: melhor resistência a corrosão quando enterradas no solo e maior condutividade elétrica, ou seja, maior eficácia de blindagem [5]. Por outro lado, as chapas de alumínio apresentam menor custo e maior facilidade de manuseio do que as de cobre [5].

As blindagens condutivas abertas são formadas por placas finas de materiais condutivos, podendo formar configurações do tipo: plana, "U" invertido e em "H". A Figura 2.2 apresenta as configurações citadas das blindagens condutivas abertas.



Figura 2.2 - Configurações de blindagens condutivas abertas.

O arranjo da chapa plana é o mais simples dentre os citados, sendo necessária apenas a instalação direta da chapa acima dos cabos fase. Para a configuração em "U" invertido, é preciso a junção das placas verticais com a placa horizontal central. No entanto, em virtude das linhas serem enterradas com *backfill*<sup>1</sup>, a instalação da chapa em "U" invertido nas valas se torna complicada, podendo inviabilizar o seu uso em algumas situações [7].

A configuração em "H" é formada por uma chapa horizontal e duas chapas verticais. Assim, em virtude da separação parcial das chapas, é mais simples a instalação dessa configuração em comparação com o arranjo em "U" invertido. Para isso, é necessária uma conexão metálica entre a chapa horizontal e as verticais para garantir um bom contato elétrico entre as placas, sendo recomendada essa junção em intervalos regulares [5]. A Figura 2.3 apresenta a junção em formato de "L" empregada para a conexão das chapas. Esta ligação é denominada de "ponte elétrica" [5].



Figura 2.3 - Junção metálica em formato de "L" para a conexão da placa horizontal com as verticais (retirado de [18]).

É importante ressaltar que, para todas as configurações de chapas condutivas, é necessário garantir um ótimo contato entre as todas as chapas, a fim de melhorar a circulação das correntes induzidas, e, consequentemente, o efeito de blindagem. Essa conexão deve ser realizada em todas as placas longitudinais e, para as configurações em "U" invertido e em "H", nas placas verticais que se encontram no mesmo lado da vala [5]. Em [18] é apresentado um estudo experimental demonstrando o aumento de 100% na eficácia de blindagem com a utilização de solda ponteada nas conexões da chapa em

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> O *backfill* é um material utilizado na obra civil das linhas subterrâneas para evitar a secagem do solo e facilitar as trocas de calor do cabo com o ambiente externo. Isso ocorre devido as características térmicas e hidrológicas do material, possibilitando valores de resistividade térmica relativamente baixos, mesmo quando secos.

"U" invertido, comparada a situação na qual as mesmas se encontraram apenas sobrepostas.

Em termos de mitigação do campo, a configuração em "H" apresenta os melhores resultados no que tange às configurações abertas. Contudo, esse nível de atenuação é influenciado por diversos parâmetros da configuração da blindagem, como a condutividade do material, as dimensões e espessura da placa, a distância da blindagem à linha e, principalmente, a posição relativa da placa horizontal em relação às verticais. Em [7] e [8] são apresentadas análises detalhadas a respeito da variação desses parâmetros e a influência dos mesmos no nível de atenuação do campo magnético.

A redução da distância das chapas à linha subterrânea proporciona um aumento nas correntes induzidas nas placas e, consequentemente, aumenta a atenuação do campo [7,8]. Não obstante, devido à presença do *backfill* nas proximidades dos cabos, dificilmente se consegue instalar alguma blindagem a uma distância menor que 30 centímetros da linha. Vale ressaltar também que, à medida que a blindagem se aproxima da linha, o aquecimento causado pelo uso da mesma se intensifica, provocando perdas maiores na capacidade de transmissão de corrente na linha.

O aumento das dimensões das placas, horizontais e/ou verticais, também acarreta melhoria no efeito de blindagem obtido [7,8]. Além disso, esse incremento facilita a dissipação de calor nos condutores, proporcionando uma redução no aquecimento adicional causado pelas placas. Logo, com o aumento das dimensões das placas, é possível conseguir níveis elevados de atenuação do campo sem que ocorra elevação de temperatura adicional nos cabos [7]. No entanto, o aumento nas dimensões das chapas é limitado pelo tamanho da vala em que os cabos estão enterrados, além do incremento no custo da solução.

Em relação à variação da espessura das chapas, percebe-se uma tendência de estabilização do nível de atenuação do campo na medida em que este parâmetro aumenta [7,8]. Isso ocorre porque, para espessuras muito maiores do que a profundidade de penetração, o campo já se encontra substancialmente atenuado dentro da blindagem e, desse modo, não é possível se incrementar a eficácia de blindagem [7].

A respeito do comportamento térmico, a chapa em "H" apresenta uma melhor dissipação de calor do que a chapa em "U" invertido, podendo até funcionar como um dissipador térmico, elevando assim, a capacidade de corrente admissível da linha [7]. As configurações fechadas de blindagem condutiva são geralmente formadas por cilindros longos de seção circular ou esférica. No entanto, a necessidade de grandes dimensões desses arranjos torna essa alternativa pouco utilizada na prática [5], sendo as configurações fechadas de blindagens com material ferromagnético mais recomendadas.

#### 2.3.2. Materiais ferromagnéticos

Um material ferromagnético, com permeabilidade magnética  $\mu$ , pode alterar a distribuição espacial do fluxo magnético entre a fonte geradora e a região de interesse. Esse comportamento é definido por duas condições para a situação onde não há corrente na superfície [5]:

- de acordo com a Lei de Ampère, a componente tangencial da intensidade do campo magnético (*H*) deve ser contínua na fronteira entre os meios,
- de acordo com a Lei de Gauss, a componente normal da densidade do fluxo magnético (B) deve ser contínua na fronteira entre os meios.

Deste modo, a grande diferença entre a permeabilidade magnética do material  $(\mu)$  e a do ar  $(\mu_0)$  proporciona a alteração brusca da direção do campo magnético ao atingir a fronteira, de maneira a satisfazer as condições supracitadas. A Figura 2.4 ilustra a alteração da distribuição das linhas de campo magnético ao atravessar um material ferromagnético.



Figura 2.4 - Blindagem com material ferromagnético (adaptado de [5]).

Em outras palavras, o material ferromagnético "confina" as linhas de fluxo do campo magnético originado por uma fonte. Logo, o valor da permeabilidade magnética e das dimensões do material define a quantidade de linhas de campo que podem ser "absorvidas" e, consequentemente, a eficácia da blindagem. Sabe-se que os materiais

ferromagnéticos apresentam comportamento não-linear com relação ao valor da permeabilidade magnética; portanto, deve-se levar em consideração a curva de magnetização do material para a determinação da eficiência da blindagem. Por exemplo, o ferro (99,8% puro) e a liga de  $\mu$ -metal apresentam permeabilidade relativa ( $\mu$ <sub>r</sub>) de 150 a 5000 e de 10<sup>5</sup> a 10<sup>6</sup>, respectivamente [5]. Vale ressaltar que a maioria dos materiais ferromagnéticos apresenta elevada condutividade elétrica e, dessa forma, as correntes induzidas no material contribuem de maneira importante na atenuação adicional do campo magnético.

A blindagem ferromagnética também apresenta configurações com geometrias abertas e fechadas. Para o caso das blindagens abertas, pode-se inferir que o efeito de blindagem é inferior àquele proporcionado pela blindagem fechada, pois as linhas de campo não podem percorrer um caminho fechado, passando assim pelo ar [7]. A relutância do ar promove uma elevação substancial na relutância equivalente do circuito, reduzindo consideravelmente a eficácia desta solução, sendo, em muitas situações, inferior àquela conseguida com a blindagem aberta condutiva [5]. Os principais formatos das blindagens ferromagnéticas abertas são a chapa plana e a chapa em "U" invertido, mostradas na Figura 2.2 (a) e (b), respectivamente [17].

Nas configurações fechadas, a permeabilidade magnética influencia diretamente na eficiência de blindagem, possibilitando maiores níveis de atenuação do campo magnético em decorrência da presença do caminho fechado. A Figura 2.5 apresenta os arranjos mais utilizados de configurações fechadas, sendo eles, o tubo e a canaleta fechada em formato de "U" ou "*raceway*".



Figura 2.5 - Configurações fechadas de blindagem ferromagnéticas (retirado de [17]).

Para situações onde é necessária uma mitigação elevada do campo magnético, as blindagens fechadas se mostram mais indicadas, com a redução do campo magnético em aproximadamente 20 vezes [7,18]. Para o arranjo da canaleta, o bom contato elétrico entre a tampa e a base tem influência fundamental no nível de atenuação do campo. Em [7] são apresentadas atenuações de aproximadamente 32 vezes para um contato elétrico perfeito e apenas 12 vezes para a situação com nenhum contato elétrico. Já a configuração tubular apresentou redução do campo magnético de 44 vezes [7]. No entanto, a utilização da canaleta e do tubo causou uma elevação adicional na temperatura dos condutores da linha, e assim, perda na capacidade de transmissão de 4,6 e 6,15%, respectivamente [7].

#### 2.4. *Loops* de Compensação

Esta técnica consiste em utilizar condutores curto-circuitados em seus terminais, na configuração de laços ou *loops*, para a blindagem do campo magnético. A circulação da corrente de compensação nesse circuito irá gerar um campo magnético oposto ao originado pela fonte, resultando na atenuação do campo. Os *loops* de compensação podem ser definidos como ativos ou passivos.

No presente trabalho, os sistemas ativos são os que possuem alguma fonte de potência externa para a injeção da corrente no circuito de compensação. Além disso, é utilizado um sistema de controle para a determinação do valor da corrente de compensação, correspondente ao nível de atenuação desejado do campo magnético. Desta forma, faz-se necessária a medição em tempo real da corrente na linha para o controle do nível de mitigação, possibilitando alcançar níveis elevados de atenuação do campo magnético. No entanto, a necessidade dos equipamentos externos utilizados para a medição e energização do circuito torna o sistema ativo mais complexo, oneroso e menos prático, sendo utilizado apenas em situações específicas [5]. A Figura 2.6 mostra um diagrama simplificado do funcionamento do sistema de compensação ativa.



Figura 2.6 - Loops de compensação ativa (adaptado de [5]).

É importante ressaltar que os *loops* ativos podem ser utilizados em outros tipos de problema, como no caso da blindagem do campo magnético no interior de subestações. Em [19], tal aplicação foi reportada, avaliando-se a presença dos *loops* para a atenuação do campo nas proximidades dos centros de transformação de média e baixa tensão. Para isso, foi proposta uma disposição ótima dos *loops* que pudesse promover a mitigação do campo nas regiões de interesse.

Os sistemas passivos são os que não possuem fonte de energia externa, ou seja, a corrente de compensação é induzida pela própria fonte do campo magnético. De acordo com a Lei de Faraday, a variação do fluxo magnético gera uma tensão induzida na espira e, desta maneira, uma corrente induzida na mesma [5]. Assim, de acordo com a Lei de Lenz, o campo magnético gerado pela circulação da corrente na espira deve ser contrário ao originado pela fonte, reduzindo então o campo resultante [5]. O sistema de *loops* passivos pode ser representado pelo diagrama apresentado na Figura 2.7.



Figura 2.7 - Loops de compensação passiva (adaptado de [5]).

Para os *loops* passivos, a corrente induzida irá depender do tipo de acoplamento existente entre o sistema de compensação e a linha subterrânea, existindo *loops* passivos com baixo e alto acoplamento.

Nos *loops* com baixo acoplamento, a intensidade da corrente de compensação é determinada pela impedância mútua entre os circuitos e também pela impedância série dos *loops*. Dessa forma, a eficiência da blindagem depende dos parâmetros geométricos e elétricos dos *loops*, como: geometria, posicionamento, número de voltas e características elétricas dos condutores [5].

A geometria dos *loops* tem relação com o tipo de configuração dos cabos, sendo que, os arranjos mais comuns são o em volta independente e o encadeado. Vale ressaltar que, para se obter blindagens eficientes, é recomendada a utilização da mesma geometria da fonte do campo no sistema de compensação [5]. O posicionamento dos *loops* influencia diretamente no valor da corrente induzida no circuito. Na maioria das vezes, os *loops* são centralizados e dispostos acima da linha subterrânea. Contudo, em algumas situações específicas, os laços podem ser colocados no entorno da linha ou mais próximos da região de interesse da atenuação do campo. É importante ressaltar que tanto a distância para a fonte de campo quanto o espaçamento dos laços influenciam na corrente de compensação e, consequentemente, no nível de atenuação obtida. Além disso, para aumentar a eficiência da blindagem, utiliza-se mais voltas nos condutores dos *loops*, podendo ser voltas em paralelo (voltas independentes) ou em série. A Figura 2.8 apresenta uma fotografia da montagem com *loops* passivos realizada no interior de uma caixa de emendas de uma linha subterrânea.



Figura 2.8 - Loops passivos instalados na caixa de emendas (adaptado de [5]).

Outro parâmetro dos *loops* de fundamental importância para a eficácia da blindagem é a característica elétrica dos condutores, tendo em vista que a intensidade da

corrente de compensação é função também da resistência e da reatância indutiva dos *loops*. Dessa forma, o aumento da seção transversal dos condutores proporciona a redução da resistência no circuito de compensação e, consequentemente, a elevação da corrente induzida. Além disso, para melhorar o efeito de blindagem, são utilizados capacitores para compensar a reatância indutiva do circuito [9,10]. Todavia, em situações específicas, a necessidade de elevados valores da capacitância inviabiliza essa alternativa.

Vale enfatizar que, quanto maior a corrente de compensação, maior será a redução do campo resultante. No entanto, os *loops* são uma fonte adicional de calor para a linha subterrânea, reduzindo a sua capacidade de transmissão de corrente. Logo, os parâmetros dos *loops* com baixo acoplamento influenciam diretamente não apenas o nível de atenuação do campo, mas também a corrente admissível da linha.

Para as configurações com alto acoplamento, um núcleo magnético (transformador de corrente) é inserido no circuito auxiliar para elevar o valor da corrente induzida nos *loops*. Dessa forma, a corrente não é mais determinada pelo posicionamento ou pela configuração dos *loops*, mas sim pelo acoplamento magnético proporcionado pelo transformador. Com essa técnica, apresentada inicialmente em [6], é possível obter correntes de compensação de até 80% do valor da corrente que circula nas fases e, a partir disto, níveis de atenuação do campo superiores aos apresentados pelas configurações com baixo acoplamento [20]. A Figura 2.9 apresenta um diagrama do circuito dos *loops* com alto acoplamento.



Figura 2.9 - Loops com alto acoplamento (retirado de [6]).

As bobinas do primário e secundário do transformador são posicionadas em série com os condutores do sistema principal e auxiliar, respectivamente [6]. Assim, as correntes de compensação são induzidas pelas correntes que circulam no sistema principal, atenuando assim o campo gerado pela linha subterrânea.

O transformador de corrente é projetado para se obter a relação de transformação de aproximadamente 1:1, ou seja, as correntes de compensação são praticamente da mesma intensidade das correntes do sistema que as gerou. No entanto, essa relação não é alcançada na prática, devido às perdas por efeito Joule e as perdas no núcleo de material ferromagnético [11]. É importante ressaltar que, no dimensionamento do núcleo magnético, deve-se considerar a curva de magnetização do material ferromagnético, para evitar a saturação e, consequentemente, a redução da eficácia do sistema.

Em decorrência da presença do transformador, a configuração com alto acoplamento apresenta uma grande vantagem de auto-realimentação, isto é, a corrente de compensação acompanha a variação de amplitude e fase da corrente que a gerou [6]. Logo, esse sistema apresenta maior simplicidade em relação aos sistemas ativos, pois não é necessária a injeção de correntes por uma fonte de potência externa, nem a presença de um sistema para o monitoramento e controle da corrente.

Outra vantagem da utilização desta técnica é a possibilidade do maior afastamento dos *loops* para as fases da linha (Figura 2.10), reduzindo assim, o comprometimento térmico devido à presença da blindagem sobre a capacidade de transmissão de corrente da linha. Além disso, para cada distância entre os *loops* e os cabos de alta tensão, existirá um acoplamento ótimo para proporcionar uma maior redução do campo magnético.



Figura 2.10 - Diagrama do arranjo com alto acoplamento para a distância "H" dos *loops* para os cabos de alta tensão.

Em [11] foi apresentada a configuração do "*High Magnetic Coupling Passive Loop*" (HMCPL). Neste arranjo, os condutores dos *loops* são dispostos no entorno dos cabos fase para proporcionar maior atenuação do campo magnético. Mais especificadamente, quatro condutores foram posicionados ao redor de cada uma das fases e acoplados magneticamente com um núcleo de material ferromagnético. A Figura 2.11 apresenta a configuração do HMCPL.



(a) Posicionamento dos 4 condutores do *loop* em cada uma das fases.

Núcleo magnético

(b) Fotografia do arranjo do HMCPL. Figura 2.11 - "*High Magnetic Coupling Passive Loop*" (adaptado de [11]).

Com a blindagem do HMCPL foi possível a atenuação do campo magnético em aproximadamente 10 vezes [11]. No entanto, a complexidade de disposição dos condutores torna essa alternativa viável apenas para situação em que elevada atenuação do campo deve ser atingida, como nas proximidades e interior das caixas de emendas das linhas de transmissão subterrâneas (Figura 2.12).



Figura 2.12 - Fotografia da utilização da configuração do HMCPL nos trechos de junção dos cabos subterrâneos (retirado de [11]).

### 2.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica a respeito dos principais métodos de atenuação do campo magnético gerado por linha subterrâneas, a saber: rearranjo dos cabos, utilização de materiais metálicos (condutivos e/ou ferromagnéticos) e *loops* de compensação (ativos ou passivos). Além da discussão dos conceitos físicos de cada uma das técnicas apresentadas, foram destacadas a eficácia da blindagem e as possíveis limitações na capacidade de condução de corrente da linha.

O foco dessa dissertação é a utilização dos *loops* de compensação para a blindagem do campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Para isso, foram modelados os problemas magnéticos e térmicos associados ao uso da blindagem e quantificados o nível de mitigação do campo e as perdas na capacidade de transmissão, respectivamente. Neste contexto, os capítulos a seguir apresentam uma análise detalhada a respeito da blindagem por *loops* passivos com baixo e alto acoplamento, sendo contemplada a influência de todos os parâmetros dos *loops* descritos anteriormente.

# 3. MODELAGEM E ANÁLISE DE *LOOPS* PASSIVOS PARA A BLINDAGEM DE CAMPO MAGNÉTICO

#### 3.1. Introdução

Neste capítulo, é apresentada a modelagem usada para o projeto de um sistema de compensação baseado em *loops* passivos para a atenuação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Para isto, foram considerados três fatores fundamentais de uma blindagem, a saber: eficácia (problema magnético), perda na capacidade de transmissão de corrente da linha (problema térmico) e custo do material utilizado (problema econômico). Com base nesses fatores, foram propostos dois algoritmos de otimização para se determinar as melhores configurações de *loops* passivos.

#### 3.2. Problema Estudado

O problema investigado no presente trabalho refere-se à blindagem do campo magnético gerado por linhas subterrâneas por meio da técnica dos *loops* passivos. Nesse contexto, o foco principal de análise é a eficácia de blindagem, determinado pelo nível de atenuação do campo magnético gerado pela linha. No entanto, a presença de fontes adicionais de calor na proximidade da linha ocasiona uma elevação adicional de temperatura nos condutores fase, reduzindo, assim, a máxima corrente permissível nas fases [7].

Outro aspecto analisado no projeto da blindagem foi o custo financeiro do material a ser utilizado na obra. Para isso, foi contabilizada uma estimativa do custo dos seguintes itens: os condutores que constituem os *loops* passivos, os capacitores utilizados para a compensação capacitiva do circuito e/ou os núcleos magnéticos instalados para o aumento do acoplamento entre o *loop* e a linha. Em decorrência das relações de compromisso entre as metas estipuladas, fez-se necessário o uso de técnicas de otimização multiobjetivo para a resolução do problema, sendo utilizados no presente trabalho os métodos do NSGA-II [14] e da Soma Ponderada (P<sub> $\lambda$ </sub>) [15] com algoritmo
Elipsoidal [16]. As descrições acerca desses métodos de otimização multiobjetivo foram apresentadas no Apêndice A. Dessa forma, foram utilizados algoritmos de otimização para a minimização de três objetivos específicos:

- Campo magnético resultante (problema magnético);
- Perda na capacidade de transmissão de corrente da linha (problema térmico);
- Custo financeiro dos *loops* passivos (problema econômico).

## 3.3. Problema Magnético

Para a resolução do problema magnético, foi necessária a definição de uma metodologia do cálculo analítico do campo magnético na ausência e na presença da blindagem por *loops*. Nesta seção, será detalhada a metodologia usada e, posteriormente a validação computacional com resultados encontrados na literatura. Além disso, também será apresentada a metodologia para o dimensionamento dos núcleos magnéticos utilizados nas configurações com alto acoplamento.

## 3.3.1. Metodologia de cálculo do campo magnético

A metodologia empregada baseia-se na Lei de Biot-Savart para o cálculo analítico do campo magnético [5,9,10,21]. Inicialmente, serão apresentados o modelo e as equações utilizadas para o cálculo do campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Em seguida, será descrita a metodologia do cálculo do campo resultante com o sistema de compensação por *loops* passivos com baixo e alto acoplamento. Dessa forma, atende-se a um dos objetivos específicos, ou seja, a definição do valor campo magnético resultante.

Como se sabe, o campo magnético gerado por uma corrente que circula num dado condutor pode ser determinado pela Lei de Biot-Savart. Para a situação de "n" condutores, o campo resultante pode ser determinado pelo princípio de superposição, ou seja, a superposição linear do campo produzido pela corrente de cada condutor. No caso do cálculo do campo magnético originado por linhas subterrâneas, é necessário desprezar as correntes induzidas no solo e na blindagem metálica do cabo fase [21]. Além disso, é preciso considerar que os cabos são infinitamente longos na direção longitudinal para se desprezar as interferências das pontas. Portanto, ponderando essas considerações, o problema do cálculo do campo magnético gerado por uma linha de distribuição/transmissão subterrânea pode ser modelado em duas dimensões (2D) e avaliado pela Lei de Biot-Savart e pelo princípio de superposição.

As linhas de transmissão subterrâneas são constituídas de três cabos fase, enterrados a uma profundidade "d" do nível do solo e posicionados em uma disposição planar (horizontal ou vertical) ou triangular. A Figura 3.1 apresenta um sistema trifásico subterrâneo num arranjo planar horizontal, com o espaçamento "s" entre as fases do circuito. Nessa figura é retratada uma visão bidimensional (2D) do sistema, onde o eixo Z é paralelo a linha, sendo h<sub>i</sub> e I<sub>i</sub> as representações da coordenada horizontal e da corrente de cada condutor "i", respectivamente.



Figura 3.1 - Sistema subterrâneo com três condutores (retirado de [21]).

Logo, num dado ponto de interesse P, com coordenada (X<sub>c</sub>,Y<sub>c</sub>), o campo magnético gerado pela corrente que circula num dado condutor "i" pode ser decomposto ao longo dos eixos x e y, dado pela seguinte equação [21]:

$$B_{xi} = -\frac{\mu_0 I_{fi}(t)}{2\pi r_i^2} (Y_c + d)$$
(3.1)

$$B_{yi} = -\frac{\mu_0 I_{fi}(t)}{2\pi r_i^2} (X_c - h_i)$$
(3.2)

onde  $\mu_0$  corresponde à constante de permeabilidade magnética do vácuo,  $r_i$  é a distância entre o condutor "i" e o ponto de interesse P e I<sub>fi</sub>(t) é a expressão no domínio temporal do valor da corrente no condutor "i" num dado instante de tempo "t", dada por:

$$I_{fi}(t) = I_{pi}sen(wt + \varphi_i)$$
(3.3)

onde  $I_{pi}$  é o valor de pico da corrente no condutor i, w é a frequência angular e  $\phi_i$  é o ângulo de fase da corrente que circula no condutor "i".

Dessa forma, o campo resultante gerado por "n" condutores será dada pela superposição linear nos eixos x e y:

$$B_x(t) = \sum_{i=1}^n B_{xi}$$
(3.4)

$$B_{y}(t) = \sum_{i=1}^{n} B_{yi}$$
(3.5)

A partir da curva senoidal do campo resultante em cada eixo é possível se determinar o valor RMS do campo:

$$B_{x,RMS} = \frac{max(B_x(t))}{\sqrt{2}}$$
(3.6)

$$B_{y,RMS} = \frac{max\left(B_y(t)\right)}{\sqrt{2}} \tag{3.7}$$

Logo, o valor RMS do campo magnético resultante (B<sub>r</sub>) num determinado ponto de interesse (P) será calculado pela seguinte expressão [22]:

$$B_r = \sqrt{\left(B_{x,RMS}\right)^2 + \left(B_{y,RMS}\right)^2} \tag{3.8}$$

Na presença do sistema blindagem, o campo resultante  $(B_m)$  é determinado pela soma vetorial do campo gerado pela linha subterrânea  $(B_0)$  com o campo originado pela blindagem  $(B_l)$ :

$$\vec{B}_m = \vec{B}_0 + \vec{B}_l \tag{3.9}$$

Para o caso do sistema de compensação por *loops*, o campo magnético pode ser calculado utilizando-se novamente as equações de Biot-Savart. No entanto, para esta formulação matemática ser válida, é necessário considerar que o comprimento longitudinal dos *loops* é muito maior do que o comprimento transversal (mínimo de 15 vezes) e que a corrente induzida dos *loops* na linha é desprezível, ou seja, o comprimento longitudinal da linha é muito superior ao dos *loops* [9]. Estas novas

considerações fazem-se necessárias para a sustentação da análise do problema em duas dimensões, dispensando, assim, a modelagem das terminações da linha e dos *loops*. A Figura 3.2 apresenta os desenhos das configurações dos *loops* considerados neste trabalho, denominados de *loop* em volta independente e *loop* encadeado.



Figura 3.2 - Tipos de configurações de *loops* passivos: (a) *loop* com volta independente, (b) *loop* encadeado, (c) disposição do *loop* com volta independente e (d) disposição do *loop* encadeado.

No arranjo de *loops* passivos encadeados, o campo magnético originado por cada um dos cabos foi calculado com as equações (3.1) e (3.2). Para os *loops* em volta independente, foi utilizada uma fórmula distinta para o cálculo do campo, tendo em vista que essa configuração se assemelha à situação de um par de condutores conduzindo uma corrente (I) em direção oposta, como pode ser visualizado na Figura 3.3. Portanto, a densidade de fluxo magnético nas coordenadas x e y será dada pelas seguintes equações [5]:



Figura 3.3 - Campo magnético gerado por um par de condutores conduzindo corrente I em direção oposta (retirado de [5]).

$$B_{xi} = -\frac{\mu_0 I_i(t)}{2\pi} \left( \frac{Y_c + d_{l2}}{r_{i2}^2} - \frac{Y_c + d_{l1}}{r_{i1}^2} \right)$$
(3.10)

$$B_{yi} = -\frac{\mu_0 I_i(t)}{2\pi} \left( \frac{X_c - h_{l2}}{r_{i2}^2} - \frac{X_c - h_{l1}}{r_{i1}^2} \right)$$
(3.11)

onde os índices 1 e 2 indicam as coordenadas referentes à cada um dos lados do *loop* representado na Figura 3.3.

Dessa forma, conhecendo a posição e a configuração dos *loops*, torna-se necessária apenas a determinação do valor da corrente induzida nos *loops* para o cálculo do campo magnético originado pela blindagem. Esse cálculo da corrente depende do tipo de acoplamento existente entre os *loops* e os cabos fase. Para o caso com alto acoplamento, a corrente foi determinada pelo fator de acoplamento dos transformadores de corrente inseridos, podendo ser calculada com a seguinte fórmula:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{A} \times \boldsymbol{I}_{\boldsymbol{p}} \tag{3.12}$$

onde I e  $I_p$  representam os valores RMS das correntes que circulam nos *loops* e nos condutores fase, respectivamente, e FA é o fator de acoplamento proporcionado pelo transformador de corrente.

Para a situação de baixo acoplamento, a corrente induzida nos *loops* (I) é determinada pela relação entre as impedâncias mútuas dos circuitos, sendo dada por [9]:

$$\boldsymbol{I} = -\boldsymbol{Z}^{-1}.\boldsymbol{j}\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{M}}.\boldsymbol{I}_{\boldsymbol{p}}$$
(3.13)

onde Z é a matriz de impedância por unidade de comprimento dos *loops*, X<sub>M</sub> é a matriz de impedância mútua entre os *loops* e a linha, e  $I_p$  é o vetor do valor RMS das correntes nas três fases da linha. Através desta fórmula, é possível a determinação da corrente induzida nos "n" *loops* encadeados ou independentes presentes no circuito. No entanto, o tipo de arranjo interfere na determinação dos parâmetros existentes em (3.13), como será mostrado a seguir.

A impedância própria por unidade de comprimento do *loop* "i", Z<sub>ii</sub>, é determinada pela seguinte equação [9]:

$$Z_{ii} = R_i + j(X_i - X_{ci})$$
  $i = 1, ..., n$  (3.14)

onde  $R_i$  é a resistência por unidade de comprimento do *loop* "i",  $X_i$  é a reatância por unidade de comprimento do *loop* "i" e  $X_{ci}$  é a reatância proporcionada pelo capacitor de compensação que pode estar inserido no circuito. O valor de  $R_i$  é definido como:

$$R_i = 2R_{ci} \tag{3.15}$$

para o arranjo do loop em volta independente e

$$R_i = R_{ci} \tag{3.16}$$

para o arranjo do *loop* encadeado, sendo que  $R_{ci}$  é a resistência por unidade de comprimento do condutor do *loop* "i". A reatância do *loop* "i" é determinada para cada tipo de arranjo da seguinte maneira:

$$X_i = w \frac{\mu_0}{\pi} ln \frac{S_i}{RMG_i}$$
(3.17)

para o arranjo em volta independente e

$$X_i = w \frac{\mu_0}{\pi} ln \frac{d(i, \bar{i})}{RMG_i}$$
(3.18)

para o arranjo encadeado, sendo que s<sub>i</sub> é a largura da volta do *loop*, RMG<sub>i</sub> é raio médio geométrico do condutor do *loop* "i" e  $d(i, \bar{i})$  é a distância do *loop* "i" para a sua imagem. Por fim, X<sub>ci</sub> é dado por:

$$X_{ci} = \frac{1}{w.C_i} \tag{3.19}$$

onde C<sub>i</sub> é a capacitância inserida no *loop* "i.

Por outro lado, a impedância mútua por unidade de comprimento entre dois loops ("i" e "k"), Z<sub>ik</sub>, pode ser calculada como [9]:

$$Z_{ik} = jw \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{d(i_1, k_2)d(i_2, k_1)}{d(i_1, k_1)d(i_2, k_2)}$$
(3.20)

para o arranjo em volta e

$$Z_{ik} = jw \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{d(i,\bar{k})}{d(i,\bar{k})}$$
(3.21)

para o arranjo encadeado, onde  $d(i_1, k_2)$  corresponde à distância entre a posição do lado 1 do *loop* "i" e a posição do lado 2 do *loop* "k" e  $d(i, \bar{k})$  corresponde à distância entre o *loop* "i" e a imagem do *loop* "k".

Por fim, a impedância mútua do *loop* "i" com a fase "f", X<sub>Mif</sub>, pode ser calculada pelas seguintes equações [9]:

$$X_{Mif} = w \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{d(i_2, f)}{d(i_1, f)}$$
(3.22)

para o arranjo em volta e

$$X_{Mif} = w \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{d(\bar{\iota}, f)}{d(i, f)}$$
(3.23)

para o arranjo encadeado.

Portanto, a partir da metodologia de cálculo analítico descrita, é possível a determinação da redução de campo proporcionada pelos arranjos de *loops* passivos com baixo ou alto acoplamento. Para facilitar a comparação do nível de mitigação do campo magnético originado por um tipo de blindagem, foi definido um parâmetro denominado fator de redução. Esse fator é calculado pela razão entre o valor do campo na ausência  $(B_0)$  e na presença de um sistema de blindagem  $(B_m)$ , em um determinado ponto:

$$FR = \frac{B_0}{B_m} \tag{3.24}$$

ou, para uma determinada faixa:

$$FR = \frac{m\acute{a}ximo(B_0)}{m\acute{a}ximo(B_m)}$$
(3.25)

onde o termo "*máximo*" indica o valor máximo do campo magnético obtido na faixa para a situação sem e com uso da blindagem,  $B_0 e B_m$ , respectivamente.

## 3.3.2. Validação da metodologia utilizada para o cálculo do campo magnético

Com o objetivo de validar a metodologia proposta para o cálculo do campo magnético, foram realizadas comparações entre resultados calculados pela mesma e valores previamente conhecidos e disponíveis na literatura [10,11].

Em [10] são apresentados resultados acerca da eficiência da blindagem de *loops* passivos de baixo acoplamento. Para isso, foi realizado um estudo da variação de alguns parâmetros do sistema de blindagem, tais como a seção transversal e a temperatura do condutor, o número de voltas dos *loops* e o nível de compensação proporcionada pela inserção de capacitores. Vale ressaltar que, para todos os casos, o campo foi avaliado em apenas um ponto de interesse, situado a 1,5 metros acima da superfície do solo e alinhado ao condutor central.

O sistema analisado em [10] tem a mesma configuração da linha mostrada na Figura 3.1, com a profundidade e espaçamento dos condutores fase de 1,25 e 0,25 metros, respectivamente. Os parâmetros dos condutores dos *loops* são descritos na Tabela 3-1.

			rear and rear pr	
Bitola		630 mm <sup>2</sup>	1000 mm <sup>2</sup>	2000 mm <sup>2</sup>
Raio (	( <b>mm</b> )	15,15	20,37	28,81
RMG	(mm)	11,79	15,86	22,84
Resistência	20°C	0,0282	0,0178	0,0089
(Ω/km)	50°C	0,0328	0,0206	0,0103
× /	90°C	0,0389	0,025	0,0123

Tabela 3-1 - Parâmetros dos condutores de cobre dos *loops* passivos [10].

Inicialmente, foi estudada a influência da variação da bitola e da temperatura do condutor na eficácia da blindagem. Dessa forma, foi calculada a corrente induzida nos *loops* pela circulação de uma corrente nas fases com amplitude de 500 A e frequência de 50 Hz. Além disso, foi determinado o fator de redução (FR) proporcionado pela blindagem apenas no ponto de interesse. Nesse caso, o tipo de arranjo analisado foi o de volta independente, sendo disposto a 1,22 metros de profundidade e com as coordenadas laterais de -0,4 e 0,4 metro. O posicionamento desta configuração foi apresentado Figura 3.2 (c) e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3-2.

Bitola	Temperatura	I*	I**	Diferença			Diferença
(mm <sup>2</sup> )	(°C)	(A)	(A)	(%)	FR*	FR**	(%)
	20	147,82	147,84	0,017	2,18	2,18	0
630	50	147,52	147,55	0,017	2,17	2,17	0,028
	90	147,07	147,10	0,018	2,14	2,14	0,028
	20	159,48	159,49	0,008	2,43	2,43	0,021
1000	50	159,34	159,35	0,008	2,42	2,42	0,008
	90	159,11	159,12	0,007	2,40	2,40	0,017
	20	175,28	175,28	0,002	2,84	2,84	0,021
2000	50	175,26	175,23	0,019	2,84	2,84	0,011
	90	175,16	175,15	0,005	2,83	2,83	0,011

Tabela 3-2 - Comparação dos resultados com a variação da bitola e temperatura dos condutores.

\* Valor calculado pela metodologia analítica de cálculo de campo. \*\* Valor retirado de [10].

A análise da Tabela 3-2, permite observar que os resultados encontrados na metodologia de cálculo estiveram de acordo com os valores exibidos em [10], apresentando diferenças percentuais menores que 0,05%. Como esperado, o aumento da seção transversal do condutor provocou melhoria do efeito de blindagem comprovada, pelo aumento de 30% do FR. A elevação da temperatura no condutor provocou um aumento na resistividade do material e, consequentemente, a redução da corrente induzida e da atenuação do campo. No entanto, devido ao superdimensionamento das seções transversais, o aquecimento não resultou em alterações significativas do FR, inferiores a 2%.

Para essa mesma configuração dos *loops*, foi calculado o perfil do campo magnético para uma faixa transversal de -20 a 20 metros e altura de 1,5 metros. A Figura 3.4 apresenta as curvas comparativas dos fatores de redução para as seções nominais de 630 mm<sup>2</sup>, 1000 mm<sup>2</sup> e 2000 mm<sup>2</sup>.





Analisando os resultados apresentados, percebe-se que os fatores de redução calculados foram muito próximos dos valores apresentados em [10]. Além disso, o FR praticamente se manteve constante com a variação da distância transversal para esse tipo de arranjo, indicando, assim, uma atenuação fixa do campo magnético para toda a faixa.

Para se determinar a influência da inserção de capacitores de compensação em série com o circuito dos *loops*, foram calculados os valores da corrente induzida e do nível de atenuação do campo para diferentes níveis de compensação capacitiva. A disposição do arranjo dos *loops* passivos foi mantida a mesma da situação anterior e a temperatura no condutor do *loop* foi de 50°C. A Tabela 3-3 e a Figura 3.5 apresentam a comparação dos resultados obtidos para esta situação.

1 40 114 5	e eempar	aşao aob 1 <b>0</b> 50		anaşao ao m	er at tompt	moușuo oupuo	in a motifier
Bitola	C	<b>I</b> *	I**	Diferença	FR*	FR**	Diferença
( <b>mm</b> <sup>2</sup> )	(F.m)	(A)	(A)	(%)	Îĸ		(%)
630	14,30	250,65	250,7	0,018	4,56	4,56	0,002
1000	16,57	259,65	259,7	0,021	6,80	6,79	0,077
2000	20,85	265,12	265,1	0,010	11,45	11,45	0,006

Tabela 3-3 - Comparação dos resultados com a variação do nível de compensação capacitiva inserido

\* Valor calculado pela metodologia analítica de cálculo de campo.
 \*\* Valor retirado de [10].



(a) Retirado de [10] Figura 3.5 - Comparação do perfil do fator de redução a 1,5 m de altura (50°C) para o arranjo com compensação capacitiva.

Observando a Tabela 3-3 e a Figura 3.5, pode-se inferir que, neste caso, os valores comparados se mostraram coerentes, apresentando diferenças percentuais inferiores a 0,1%. A inserção da compensação capacitiva proporcionou uma eficiência de blindagem muito superior aos arranjos sem capacitor, aumentando em até quatro vezes em relação ao maior fator de redução obtido em cada situação. Contudo, a necessidade de capacitores com elevada capacitância representa a principal desvantagem dessa metodologia. É importante ressaltar que o valor da capacitância é inversamente proporcional ao comprimento do *loop*, ou seja, quanto menor o comprimento do cabo, maior será o capacitor necessário. Por exemplo, para uma das configurações citadas anteriormente (Figura  $3.5 - 630 \text{ mm}^2$ ), será necessário um capacitor de 71 mF para o comprimento de 200 m dos *loops*. Logo, essa alternativa só se tornará viável para situações cujo comprimento total dos *loops* seja muito elevado, a partir de 100 metros.

O perfil do fator de redução apresentado na Figura 3.5 exibe uma grande variação no nível de atenuação do campo no eixo transversal. Esse comportamento se difere da situação sem a compensação capacitiva, apresentada na Figura 3.4, indicando assim, a importância de se analisar a faixa do campo magnético e não apenas um ponto de interesse.

Por fim, foi realizado um estudo a respeito da influência da variação do número de voltas com o nível de atenuação do campo magnético proporcionado pelos arranjos de *loops* passivos. Para isto, foi calculado o fator de redução no dado ponto de interesse ( $x_c = 0 e y_c = 1,5 m$ ) para arranjos de *loops* (50°C) com duas voltas independentes.

Além disso, foi analisada a inserção de capacitores de compensação no circuito dos *loops*. As posições dos arranjos são detalhadas na Tabela 3-4 e os resultados comparados se encontram na Tabela 3-5.

Bitola	(x <sub>11</sub> ,y <sub>11</sub> )	( <b>x</b> <sub>12</sub> , <b>y</b> <sub>12</sub> )	(x <sub>21</sub> ,y <sub>21</sub> )	(x <sub>22</sub> ,y <sub>22</sub> )
(mm <sup>2</sup> )	(m)	(m)	(m)	(m)
630	(-0,4; -1,29)	(0,4; -1,27)	(-0,5; -0,93)	(0,33; -1,12)
1000	(-0,4; -1,29)	(0,4; -1,27)	(-0,5; -0,93)	(0,31; -1,11)
2000	(-0,39; -1,31)	(0,47; -1,24)	(-0,5; -0,93)	(0,31; -1,11)

Tabela 3-4 - Posição geométrica dos loops passivos [10]

Tabela 3-5 - Comparação dos resultados com a variação do número de voltas e da compensação capacitiva inserida no circuito.

Bitola	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	FR*	FR**	Diferença
(mm <sup>2</sup> )	(F.m)	(F.m)			(%)
630	-	-	4,01	4,01	0,02
1000	-	-	4,93	4,92	0,20
2000	-	-	7,04	6,95	1,12
630	18,77	19,73	6,37	10,69	40,41
1000	22,28	30,48	9,51	14,73	35,43
2000	31,55	63,78	14,55	19,02	23,05

\* Valor calculado pela metodologia analítica de cálculo de campo.

\*\* Valor retirado de [10].

Como pode ser observado na Tabela 3-5, os valores dos fatores de redução obtidos pelos arranjos de *loops* sem compensação capacitiva foram muito próximos dos apresentados em [10], com diferenças percentuais menores que 2%. No entanto, os valores calculados para os arranjos com compensação capacitiva se mostraram distintos dos apresentados em [10], com diferenças percentuais de até 40%. Tal discrepância pode ser explicada pela maneira na qual é calculada a indutância mútua entre as voltas dos *loops*, pois, em [10], foram apresentadas apenas as equações para a determinação da corrente induzida em uma única volta. Sendo assim, desconfia-se que o valor da indutância mútua foi a causa das diferenças encontradas.

Em [11], é apresentada a técnica de blindagem do "*High Magnetic Coupling Passive Loop*" (HMCPL) para a mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas. Nessa configuração, foi realizada uma análise paramétrica da variação do fator de acoplamento (FA) proporcionada pelo transformador de corrente e da distância

(d) entre os *loops* e os cabos fase, como ilustrado na Figura 3.6. Os cabos fase foram dispostos no arranjo planar horizontal, enterrados a 1,5 metros de profundidade e com o espaçamento de 70 centímetros, modelando, assim, um trecho da caixa de emendas da linha subterrânea. O valor da corrente em RMS (Ieff) de 1000 A.



Figura 3.6 - Análise paramétrica da influência da distância (d) e do fator de acoplamento (FA) para a eficiência do HMCPL (adaptado de [11]).

Para este estudo paramétrico, foi considerada uma variação na distância (d) de 0 a 0,15 metro e no fator de acoplamento (FA) de 0,9 a 1 e analisada a sua influência na atenuação do campo magnético. É importante ressaltar que, para todos os casos, o campo foi avaliado em um único ponto de interesse, situado 1,5 m acima da superfície do solo e alinhado ao condutor central. Os resultados calculados são comparados na Figura 3.7 com os valores apresentados em [11].



(b) Calculado
 Figura 3.7 - Resultados obtidos para o fator de redução quando da variação paramétrica da distância (d) e do fator de acoplamento (CF) do arranjo HMCPL.

Analisando as curvas, pode-se inferir que os resultados calculados apresentaram a mesma tendência dos encontrados em [11]. Além disso, o HMCPL ideal (fator de acoplamento próximo de 100%) proporcionou valores extremamente elevados de fator de redução, atenuando completamente o campo. No entanto, esse nível de acoplamento não é obtido na prática, devido ao fato do núcleo magnético não ser ideal, tendo, desta forma, correntes de magnetização e perdas por efeito Joule que reduzem a magnitude das correntes induzidas [11]. Vale ressaltar que, para esta configuração, o fator de acoplamento foi o parâmetro com maior influência na eficiência da blindagem, sendo a distância entre os *loops* e a linha pouco determinante para o nível de atenuação do campo. Sendo assim, para um fator de acoplamento constante em 95%, foi calculada a influência da variação da distância com a eficácia do HMCPL. A Figura 3.8 apresenta a permanência praticamente constante de FR com a variação da distância entre os *loops* e a linha.



Figura 3.8 - Fator de redução com a variação da distância (d), para um fator de acoplamento constante em 95%.

Ao analisar a Figura 3.8, pode-se observar que os resultados calculados estiveram de acordo com os encontrados em [11], com o fator de redução constante em 20. Portanto, pode-se inferir que, para o HMCPL, a distância entre os *loops* e a linha não influencia diretamente no nível de atenuação do campo. Dessa forma, próximo às emendas dos cabos ou em trechos de acesso mais restrito às fases, mesmo que ocorra alteração dessa distância, os *loops* podem seguir de forma conjunta à linha subterrânea sem a redução na eficiência de blindagem [11].

#### 3.3.3. Estudo de *loops* passivos

A partir da metodologia proposta para o cálculo do campo magnético, realizouse vários estudos envolvendo configurações de *loops* passivos, com o objetivo de se analisar as relações de compromisso existentes entre de alguns de seus parâmetros. Neste contexto, desenvolveu-se um estudo paramétrico da blindagem com *loops*, analisando-se os efeitos da variação da seção reta do condutor, o número de voltas e a distância do sistema de compensação para os cabos de alta tensão. O sistema subterrâneo analisado foi mostrado na Figura 3.1 e apresenta a seguinte configuração: profundidade dos cabos de 1,50 metros, espaçamento entre as fases da linha de 75 centímetros e corrente nas fases de 827 A.

O cálculo do perfil do campo magnético foi realizado ponto a ponto, ou seja, em pontos espaçados de 0,5 metro entre si, perfazendo uma região de 8 metros de largura. A partir desses valores, os fatores de redução foram determinados de acordo com as equações (3.24) e (3.25). Os resultados obtidos são apresentados nos itens a seguir.

# 3.3.3.1. Efeito da variação do dimensionamento dos condutores e do número de voltas dos *loops* na atenuação do campo magnético

Inicialmente, foram analisadas as configurações de *loops* passivos com seções transversais de 1000 mm<sup>2</sup>, 500 mm<sup>2</sup>, 240 mm<sup>2</sup>, 120 mm<sup>2</sup>, 70 mm<sup>2</sup> e 35 mm<sup>2</sup> com 1, 2, 4, 8, 16, 32 voltas independentes, respectivamente. Todos os arranjos de *loops* foram posicionados a uma distância de 35 centímetros da linha. A Figura 3.9 apresenta a disposição das configurações com 1, 2, 4 e 8 voltas, sendo que os arranjos com 16 e 32 voltas apresentam o mesmo padrão de posicionamento. Os fatores de redução foram calculados ponto a ponto, através da equação (3.26), e ainda para uma altura de 1,0 metro do nível do solo. A Figura 3.10 apresenta os perfis dos FR obtidos nessa análise.



Figura 3.9 - Disposição longitudinal dos arranjos de *loops* estudados para a variação de voltas e da seção transversal.



Figura 3.10 - Análise do fator de redução para a variação do número de voltas e da seção transversal.

Analisando os resultados, observa-se que, em termos da atenuação do campo, os arranjos que apresentaram os maiores números de voltas (16 e 32) mostraram-se mais vantajosos, possuindo FR maiores que 3,5 para o ponto alinhado ao condutor central. Sendo assim, pode-se concluir que a distribuição mais uniforme dos *loops* proporcionou mais eficácia na redução do campo magnético do que o aumento na bitola dos condutores.

A utilização de *loops* com maior bitola é geralmente realizada para casos onde existe a compensação capacitiva. Nestas situações, o aumento da seção transversal dos cabos proporciona duas alterações nos parâmetros elétricos do circuito: a redução da resistência dos condutores e a elevação da reatância indutiva do cabo. Contudo, a compensação capacitiva reduz a reatância indutiva do circuito e, consequentemente, torna mais significativo o efeito do aumento da bitola. No entanto, como dito anteriormente, o elevado valor de capacitância dos capacitores de compensação torna essa alternativa inviável para algumas situações. Em [10] foi proposta uma alternativa para o aumento do número de voltas em série do *loop* para a redução do valor da capacitância, tendo em vista que, quanto maior o comprimento dos *loops* menores serão os capacitores necessários.

Deve-se destacar que, na Figura 3.10, a assimetria notada em relação aos lados direito e esquerdo dos perfis dos Fatores de Redução não era de fato esperada, devido a simetria no posicionamento dos condutores da linha e dos *loops*. Essa diferença entre os FR deve-se a assimetria do campo magnético calculado na presença do sistema de compensação (*loops*). Em [5] e [7], esta assimetria do campo resultante também foi notada nas proximidades condutores, na presença outras técnicas de blindagem (chapas metálicas e canaletas). Todavia, não foram obtidas explicações conclusivas para este fenômeno.

#### 3.3.3.2. Influência da posição dos *loops* na atenuação do campo

Nessa seção, será apresentado o estudo paramétrico da distância do arranjo dos *loops* para a linha subterrânea. Para isso, foram consideradas duas configurações de *loops* passivos: com baixo e alto acoplamento. A distância variou entre 5 e 75 centímetros e o fator de redução foi calculado como mostrado em (3.25), para uma altura de 1,50 metro do nível do solo.

Primeiramente, no estudo dos *loops* com baixo acoplamento, o arranjo considerado foi a volta independente (Figura 3.2 (c)) com a posição horizontal dos condutores nos pontos de -0,5 e 0,5 metro. A Figura 3.11 apresenta os valores de FR calculados para o *loop* passivo com baixo acoplamento.



Figura 3.11 - Fator de redução do *loop* com baixo acoplamento em função de sua distância à linha subterrânea.

Observando os resultados, percebe-se que, à medida que o arranjo de *loops* se aproxima da linha, as correntes induzidas aumentam, e, consequentemente, também o efeito de blindagem. Entretanto, a redução da distância para a linha provoca um maior afastamento para o ponto de cálculo do fator de redução. Dessa forma, a influência do campo resultante gerado pela blindagem próxima a linha é menor, acarretando uma atenuação semelhante à das blindagens mais afastadas. Sendo assim, o fator de redução para a técnica dos *loops* passivos com baixo acoplamento não sofre alterações significativas com a variação da distância do sistema de compensação em relação aos cabos, apresentando uma diferença de apenas 3,5% do FR para a faixa de 5 e a 35 centímetros.

No caso das configurações com compensação capacitiva, foi analisada a variação do fator de compensação (FC) para diferentes distâncias do sistema de blindagem à linha. Esse parâmetro foi definido pela razão entre a reatância capacitiva do capacitor de compensação ( $X_c$ ) e a reatância indutiva do circuito do *loop* passivo ( $X_L$ ),

indicando o nível de compensação inserido. O fator de compensação pode ser calculado pela seguinte equação:

$$FC = \frac{X_c}{X_L} \tag{3.26}$$

Sendo assim, para a análise da influência da posição dos *loops*, foram calculados os fatores de redução para os níveis de compensação de 40, 60 e 80%, cujos resultados são apresentados na Figura 3.12.



Figura 3.12 - Fator de redução do *loop* com capacitor de compensação em função de sua distância à linha subterrânea.

Diferentemente da situação sem a compensação capacitiva, a variação da distância dos *loops* para a linha proporcionou níveis distintos de atenuação do campo em cada posição, comprovada pela alteração de até 24% do FR. Além disso, vale ressaltar que foram obtidos fatores de redução distintos para cada uma das configurações de blindagem testadas, reafirmando, assim, as relações de compromisso presentes na blindagem com *loops* passivos.

Para o arranjo de *loops* com alto acoplamento, foram calculados os fatores de redução para três níveis distintos de acoplamento: 50, 80 e 100%. O arranjo de *loops* utilizado para o cálculo foi o encadeado (Figura 3.2 (d)) com os condutores dos *loops* dispostos na posição acima dos cabos fase (-0,75; 0 e 0,75 metro). A Figura 3.13 apresenta os valores dos FR calculados para os três níveis de acoplamento.



Figura 3.13 - Fator de Redução do *loop* passivo com alto acoplamento (50, 80 e 100%) em função de sua distância para a linha subterrânea.

A partir dos resultados calculados, observa-se que o fator de redução variou substancialmente para as diferentes distâncias, mostrando comportamento semelhante àqueles proporcionados pelos *loops* com compensação capacitiva, embora com variações mais significativas. Além disso, os três níveis de acoplamento utilizados (50, 80 e 100%) apresentaram pontos de máximo FR em diferentes distâncias, 75, 35 e 5 centímetros, respectivamente. Isso se deve à inserção do núcleo magnético, pois a intensidade da corrente de compensação não é mais determinada pelo posicionamento do *loop*, mas sim pelo acoplamento magnético proporcionado pelo transformador. Logo, o posicionamento do *loop* só irá determinar a distância da fonte de compensação para o ponto de interesse. Em outras palavras, para uma blindagem com fator de acoplamento máximo, próximo de 100%, o posicionamento ideal será exatamente sobre a linha subterrânea, proporcionando, assim, o campo magnético de mesma intensidade e de sentido oposto ao da linha. À medida que o nível de acoplamento diminui, a distância ideal entre os *loops* e a linha aumenta, como evidenciado na Figura 3.13.

#### 3.3.3.3. Variação do fator de redução com a posição do ponto de cálculo

Nessa etapa final do estudo, foi realizada uma análise paramétrica envolvendo posição vertical do cálculo do fator de redução. A altura variou de 0 a 2,5 metros acima do nível do solo. Para isso, foi considerado o mesmo arranjo encadeado utilizado no

estudo anterior com o fator de acoplamento de 80%, tal como mostrado na Figura 3.14. O fator de redução foi calculado com base na equação (3.25) e os resultados desta análise são apresentados na Figura 3.15.



Figura 3.14 - Variação da altura no cálculo do fator de redução.





Observando os resultados apresentados, pode-se inferir que a eficiência da blindagem varia com a posição onde deseja-se medir o campo magnético. Para a blindagem em análise, o fator de redução apresentou uma diferença de 9,3% entre as alturas de 1,0 e de 1,5 metros. Assim, para se projetar corretamente um sistema de *loops* passivos, é de fundamental importância a definição da altura da medição para o cálculo do fator de redução.

#### 3.4. Problema Térmico

Nesta seção é apresentada a metodologia baseada na norma IEC 60287 para o cálculo da capacidade de condução de corrente na linha. Em seguida, é realizada uma comparação dos resultados com os valores determinados pela metodologia apresentada [7]. Por fim, analisa-se o impacto que os sistemas de blindagem podem causar na corrente de operação da linha.

#### 3.4.1. Metodologia de cálculo da ampacidade

A ampacidade (capacidade de condução de corrente) de uma linha subterrânea está diretamente relacionada à temperatura de operação suportável por seu isolamento. Dito de outra forma, a quantidade de calor que o sistema formado pela linha pode dissipar para o meio externo tem papel fundamental na determinação da máxima corrente de operação permitida nos cabos [7]. Logo, é imprescindível a definição de uma metodologia para se estimar as temperaturas nos condutores da linha e assim, a ampacidade da mesma.

Os cabos de alta tensão utilizados em sistemas subterrâneos normalmente são constituídos por: condutor elétrico, blindagem do condutor, camada isolante (isolação), blindagem da isolação, fita semicondutora, blindagem metálica, armadura e cobertura externa, tal como ilustrado pela Figura 3.16.



Figura 3.16 - Constituição de um cabo elétrico isolado (retirado de [21]).

O cabo elétrico é normalmente formado por um conjunto de condutores de alumínio ou de cobre. A blindagem do condutor tem como objetivo melhorar a

distribuição do campo elétrico na superfície do mesmo e impedir descargas parciais entre o condutor metálico e o material isolante. Além disso, o tipo de material isolante (isolação) determina a temperatura máxima de operação do cabo para o regime contínuo, sobrecarga e curto-circuito. Para o cabo com isolação em XLPE, as temperaturas para esses regimes são 90, 130 e 250°C, respetivamente [23]. A blindagem da isolação tem função similar à blindagem do condutor, ou seja, impedir descargas parciais entre a isolação e a blindagem metálica. Do mesmo modo, é aplicada uma fita semicondutora de bloqueio ("water blocking") que possui a função de evitar a penetração de água no núcleo do cabo de alta tensão [17]. No caso da blindagem metálica, suas principais funções são confinar o campo elétrico à isolação do cabo; propiciar uma distribuição simétrica e radial do campo elétrico no isolamento; diminuir ou mesmo eliminar a possibilidade de choques elétricos e prover um caminho de baixa impedância para o retorno de correntes (condição de curto-circuito) [23]. A armadura, parte muitas vezes inexistente nos cabos, tem como finalidade a proteção contra danos mecânicos; já a cobertura ou capa externa é composta de material isolante, com o intuito de proteger contra a corrosão e danos mecânicos durante a etapa de instalação do cabo [17].

A partir do modelo de cabo descrito, é possível determinar a capacidade máxima de condução de corrente, isto é, a ampacidade do cabo. Assim, uma vez definida a temperatura máxima de operação em função dos níveis de aquecimentos suportáveis pelo material isolante do cabo determina-se a capacidade de condução de corrente da linha.

No entanto, a instalação de equipamentos nas proximidades das linhas subterrâneas pode alterar as características de propagação de calor na região e, consequentemente, a distribuição de temperatura nos condutores. Além disso, as blindagens correspondem a fontes de calor adicionais ao sistema, visto que nas mesmas ocorrem perdas por efeito Joule e/ou magnéticas. Dessa forma, as blindagens utilizadas para atenuar o campo magnético podem proporcionar uma elevação adicional de temperatura dos cabos, reduzindo, então, a ampacidade dos mesmos. Sendo assim, elaborou-se nesse trabalho um estudo do impacto que os *loops* acarretam na corrente máxima de operação do sistema. Em [7,8,12] são apresentadas análises da influência de diferentes tipos de blindagens (*loops* de compensação, blindagens condutivas e

ferromagnéticas) na capacidade de condução de corrente da linha de transmissão subterrânea.

A norma IEC 60287 [24-26] foi utilizada para a determinação da corrente admissível para linhas subterrâneas em situação normal. Para o regime permanente, a fórmula utilizada para o cálculo da ampacidade de uma linha trifásica diretamente enterrada, onde a secagem do solo não é considerada, é dada por [24]:

$$I = \sqrt{\left[\frac{\Delta\theta - W_d[0,5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}\right]}$$
(3.27)

onde:

 $\Delta \theta$  – aumento da temperatura no condutor em relação à temperatura ambiente ( $\Delta \theta = \theta_c - \theta_A$ );

 $\theta_c$  – temperatura do condutor;

 $\theta_A$  – temperatura do ambiente;

R – resistência AC do condutor ( $\Omega/m$ );

W<sub>d</sub> – perdas no dielétrico (W/m);

T<sub>1</sub> – resistência térmica entre o condutor e a blindagem (K.m/W);

T<sub>2</sub> – resistência térmica entre a blindagem e a armação (K.m/W);

T<sub>3</sub> – resistência térmica da cobertura externa (K.m/W);

T<sub>4</sub> – resistência térmica da região exterior ao cabo (K.m/W);

n - número de condutores em cada cabo;

 $\lambda_1$  – fator de perdas da blindagem;

 $\lambda_2-fator$  de perdas da armação metálica.

É importante ressaltar que a equação (3.27) é utilizada para calcular a capacidade de transmissão de corrente de apenas um cabo, denominado de condutor referência, sendo comumente realizado o cálculo para o condutor central. Em situações sem a presença de um sistema de blindagem, o condutor central geralmente é o que apresenta maior aquecimento. Entretanto, esse comportamento térmico não pode ser

afirmado para os casos com utilização de alguma blindagem, o que exige o cálculo da ampacidade em todos os três condutores das três fases da linha.

Para a determinação do valor de R (resistência AC do condutor) devem ser comtemplados os efeitos pelicular e de proximidade, além da variação da condutividade elétrica do condutor com a temperatura. As perdas no dielétrico ( $W_d$ ) devem ser consideradas para situações onde o nível de tensão é elevado, 63 kV fase-terra para cabos em XLPE preenchido [7], sendo calculadas por [24]:

$$W_d = wC U_o^2 \tan \delta \tag{3.28}$$

onde w é a frequência angular, C é a capacitância por unidade de comprimento do cabo (F/m), U<sub>o</sub> é a tensão fase-terra (V) e tan  $\delta$  é o fator de perdas.

O termo  $T_1$  representa a resistência térmica entre o condutor e a blindagem, e, para cabos com núcleo único, tal valor é dado por [25]:

$$T_{1} = \frac{\rho_{T}}{2\pi} ln \left[ 1 + \frac{2t_{1}}{d_{c}} \right]$$
(3.29)

onde  $\rho_T$  é a resistividade térmica do material isolante (K.m/W), d<sub>c</sub> é o diâmetro do condutor (mm) e t<sub>1</sub> é a espessura da isolação entre o condutor e a blindagem (mm).

Já o termo T<sub>2</sub> é a resistência térmica entre a blindagem e a armadura, sendo igual a zero quando não há presença desta última (T<sub>2</sub> = 0), como nos cabos de alta tensão modelados neste trabalho. A resistência térmica da cobertura externa (T<sub>3</sub>) pode ser calculada da seguinte maneira [25]:

$$T_{3} = \frac{\rho_{T}}{2\pi} ln \left[ 1 + \frac{2t_{3}}{D'_{a}} \right]$$
(3.30)

onde  $t_3$  é a espessura da capa (mm) e D'<sub>a</sub> é o diâmetro do componente imediatamente abaixo da capa externa.

A resistência térmica da região exterior ao cabo (T<sub>4</sub>) é determinada pelo aquecimento do ambiente externo ao condutor referência, ou seja, leva em consideração o aquecimento proporcionado pelos outros condutores fase e pelo sistema de blindagem. No entanto, para algumas configurações de blindagem, os problemas de transferência de calor não são comtemplados por cálculos analíticos, tornando-se necessária a aplicação de métodos numéricos, como detalhado em [7] e [8]. Contudo, para o problema térmico de *loops* passivos, o cálculo de T<sub>4</sub> não precisa ser realizado com métodos numéricos, podendo ser determinado de forma analítica. Sendo assim, o termo referente ao aquecimento externo foi calculado por [12]:

$$T_{4} = \frac{\rho_{S}}{2\pi} \left[ \ln\left(u + \sqrt{u^{2} - 1}\right) + \frac{1}{W_{p}} \sum_{\substack{k=1\\k \neq p}}^{q} W_{k} ln \frac{d'_{pk}}{d_{pk}} \right]$$
(3.31)

onde:

u - parâmetro geométrico da linha subterrânea;

 $\rho_s$  – resistividade térmica do solo (K.m/W);

W<sub>p</sub> – perdas elétricas totais no cabo p (W/m);

q – número total de cabos;

d'<sub>pk</sub> – distância do cabo "p" até a imagem do cabo "k" (m);

d<sub>pk</sub> – distância do cabo "p" até o cabo "k" (m).

O parâmetro u é determinado pela seguinte relação [25]:

$$u = \frac{2L}{D_e} \tag{3.32}$$

onde L é a profundidade (mm) onde os cabos se encontram enterrados e  $D_e$  o diâmetro externo do cabo (mm).

A razão entre as perdas elétricas totais, mostrada na equação (3.31), se refere às perdas não uniformes nos cabos. Na ausência da blindagem, as perdas nas três fases da linha podem ser aproximadas como iguais, simplificando a fórmula para a relação da posição das fases. No entanto, na presença dos *loops* passivos, as perdas não mais serão homogêneas, pois tanto a seção transversal dos condutores do *loop* e da linha quanto a corrente de compensação e da fase serão distintas. Sendo assim, a determinação das perdas elétricas em todos os cabos no circuito, assim como a razão entre elas perdas, fez-se necessária.

As perdas elétricas totais de um cabo são dadas pela soma das perdas no condutor, no dielétrico, na blindagem metálica e na armadura. No entanto, as perdas no condutor correspondem ao valor mais significativo das perdas totais, podendo, assim, serem aproximadas somente pelas perdas por efeito Joule, representadas por RI<sup>2</sup>. Essa aproximação se torna mais real para o cálculo nos *loops*, pois os cabos utilizados são de baixa tensão e não possuem blindagem metálica e nem armadura. Dessa maneira, a razão das perdas nos cabos pode ser diretamente relacionada com a resistência dos condutores e com o nível de acoplamento da corrente de compensação, sendo determinada por:

$$Razão \ de \ Perdas = \frac{W_q}{W_p} = \frac{R_q I_q^2}{R_p I_p^2} = \frac{R_q}{R_p} \times \left(\frac{I_q}{I_p}\right)^2 = FI \times FA^2$$
(3.33)

onde FI corresponde à relação entre as resistências dos condutores do *loop* e da linha e FA é o fator de acoplamento da corrente de compensação com a da fase. Dessa forma, torna-se possível a determinação da resistência térmica da região externa ao cabo (T<sub>4</sub>) para a situação com *loops* passivos.

#### 3.4.2. Validação da metodologia do cálculo da ampacidade

Para a validação da metodologia do cálculo térmico, foram realizadas algumas comparações com aquela apresentada em [7], baseada no método de elementos finitos. Dessa forma, foi calculada a elevação de temperatura nos condutores da linha para o arranjo de *loops* mostrado na Figura 3.17. Nesse sistema, a linha subterrânea de 138 kV se encontra diretamente enterrada a 1,50 metros de profundidade, com espaçamento de 30 centímetros entre as fases. A resistividade térmica do solo foi considerada igual a 1 K.m/W e a temperatura ambiente igual a 25°C, como sugerido por [26]. O arranjo dos *loops* estudado foi o encadeado e com baixo acoplamento, sendo realizada uma análise envolvendo os seguintes parâmetros geométricos dos *loops*: espaçamento (*s*) e distância às fases (*h*).



Figura 3.17 - Sistema de blindagem por *loops* passivos utilizados para validação do cálculo da temperatura nos condutores da linha.

Logo, nesta modelagem, os condutores dos cabos da linha e dos *loops* são de alumínio e têm as seções nominais de 800 mm<sup>2</sup> e 500 mm<sup>2</sup>, respectivamente. A linha de transmissão subterrânea possui isolação em XLPE, com temperatura nominal de operação igual a 90°C; já os cabos dos *loops* possuem isolação em termoplástico e temperatura de operação de 65°C. As demais propriedades térmicas dos cabos fase são mostradas na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 - Propriedades térmicas da linha subterrânea.	2.5
Resistividade térmica da isolação (K.m/W)	3,5
Resistividade térmica da cobertura externa (K.m/W)	3,5
Resistividade térmica do alumínio (K.m/W)	0,00282
Coeficiente da temperatura do alumínio α (°C <sup>-1</sup> )	0,00403

Na situação sem o uso de blindagem, a corrente máxima permitida na linha subterrânea, calculada por (3.27), é de aproximadamente 827 A. Com a inserção de um sistema de compensação de *loops* ocorre a redução na ampacidade. Sendo assim, para a validação da metodologia de cálculo apresentada, foram analisadas as seguintes variações paramétricas das configurações dos loops:

- espaçamento de 30, 10 e 0 (cabos se tocando) centímetros, •
- distâncias do sistema de compensação aos cabos fase de 6, 10, 16, 26, 35 • e 45 centímetros.

Dessa forma, foi determinada a corrente máxima permitida para cada uma das situações e realizada uma comparação com os resultados obtidos pela metodologia apresentada em [7]. É importante ressaltar que a corrente foi calculada para resultar numa temperatura igual a 90°C no condutor central da linha, sendo então confrontada com os valores de elevação da temperatura dada pelo programa de elementos finitos (FEMM – "Finite Element Method Magnetics" [27]). As tabelas com a comparação dos resultados são apresentadas a seguir.

Loops espaçados (s) em 30 centímetros					
<i>h</i> : Distância para a linha (cm)	Corrente Calculada (A)	Temperatura Calculada (°C)	Temperatura FEMM (°C) [7]	Diferença (%)	
6	738,18	90	92,23	2,42	
10	779,27	90	90,43	0,48	
16	804,56	90	90,43	0,48	
26	818,94	90	90,05	0,06	
35	823,36	90	90,03	0,03	
45	825,41	90	89,97	0,03	

Tabela 3-7 - Comparação dos resultados da temperatura com a metodologia apresentada em [7], para os
<i>loops</i> passivos espaçados de 0,30 m.

Tabela 3-8 - Comparação dos resultados da temperatura com a metodologia apresentada em [7], para os *loops* passivos espaçados em 0,10 m.

Loops espaçados (s) em 10 centímetros				
<i>h</i> : Distância para a linha (cm)	Corrente Calculada (A)	Temperatura Calculada (°C)	Temperatura FEMM (°C) [7]	Diferença (%)
6	800,05	90	89,18	0,92
10	812,93	90	89,51	0,55
16	819,73	90	89,70	0,33
26	824,27	90	89,88	0,13
35	825,87	90	89,99	0,01
45	826,61	90	89,98	0,02

Tabela 3-9 - Comparação dos resultados da temperatura com a metodologia apresentada em [7], para	a o
caso dos <i>loops</i> passivos se tocando.	

<i>Loops</i> se tocando (s = 0 centímetro)					
<i>h</i> : Distância para a linha (cm)	Corrente Calculada (A)	Temperatura Calculada (°C)	Temperatura FEMM (°C) [7]	Diferença (%)	
6	818,51	90	88,61	1,56	
10	822,59	90	89,24	0,85	
16	825,07	90	89,55	0,50	
26	826,47	90	89,80	0,22	
35	826,89	90	89,80	0,23	
45	827,02	90	89,90	0,11	

Conforme pode ser observado, os valores comparados estão em concordância para todas as situações estudadas, apresentando diferenças inferiores a 3%. Sendo assim, a metodologia de cálculo analítico mostrou-se satisfatória para a avaliação do impacto térmico decorrente da presença do sistema de blindagem, possibilitando, assim, sua adaptação para a determinação da ampacidade da linha em outros arranjos de *loops* passivos.

Além disso, pode-se observar que, para as situações onde os *loops* foram posicionados mais próximos da linha, a corrente máxima permitida teve seu valor reduzido em até 10,7%. Esse comportamento era o esperado considerando que, nesta situação, as fontes adicionais de calor estão mais próximas dos condutores da linha e as correntes de compensação nos *loops* possuem intensidades maiores, acarretando uma maior dissipação de calor. Para os casos onde a blindagem foi colocada mais afastada da linha, a perda na ampacidade foi próxima de zero. No entanto, como já descrito, o afastamento da blindagem poderá reduzir o fator de redução, indicando, assim, a relação de compromisso existente entre a atenuação do campo magnético e a capacidade de transmissão de corrente na linha.

## 3.5. Problema Econômico

Para se modelar o custo financeiro dos *loops* passivos, estimou-se o preço dos materiais utilizados para implementar o sistema de blindagem, sendo eles: os condutores dos *loops*, os capacitores de compensação e os núcleos magnéticos. No entanto, em virtude das dificuldades de se quantificar em valores, não foi incorporado no presente estudo os custos da mão de obra de instalação e manutenção do sistema de blindagem.

Para a determinação dos preços dos condutores, fez-se um orçamento para os cabos de 35, 70, 95, 120, 240 e 300 mm<sup>2</sup>, de forma que encontra-se mostrado na Tabela 3-10 o preço por unidade de comprimento dos mesmos a serem utilizados nos *loops*.

Seção transversal do cabo (mm²) *	Preço por metro (R\$/m)
35	12,29
70	25,53
95	33,88
120	42,55
240	84,63
300	108,58
500	169,26 **
1000	338,52 **

Tabela 3-10 - Preço por metro dos cabos

\* Parâmetros do cabo: Alumínio, 1 KV, EPR/HEPR, 90°C, flexível.

\*\* O preço dos cabos de 500 e 1000 mm<sup>2</sup> foram estimados pela associação em paralelo de condutores com menor seção transversal.

O custo financeiro do transformador de corrente foi determinado pelo peso do núcleo. Para isto, um orçamento foi realizado na Indústria de Transformadores King Ltda para a determinação do preço da chapa de aço, sendo considerado o valor de R\$ 9,80/Kg para o aço de grão não-orientado (GNO). Também foi definido o preço das estruturas para fixação do núcleo (4 peças por núcleo), em R\$ 12,0/Kg. Dessa forma, para cada projeto de núcleo, foi determinado o peso do material necessário e assim, estimado o custo de cada transformador.

Para a configuração dos *loops* com compensação capacitiva, definiu-se os valores comerciais de capacitância de 10, 15, 22, 33, 47, 68, 100, 150 e 220 mF. O preço foi orçado em [28] e [29], sendo convertido o valor para real (\$ 1,00 = R\$ 3,20) e acrescentada uma alíquota de 60% da importação. O custo final dos capacitores encontra-se mostrado na Tabela 3-11.

Capacitor (mF) *	Tensão (V)	Preço (R\$)
10	40	81,39
15	40	87,31
22	63	100,50
33	40	139,94
47	63	179,17
68	63	221,42
100	63	352,80
150	40	228,14
220	40	342,38

Tabela 3-11 - Preço dos capacitores.

\* Capacitores – Vishay Intertechnology [30].

## 3.6. Considerações Finais

Este capítulo apresentou a modelagem utilizada para a otimização das configurações de *loops* passivos para a mitigação do campo magnético nas proximidades de linhas subterrâneas. No entanto, a presença do sistema de blindagem proporciona uma elevação de temperatura adicional nos condutores da linha o que limita a sua capacidade de condução de corrente. Dessa forma, em função da relação de compromisso entre esses dois fatores, além de aspectos relacionados à disposição geométrica e custos dos *loops*, torna-se necessária a utilização de técnicas de otimização multiobjetivo para a determinação do conjunto de soluções desse problema. Essas ferramentas são descritas no Apêndice A e serão utilizadas no Capítulo 5.

Para a modelagem do problema estudado, foram apresentadas as metodologias para a resolução dos problemas magnético e térmico da blindagem com *loops*. A partir do cálculo do campo magnético na presença e na ausência dos *loops*, foi possível quantificar a eficácia da blindagem, denominado de fator de redução; por outro lado, com a metodologia do cálculo térmico, foi avaliada a influência dos *loops* de compensação na temperatura atingida pelos condutores da linha. Para a validação dessas metodologias, os resultados obtidos foram confrontados com valores encontrados na literatura e com aqueles obtidos por meio do FEMM. Por fim, foi apresentada uma modelagem do custo financeiro dos materiais utilizados no sistema de blindagem, configurando assim, o problema de otimização com 3 objetivos, a saber: fator de redução, impacto na corrente admissível do sistema e o preço da blindagem.

Diante disto, concluiu-se que as metodologias apresentadas mostraram coerência com os resultados encontrados na literatura. Além disso, foi observado que as configurações de *loops* passivos com compensação capacitiva e alto acoplamento apresentaram as maiores atenuações do campo magnético, sendo então escolhidas para o estudo de otimização multiobjetivo a ser realizado no Capítulo 5.

## 4. ESTUDO EXPERIMENTAL DE *LOOPS* PASSIVOS

### 4.1. Introdução

Neste capítulo, é apresentado um estudo experimental a respeito da atenuação do campo magnético proporcionada por diferentes configurações de *loops* passivos com baixo e alto acoplamento. Os resultados obtidos nos testes foram confrontados com aqueles determinados a partir da metodologia de cálculo proposta no capítulo anterior, de forma a valida-la.

## 4.2. Arranjo Experimental

Para a realização dos ensaios, foi desenvolvido um protótipo de um trecho típico de uma caixa de emendas de uma linha subterrânea nas dependências do Laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). A montagem representa três cabos de alta tensão curto circuitados e alimentados por um transformador de 13,8/0,22 kV. Os cabos foram dispostos no arranjo planar horizontal com espaçamento entre eles de 0,75 metro, que representa a distância típica em caixas de emendas reais. A Figura 4.1 ilustra o protótipo descrito.

A medição do campo magnético foi realizada a 1,50 metros de distância dos cabos, em pontos espaçados de 0,5 metro entre si, perfazendo uma região de 6 metros de largura, como mostrado na Figura 4.2. Como as fases da linha subterrânea geralmente ficam localizadas a 1,50 metros de profundidade, essa medição corresponde ao nível do solo para as instalações típicas de cabos subterrâneos. O medidor de campo utilizado foi EFA 300, fabricado pela "NARDA *Safety Test Solutions*", que, para as configurações empregadas neste estudo, apresenta erro típico de 5%.



Figura 4.1 - Arranjo experimental da caixa de emendas montada no LEAT (retirado de [20]).



Figura 4.2 - Montagem experimental da caixa de emendas da linha trifásica.

Para a realização dos testes, energizou-se o circuito pelo lado de alta tensão com o auxílio de um variador de tensão trifásico, para proporcionar a circulação de uma corrente de 120 A na fase central e 117 A nas fases laterais. A Figura 4.3 e a Tabela 4-1 apresentam a comparação entre os valores medidos e simulados do campo magnético para a situação sem o uso de blindagem.


Figura 4.3 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagem (pontos medidos a 1,50 metros acima da linha).

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	2,35	2,80	19,11
-2,50	3,10	3,72	19,93
-2,00	4,38	5,04	15,11
-1,50	5,95	6,85	15,19
-1,00	8,10	8,97	10,69
-0,50	9,83	10,71	8,92
0,00	10,15	11,37	11,99
0,50	9,28	10,71	15,38
1,00	7,77	8,97	15,39
1,50	6,43	6,85	6,59
2,00	4,85	5,04	3,95
2,50	3,33	3,72	11,65
3,00	2,37	2,80	18,10

Tabela 4-1 - Comparação entre os valores medidos e simulados sem o uso de blindagem (pontos medidos a 1,50 metros acima da linha).

Observando os resultados, é possível inferir que, apesar da proximidade das curvas, em alguns pontos a diferença entre os resultados apresentados foi considerável, chegando a quase 20%. Isso se deve, principalmente, ao fato da consideração da linha infinita realizada na etapa de cálculo não ter sido completamente atendida na montagem. Dito de outra forma, o comprimento longitudinal da linha (10 metros) não foi suficientemente maior que o espaçamento entre os cabos e a altura de medição, 0,75

e 1,5 metros, respectivamente. Ao reduzir esses parâmetros para 0,30 e 0,90 metro, as diferenças existentes entre os perfis da densidade do fluxo magnético medidos e simulados sofreram reduções importantes, como pode ser observado na Figura 4.4 e na Tabela 4-2. Para essa nova situação, os valores das correntes na linha foram de 148 A nos condutores do centro e da esquerda e de 137 no condutor da direita.



Figura 4.4 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagem (pontos medidos a 0,90 metro acima da linha).

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	1,81	2,13	17,73
-2,50	2,61	2,83	8,23
-2,00	3,82	3,95	3,44
-1,50	5,87	5,91	0,67
-1,00	9,10	9,42	3,47
-0,50	13,54	14,61	7,89
0,00	15,90	17,14	7,80
0,50	11,95	12,92	8,10
1,00	6,53	7,33	12,31
1,50	3,78	4,05	7,11
2,00	2,25	2,38	5,90
2,50	1,42	1,50	5,75
3,00	1,20	1,01	16,53

Tabela 4-2 - Comparação entre os valores medidos e simulados sem o uso de blindagem (pontos medidos a 0,90 metro acima da linha).

As flutuações nas intensidades das correntes medidas nas fases, durante as etapas de medição, também contribuíram para as diferenças encontradas nos resultados. Outro fator relevante que ajuda a explicar essas diferenças é a sensibilidade do medidor de campo utilizado. No processo de medição, foi possível observar uma variação considerável do valor medido devido a pequenas alterações na posição do medidor; em função disso, foi estabelecida uma posição padrão do medidor nas medições de forma a se melhorar a qualidade dos resultados. Além disso, é importante ressaltar que, na maioria das vezes, os pontos que apresentaram as maiores diferenças se encontram nas extremidades laterais da faixa. Isso ocorreu porque, nestas posições, a intensidade do campo é menor, o que faz com que os valores medidos sejam mais susceptíveis a variações na presença de algum ruído ou campo residual.

## 4.3. Loops Passivos com Baixo Acoplamento

Os primeiros arranjos de *loops* passivos testados foram os de baixo acoplamento. Para isso, foram utilizados até oito cabos de cobre com seção transversal de 95 mm<sup>2</sup> e 13 metros de comprimento para compor os *loops*. Os arranjos foram dispostos sobre pranchas de MDF suspensas por cavaletes mecânicos, de forma a manter uma distância de 35 centímetros dos *loops* à linha. Foram realizados ensaios para arranjos com 1, 2, 4 e 8 *loops* em voltas independentes (resultados mostrados nas Figuras 4.5 a 4.8, respectivamente), sendo posteriormente comparados às atenuações observadas nas simulações correspondentes.



Figura 4.5 - 1 *loop* em volta independente.



Figura 4.6 - 2 *loops* em volta independente.



Figura 4.7 - 4 loops em volta independente.



Figura 4.8 - 8 *loops* em volta independente (retirado de [20]).

As correntes medidas na linha para estas situações foram novamente de 120 A no condutor central e 117 nos laterais. Os resultados dos arranjos de *loops* de baixo

acoplamento são apresentados a seguir, pelos perfis do campo magnético e tabelas comparativas entre os valores medidos e simulados.



Figura 4.9 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de loop passivo com 1 volta.

Posição (m)	B Medido (μT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	2,01	1,93	4,08
-2,50	2,55	2,55	0,14
-2,00	3,52	3,43	2,63
-1,50	4,91	4,65	5,35
-1,00	6,58	6,18	6,03
-0,50	7,68	7,58	1,31
0,00	7,81	8,04	2,93
0,50	6,89	7,30	5,99
1,00	5,71	5,84	2,21
1,50	4,78	4,39	8,08
2,00	3,59	3,28	8,67
2,50	2,63	2,47	6,24
3,00	1,97	1,89	4,24

Tabela 4-3 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de *loop* passivo com 1



Figura 4.10 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de loop passivo com 2 voltas.

Posição (m)	B Medido (μT)	B Simulado (µT)	Diferença (%)
-3,00	1,88	1,93	4,08
-2,50	2,25	2,55	0,14
-2,00	3,23	3,43	2,63
-1,50	4,42	4,65	5,35
-1,00	5,91	6,18	6,03
-0,50	6,75	7,58	1,31
0,00	6,87	8,04	2,93
0,50	6,11	7,30	5,99
1,00	5,03	5,84	2,21
1,50	4,11	4,39	8,08
2,00	3,17	3,28	8,67
2,50	2,34	2,47	6,24
3,00	1,71	1,89	4,24

Tabela 4-4 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de *loop* passivo com 2 voltas.



Figura 4.11 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de loop passivo com 4 voltas.

Posição (m)	B Medido (μT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	1,69	1,44	15,07
-2,50	2,07	1,90	8,29
-2,00	2,84	2,55	10,28
-1,50	3,76	3,41	9,33
-1,00	4,88	4,41	9,68
-0,50	5,73	5,23	8,69
0,00	5,78	5,42	6,27
0,50	5,12	4,87	4,82
1,00	4,21	3,97	5,72
1,50	3,65	3,09	15,41
2,00	2,88	2,35	18,25
2,50	2,21	1,79	18,98
3,00	1,66	1,38	16,93

Tabela 4-5 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de *loop* passivo com 4 voltas.



Figura 4.12 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de loop passivo com 8 voltas.

Posição (m)	B Medido (μT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	1,49	1,20	19,51
-2,50	1,81	1,59	12,32
-2,00	2,44	2,13	12,75
-1,50	3,18	2,84	10,71
-1,00	3,88	3,65	5,83
-0,50	4,36	4,34	0,51
0,00	4,08	4,49	10,01
0,50	3,48	4,00	14,93
1,00	2,81	3,24	15,43
1,50	2,56	2,54	0,70
2,00	2,21	1,95	11,71
2,50	1,74	1,49	14,47
3,00	1,33	1,15	13,71

Tabela 4-6 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de *loop* passivo com 8 voltas.

Analisando de modo geral os resultados obtidos, pode-se observar que, os valores medidos e simulados apresentaram boa concordância, com diferenças inferiores a 20%. A divergência entre os valores ocorreu devido aos problemas relatados anteriormente para a situação sem blindagem, e, também, em decorrência das considerações realizadas com relação às dimensões nos *loops*, discutidas na etapa de cálculo e não completamente satisfeitas na prática, ou seja, na montagem.

A Figura 4.13 apresenta os fatores de redução obtidos em todos os arranjos de *loops* passivos de baixo acoplamento, determinados através do uso dos valores do campo magnético sem o uso de blindagem, mostrados na Tabela 4-1.



Figura 4.13 - Fatores de Redução medidos e simulados para os arranjos de *loops* passivos com 1, 2, 4 e 8 voltas.

Pode-se considerar que, apesar de todos os problemas já citados para a comparação entre medição e simulação, os valores dos fatores de redução foram condizentes e mostraram a mesma tendência para todos os arranjos, apresentando diferenças sempre inferiores a 19%. Os valores mais elevados dos fatores de redução simulados podem ser explicados pelo fato dos contatos elétricos nas terminações dos *loops* não serem perfeitos, ao contrário das terminações nas simulações computacionais. Logo, existe uma pequena elevação da resistência de cada volta do *loop*, resultando em uma menor intensidade de corrente de compensação e, consequentemente, na redução da eficiência da blindagem.

O arranjo que proporcionou a maior atenuação do campo foi aquele com o maior número de voltas (8 *loops*), mostrado na Figura 4.8, o que se deve a uma distribuição mais uniforme dos *loops* sobre os cabos de alta tensão. Contudo, os fatores de redução obtidos para esses arranjos com baixo acoplamento se mostraram reduzidos em comparação com outras técnicas de blindagem, sendo em todos os casos inferiores a 2,6. Logo, para a obtenção de maiores níveis de atenuação do campo, torna-se necessária a blindagem por *loops* passivos de alto acoplamento, analisada na sequência.

# 4.4. Loops Passivos com Alto Acoplamento

Para aumentar o acoplamento entre os *loops* e as fases, foram projetados três transformadores de corrente (TC), mostrados na Figura 4.14. O dimensionamento dos núcleos magnéticos foi realizado a partir da metodologia apresentada no Apêndice B. As dimensões de cada um dos núcleos, mostradas na Figura 4.15, foram definidas para se obter um nível de 80% de acoplamento para uma corrente de 120 A na linha.



Figura 4.14 - Fotografía dos três núcleos magnéticos projetados (retirado de [20]).



Figura 4.15 - Dimensões do transformador de corrente projetado.

Dessa forma, nessa montagem, os três cabos dos *loops* foram dispostos paralelamente no arranjo encadeado, a uma distância de 35 centímetros da linha, tal como mostrado na Figura 4.16. O espaçamento entre os condutores da linha foi

novamente de 75 centímetros. Para a análise do aumento do fator de redução devido à presença dos núcleos, as montagens foram realizadas com os *loops* dispostos dessa mesma forma, na ausência e na presença dos transformadores. A corrente nas fases, em todos esses casos, foi de 120 A no condutor central e de 117 A nos laterais. A Figura 4.17 e a Tabela 4-7 mostram as comparações entre os valores medidos e simulados para o arranjo encadeado sem os núcleos, ao passo que a Figura 4.18 e a Tabela 4-8 mostram esses valores para o arranjo com alto acoplamento.



Figura 4.16 - Fotografia do arranjo de loops com alto acoplamento (retirado de [20]).



Figura 4.17 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de *loops* encadeados com baixo acoplamento.

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	1,58	2,13	34,70
-2,50	2,23	2,81	26,12
-2,00	3,27	3,77	15,27
-1,50	4,65	5,01	7,66
-1,00	6,27	6,33	0,92
-0,50	7,4	7,36	0,53
0,00	7,51	7,76	3,39
0,50	7,01	7,41	5,67
1,00	5,96	6,48	8,70
1,50	4,68	5,24	11,89
2,00	3,51	4,02	14,49
2,50	2,43	3,05	25,49
3,00	1,72	2,34	36,20

Tabela 4-7 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de *loops* encadeados de baixo acoplamento.



Figura 4.18 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo de *loops* encadeados com alto acoplamento (80%, no caso analisado).

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (µT)	Diferença (%)
-3,00	0,56	0,62	11,47
-2,50	0,83	0,86	3,15
-2,00	1,22	1,21	0,81
-1,50	1,7	1,72	1,08
-1,00	2,01	2,29	13,74
-0,50	2,31	2,64	14,31
0,00	2,57	2,73	6,27
0,50	2,53	2,64	4,37
1,00	2,2	2,29	3,91
1,50	1,55	1,72	10,86
2,00	1,03	1,21	17,48
2,50	0,73	0,86	17,28
3,00	0,53	0,62	17,78

Tabela 4-8 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo de *loops* encadeados de alto acoplamento (80%, no presente caso).

Como pode ser observado, de modo geral, os resultados obtidos com o programa de cálculo estiveram de acordo com os medidos, apresentando diferenças menores que 18%. Como esperado, a inserção do núcleo magnético no circuito da blindagem proporcionou uma maior atenuação do campo, reduzindo o valor de pico do campo de 7,51 para 2,57 µT. Esse comportamento se deve ao aumento da corrente de compensação nos *loops* de 22 para 93 A, próximo ao valor de 96 A estabelecido no projeto dos núcleos. Na Figura 4.19 destacou-se o acréscimo do fator de redução obtido pela presença do transformador de corrente. Novamente, para a determinação desses fatores, foram utilizados os valores do campo sem blindagem descritos na Tabela 4-1.



Figura 4.19 - Fatores de redução medidos e simulados para o arranjo encadeado de *loops* passivos de baixo e alto acoplamento.

Os fatores de redução obtidos na simulação estiveram novamente em consonância com os medidos, apresentando diferenças menores que 10%. A inserção do núcleo magnético proporcionou o aumento de aproximadamente três vezes do fator de redução obtido, o qual passou de 1,35 para 3,95 do FR medido. Cabe apontar que a presença do transformador eleva o custo dessa técnica em relação às soluções de baixo acoplamento. No entanto, o uso de comprimentos menores dos *loops* pode tornar essa solução financeiramente mais viável, valendo ressaltar ainda que foi obtido um aumento de 68,5% do fator de redução medido em relação ao arranjo de 8 voltas com baixo acoplamento.

Outra configuração de *loops* com alto acoplamento testada foi o *High Magnetic Coupling Passive Loop* (HMCPL) [11], mostrado na Figura 4.20. Para a disposição dos *loops* no entorno dos cabos, foram utilizadas pranchas de madeira para a fixação dessa configuração, como mostrado na Figura 4.21. Devido às restrições físicas das pranchas, o espaçamento (*s*) entre as fases foi de 0,30 metro e as distâncias (*d*) entre os *loops* e as fases foram de 0,10 metro.



Figura 4.20 - Configuração do High Magnetic Coupling Passive Loop (HMCPL).



Figura 4.21 - Fotografía das pranchas de madeiras utilizadas para a disposição dos *loops* no arranjo do HMCPL.

Para se determinar o nível de atenuação do campo produzido por essa alternativa de blindagem, foi necessária a medição do campo magnético gerado pela linha subterrânea nessa configuração, ou seja, com os cabos espaçados em 0,30 metro e sem o uso de blindagem. A corrente medida foi de 201 A na fase central e de 204 A nas fases laterais. A Figura 4.22 e a Tabela 4-9 apresentam a comparação dos valores de campo magnético medidos e simulados.



Figura 4.22 - Perfil do campo magnético medido e simulado sem o uso de blindagem para os cabos espaçados em 0,30 m.

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	1,61	1,86	15,46
-2,50	2,3	2,46	7,03
-2,00	3,11	3,35	7,61
-1,50	4,33	4,63	7,00
-1,00	5,5	6,35	15,54
-0,50	7,05	8,13	15,29
0,00	7,96	8,94	12,33
0,50	6,7	8,13	21,31
1,00	5,32	6,35	19,45
1,50	3,78	4,63	22,57
2,00	2,75	3,35	21,70
2,50	1,93	2,46	27,55
3,00	1,41	1,86	31,83

Tabela 4-9 - Comparação entre os valores medidos e simulados sem o uso de blindagem para os cabos espacados em 0.30 m.

Como pode ser observado na Figura 4.22 e na Tabela 4-9, os resultados confrontados da medição e simulação apresentaram a mesma tendência, apesar de diferenças relevantes em alguns pontos nas extremidades laterais. Todos os problemas citados para as outras configurações também foram encontrados nessa etapa. Além disso, a maior complexidade da disposição dos cabos implica em mais aproximações na modelagem realizada e, consequentemente, maiores diferenças entre os valores medidos e os simulados.

Sendo assim, a partir da determinação do campo para esse espaçamento dos condutores fase, foi realizada a montagem do HMCPL, retratada nas Figura 4.23 e Figura 4.24. Os resultados dessa configuração são mostrados na Figura 4.25 e na Tabela 4-10.



Figura 4.23 - Fotografia do arranjo HMCPL implementado no LEAT.



Figura 4.24 - Fotografia aproximada da disposição dos cabos no arranjo HMCPL.



Figura 4.25 - Perfil do campo magnético medido e simulado para o arranjo HMCPL.

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	0,11	0,13	17,72
-2,50	0,13	0,18	26,45
-2,00	0,16	0,24	33,30
-1,50	0,21	0,33	36,65
-1,00	0,32	0,45	29,45
-0,50	0,42	0,58	27,38
0,00	0,48	0,64	24,43
0,50	0,41	0,58	29,11
1,00	0,31	0,45	31,66
1,50	0,2	0,33	39,66
2,00	0,14	0,24	41,63
2,50	0,1	0,18	43,42
3,00	0,08	0,13	40,16

Tabela 4-10 - Comparação entre os valores medidos e simulados para o arranjo HMCPL.

Em virtude da maior atenuação do campo proporcionada pelo HMPCL, o valor do campo resultante se torna mais susceptível a possíveis ruídos presentes no ambiente de medição. Isso faz com que as diferenças apresentadas na Tabela 4-10 sejam maiores do que as exibidas nas comparações dos outros arranjos de blindagem. Outro fator que explica essa maior discrepância entre os valores medidos e simulados é a complexidade do posicionamento dos cabos. É possível observar, mesmo com a utilização das pranchas de madeira, ligeiras alterações no espaçamento entre fases e loops ao longo da extensão da linha, como mostra a Figura 4.24. Além disso, durante o processo de medição, observou-se uma diferença entre os fatores de acoplamento proporcionados por cada um dos transformadores de corrente. Apesar dos núcleos magnéticos possuírem as mesmas dimensões, a corrente que irá circular nos condutores dos loops será determinada pela razão entre a tensão induzida no secundário do transformador e a impedância do condutor. Logo, diferenças no comprimento e na seção transversal dos loops podem resultar em correntes de compensação distintas e, consequentemente, fatores de acoplamentos diferentes. Sendo assim, no HMCPL, foram medidos fatores de acoplamento de 83, 87 e 91% nos três transformadores de corrente utilizados, o que também contribui para as diferencas encontradas entre os valores medidos e calculados.

No entanto, cabe ressaltar que o método de cálculo apresentou a mesma tendência de redução encontrada na medição, como pode ser evidenciado pelos fatores de redução medidos e simulados (Figura 4.26).



Figura 4.26 - Fatores de redução medidos e simulados para o arranjo HMCPL.

A Figura 4.26 mostra que os níveis de atenuação do campo apresentaram boa concordância, apresentando diferença de 15% entre os valores medido e simulado. Dessa forma, a metodologia de cálculo pode ser utilizada para se estimar a mitigação do campo magnético proporcionada por esse sistema de blindagem. O fator de redução obtido experimentalmente nesse arranjo do HMCPL foi de 16,58, maior do que o apresentado em [11], que é de aproximadamente 10. Contudo, devido à complexidade de instalação e disposição dos *loops*, essa alternativa de blindagem é recomendada apenas para situações onde é necessária uma grande atenuação do campo magnético, como por exemplo, regiões no entorno de caixas de emenda.

## 4.5. Otimização

Nesta etapa do trabalho, foi realizado um estudo preliminar com relação a otimização da blindagem de *loops* passivos. Sendo assim, a configuração analisada foi o arranjo encadeado de *loops* com alto acoplamento, como mostrado na Figura 4.16. Nessa análise, o único objetivo a ser minimizado foi o campo magnético. Para isso, foi utilizado um algoritmo genético de otimização (*Genetic Algorithm - Matlab* [31]), no qual as variáveis do problema foram a posição longitudinal dos três condutores dos *loops*. O nível de acoplamento dado pelo núcleo ferromagnético foi mantido constante (80%) devido à presença dos três transformadores mostrados na Figura 4.14. Dessa forma, foi utilizado o espaçamento dos condutores da linha em 30 centímetros e a corrente nas fases foi de aproximadamente 200 A. O campo magnético foi novamente medido no trecho horizontal de -3,0 a 3,0 metros e para uma distância vertical da linha



de 1,50 metros. Os valores das densidades de fluxo magnético medidos e simulados para a situação sem blindagem são mostrados na Figura 4.27 e na Tabela 4-11.

Figura 4.27 - Campo magnético medido e simulado para a situação sem blindagem.

Posição (m)	B Medido (μT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	1,86	2,43	23,3
-2,50	2,45	3,07	20,2
-2,00	3,47	3,99	13,0
-1,50	4,61	5,28	12,7
-1,00	6,30	6,94	9,3
-0,50	7,93	8,52	6,9
0,00	8,17	8,97	9,0
0,50	7,01	7,76	9,6
1,00	5,28	5,74	8,1
1,50	3,50	3,97	11,9
2,00	2,37	2,73	13,3
2,50	1,56	1,93	19,1
3,00	1,05	1,41	25,4

Tabela 4-11 - Comparação entre os valores medidos e simulados para a situação sem blindagem.

Inicialmente, os *loops* foram dispostos no arranjo encadeado a uma distância de 35 centímetros da linha. Sendo assim, o posicionamento longitudinal dos condutores do *loop* foi feito na posição de -0,30; 0 e 0,30 metro, considerando a fase central da linha na posição 0 (zero) metro. Para finalizar, a blindagem foi colocada com o mesmo

espaçamento da linha subterrânea. Os resultados da medição e da simulação do campo magnético para esse arranjo na posição original é apresentado na Figura 4.28 e na Tabela 4-12.



Figura 4.28 - Campo magnético medido e simulado para a situação com os loops na posição original.

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	0,47	0,41	12,0
-2,50	0,61	0,57	7,0
-2,00	0,77	0,81	5,4
-1,50	1,02	1,21	18,6
-1,00	1,36	1,84	34,9
-0,50	2,00	2,60	29,8
0,00	2,96	2,98	0,8
0,50	3,11	2,60	16,5
1,00	2,65	1,84	30,7
1,50	1,81	1,21	33,1
2,00	1,28	0,81	36,6
2,50	0,96	0,57	40,9
3,00	0,76	0,41	45,6

Tabela 4-12 - Comparação entre os valores medidos e simulados para a situação com os *loops* na posição original.

A partir da configuração original, foi utilizado o algoritmo genético de otimização para reduzir o campo magnético. Nesse problema, as variáveis de decisão

foram as posições transversais dos *loops*, denominadas de  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  (Figura 4.29). No entanto, o posicionamento dessas variáveis foi restrito ao trecho de -1,0 a 1,0 metro, em decorrência das restrições do arranjo experimental. O melhor resultado encontrado pelo algoritmo foi o seguinte posicionamento simétrico dos cabos: -0,2; 0 e 0,2 metro. A Figura 4.30 e a Tabela 4-13 apresentam os resultados da densidade de fluxo magnético medido e simulado para os *loops* na posição otimizada.



Figura 4.29 - Configuração dos *loops* passivos utilizada na otimização.



Figura 4.30 - Campo magnético medido e simulado para os loops na posição otimizada.

Posição (m)	B Medido (µT)	B Simulado (μT)	Diferença (%)
-3,00	0,83	0,91	9,1
-2,50	1,12	1,16	3,8
-2,00	1,55	1,50	3,2
-1,50	2,11	1,91	10,3
-1,00	2,46	2,21	11,2
-0,50	2,20	1,84	19,5
0,00	1,12	0,73	52,8
0,50	2,23	1,61	38,3
1,00	2,27	1,92	18,0
1,50	1,70	1,61	5,3
2,00	1,20	1,22	1,9
2,50	0,91	0,91	0,3
3,00	0,63	0,69	8,5

Tabela 4-13 - Comparação entre os valores medidos e simulados para a situação com os *loops* na posição otimizada

Como pode ser observado, de modo geral os resultados simulados do campo magnético apresentaram a mesma tendência dos valores medidos. Novamente, as maiores diferenças podem ser explicadas pelos problemas já apontados anteriormente. Além disso, as pequenas incertezas no posicionamento dos *loops* na montagem causam a falta da simetria e, consequentemente, diferenças no campo resultante. Por fim, a Figura 4.31 apresenta os fatores de redução medidos e simulados para as configurações dos loops na posição original e otimizada.



Figura 4.31 - Fatores de Redução medidos e simulados para as configurações dos *loops* na posição original e otimizada.

Uma análise destes resultados evidencia que a otimização da posição longitudinal dos *loops* proporcionou um aumento de 26 e de 35% para os fatores de redução medidos e simulados, respectivamente. Portanto, para uma mesma quantidade de material, a disposição ótima dos *loops* melhorou consideravelmente a eficiência da blindagem, comprovando, assim, a importância do estudo da otimização para o arranjo de *loops*, o qual será desenvolvido no Capítulo 5.

# 4.6. Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados experimentais dos fatores de redução para diferentes configurações de *loops* passivos, com baixo e com alto acoplamento. Nesse contexto, foi utilizada a metodologia de cálculo do campo magnético apresentada no Capítulo 3, para a comparação dos valores medidos com os simulados. A Figura 4.32 traz um resumo dos principais resultados obtidos nessa etapa do trabalho.



Figura 4.32 - Resumo dos fatores de redução encontrados no estudo experimental.

Dentre as configurações de baixo acoplamento, a configuração dos *loops* passivos em 8 voltas independentes apresentou a maior atenuação do campo, com FR medido de 2,33. Contudo, essa técnica proporciona uma mitigação pequena em comparação com a técnica de *loops* passivos de alto acoplamento, com fatores de

redução medidos de 3,95 e 16,58 para as configurações do *loop* encadeado e do HMCPL, respectivamente. A inserção dos núcleos magnéticos no circuito de compensação eleva o custo financeiro da blindagem. No entanto, o uso de comprimentos menores dos *loops* pode tornar essa solução financeiramente mais viável. Observou-se também que os resultados das simulações foram considerados satisfatórios, validando novamente a metodologia de cálculo analítico do campo magnético.

Além disso, foi realizado um estudo preliminar a respeito da otimização do posicionamento dos *loops*. Sendo assim, para a configuração de blindagem proposta, a melhor disposição dos *loops* foi definida para proporcionar uma maior atenuação do campo magnético, obtendo-se um fator de redução medido 26% maior do que aquele relativo ao posicionamento original.

# 5. LOOPS PASSIVOS – ESTUDOS DE CASOS

## 5.1. Introdução

Neste capítulo será apresentado um estudo de casos de *loops* passivos para a blindagem do campo magnético nas proximidades de linhas subterrâneas. Os objetivos analisados no presente estudo foram: o fator de redução, o impacto causado na corrente máxima admissível da linha e o custo financeiro da solução aplicada. Portanto, para alcançar os objetivos estipulados, foram utilizados métodos de otimização multiobjetivo (NSGA-II [14] e Soma Ponderada [15] com Algoritmo Elipsoidal [16]) para a determinação das melhores configurações de *loops* passivos com baixo e alto acoplamento, cujos resultados foram obtidos com base nas metodologias de cálculo propostas no Capítulo 3.

Inicialmente, foi realizada uma análise para atender a dois dos objetivos listados acima, a saber: a eficácia da blindagem (problema magnético) e as perdas causadas na capacidade de condução de corrente da linha (problema térmico). Posteriormente, o custo financeiro do sistema de blindagem (problema econômico) foi incorporado à modelagem do problema, configurando, assim, o problema de otimização com três objetivos.

# 5.2. Linha Subterrânea

Para tal estudo de casos, foi modelada uma vala típica de uma linha de transmissão subterrânea, cujos cabos de alta tensão foram enterrados com 1,5 metro de profundidade e dispostos na configuração horizontal. Os condutores utilizados foram de alumínio, com isolação em XLPE e área da seção transversal de 800 mm<sup>2</sup>. Neste estudo, foram considerados dois trechos existentes em um sistema subterrâneo de transmissão de energia: o trecho convencional e a caixa de emendas.

No trecho convencional, os cabos são lançados na sua configuração normal, ou seja, com espaçamento entre as fases de 30 centímetros. No entanto, devido ao peso dos cabos, não se torna possível o lançamento dos cabos para longas distâncias. Sendo assim, torna-se necessária a junção dos cabos em determinados pontos da linha

subterrânea, denominados de caixa de emendas. Nessas regiões, em virtude do tamanho das emendas realizadas (Figura 2.12), faz-se necessário um maior afastamento entre as fases, resultando em um espaçamento de 75 centímetros. A Figura 5.1 apresenta a configuração da linha subterrânea, enquanto a Tabela 5-1 descreve os parâmetros do cabo de alta tensão modelado.



Figura 5.1 - Corte transversal da vala típica de uma linha subterrânea.

Diâmetro do condutor	33,9 mm	Resistência DC (20°C)	0,0367 Ω/km
Espessura da isolação	19,2 mm	Resistividade térmica da isolação	3,5 K.m/W
Espessura da blindagem (Chumbo)	2,7 mm	Resistividade térmica da capa externa	3,5 K.m/W
Espessura da capa	3,5 mm	Coeficiente térmico	Al – 4,03 x10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
externa			Ch – 4,00 x10 <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>

Tabela 5-1 - Parâmetros do cabo da linha subterrânea.

As configurações de *loops* passivos determinadas para o presente estudo foram os arranjos com compensação capacitiva e alto acoplamento, pois estas apresentaram maior eficácia dentre as configurações estudadas nos capítulos anteriores. Desta forma, com a modelagem da linha subterrânea e a definição das configurações de blindagem, foi possível a determinação do problema a ser otimizado. Os parâmetros principais dos algoritmos de otimização multiobjetivo implementados são descritos a seguir.

#### 5.2.1. Variáveis de decisão

Variáveis de decisão são os valores que se procura determinar pelo processo de otimização, ou seja, os parâmetros físicos do sistema de blindagem. Para as

configurações analisadas, o arranjo implementado dos *loops* passivos foi o encadeado, mostrado na Figura 3.2 (b) e (d).

Nos *loops* com compensação capacitiva, as variáveis de decisão foram as posições ( $\mathbf{x} \in \mathbf{y}$ ) dos *loops*, área da seção transversal dos condutores e o nível de compensação capacitiva. Para elevar a eficácia dessa configuração, foram utilizados três capacitores no circuito dos *loops* (Figura 5.2). Dessa forma, foram determinados três níveis de compensação capacitiva, uma vez que C1, C2 e C3 podem assumir valores diferentes, caso o processo de otimização assim o determine.



Figura 5.2 - Loop passivo com compensação capacitiva.

Para a configuração com alto acoplamento, as variáveis foram as posições (x e y) dos condutores dos *loops* e os fatores de acoplamento dos transformadores de corrente inseridos no circuito. Neste caso, não se fez necessária a definição da seção transversal do condutor como variável, pois esse parâmetro foi delimitado pela corrente de compensação, determinada pelo nível de acoplamento. Vale ressaltar que nesta configuração foram utilizados três transformadores de corrente distintos, sendo cada um deles acoplado a uma fase da linha, como mostrado na montagem da Figura 4.16.

#### 5.2.2. Restrições

As restrições do problema de otimização correspondem a limitações de natureza física ou tecnológica dos parâmetros, ou ainda o fato de certas soluções não serem desejáveis. Dessa forma, as restrições do problema foram determinadas para as variáveis de decisão e, em alguns casos, para as funções objetivo.

Em todas as situações, o arranjo dos *loops* passivos foi disposto acima da linha subterrânea. A posição  $\mathbf{x}$  de cada condutor foi determinada pela dimensão da vala da linha subterrânea (Figura 5.1). Dessa forma, a largura (*d*) da vala foi de 1,0 e 3,0 metros para o trecho convencional e para a caixa de emendas, respectivamente. Além disso,

para a posição y de cada condutor, foi garantida uma distância mínima do solo de aproximadamente 50 centímetros. Do mesmo modo, para evitar sobreposição dos condutores dos *loops* com os da linha, foi definido um afastamento mínimo entre eles, correspondente ao raio do cabo da linha subterrânea. Outra restrição aplicada ao problema foi referente às dimensões das seções retas dos condutores dos *loops*, tendo sido consideradas as bitolas de 35, 70, 120, 240, 500 e 1000 mm<sup>2</sup>.

No problema com dois objetivos, tanto os níveis de compensação capacitiva quanto os fatores de acoplamento foram restringidos a valores possíveis, ou seja, no intervalo entre 0 a 100%. No entanto, para o estudo do problema com três objetivos, o nível de compensação capacitiva foi determinado pelos capacitores mostrados na Tabela 3-11 pois, para a determinação do custo da blindagem, foi necessário considerar o preço do capacitor utilizado. No caso da blindagem com alto acoplamento, o preço do núcleo magnético foi determinado pelo seu peso, não havendo assim a necessidade da discretização dos projetos dos transformadores de corrente.

As funções objetivo também podem ser restringidas para a determinação de soluções desejáveis, ou seja, adota-se limites máximos ou mínimos do valor da função objetivo. No entanto, esses valores devem ser cuidadosamente determinados, pois o algoritmo não necessariamente converge para essas soluções. Portanto, para cada situação necessária, é preciso a imposição das restrições pertinentes ao problema em questão.

### 5.2.3. Funções objetivo

Os valores das funções objetivo foram minimizados para a determinação do conjunto de soluções e, desta forma, os três objetivos foram:

- valor máximo do campo magnético resultante (problema magnético);
- perda na capacidade de transmissão de corrente na linha causada pelo uso da blindagem (problema térmico).
- custo financeiro dos materiais utilizados no sistema de blindagem (problema econômico).

Na minimização do campo magnético, o valor definido foi o máximo do campo no perfil e não em um único ponto de interesse, de forma que o perfil do campo foi calculado em um eixo perpendicular à linha a 1,5 metro da superfície do solo e para uma largura de 8 metros. A eficácia da blindagem, denominada de Fator de Redução (FR), foi calculada com base na equação (3.25). A Figura 5.3 apresenta os perfís do campo magnético calculados sem a presença da blindagem para o trecho convencional e para a caixa de emendas.



Figura 5.3 - Perfil do campo magnético sem o uso de blindagem, para o trecho convencional e para a caixa de emendas.

A região considerada mais crítica nos sistemas de distribuição subterrâneos é o ponto de junção dos cabos (caixa de emendas), onde o espaçamento dos cabos é maior. Esse maior afastamento entre as fases resulta em um campo magnético mais elevado que o campo em trecho convencional da linha (Figura 5.3), onde os cabos encontram-se mais próximos. Logo, nas proximidades de caixas de emendas, geralmente são utilizadas blindagens com fatores de redução mais elevados devido à necessidade de se atingir maiores atenuações de campo magnético.

Para a resolução do problema térmico, a resistividade térmica do solo e do *backfill* foi considerada igual a 1 K.m/W e a temperatura ambiente igual a 25°C. Nessa situação, para a temperatura em regime permanente de 90°C no condutor, a corrente máxima permitida na linha foi de aproximadamente 827,2 A. A partir dessa corrente, foi calculado o impacto causado pela presença de *loops* passivos por meio da perda percentual na ampacidade nominal da linha.

A estimativa do custo da blindagem foi realizada levando-se em conta o preço dos materiais utilizados no circuito dos *loops*. Para isso, foram contabilizados os preços dos equipamentos (cabos, capacitores e núcleos magnéticos) apresentados no Capítulo 3 para a determinação da estimativa total do custo financeiro da blindagem.

Como já discutido, o maior espaçamento entre os cabos na caixa de emendas resulta em um campo magnético mais elevado que o campo em um trecho convencional da linha. Contudo, esse maior afastamento proporciona um aquecimento mútuo menor entre as fases, ou seja, para a corrente máxima de operação, os condutores da linha nesse trecho encontram-se em temperatura inferior a 90°C. Sendo assim, a presença da blindagem poderá impactar menos a capacidade de transmissão de corrente da linha.

Além disso, as diferenças nas dimensões das valas para o trecho convencional e para a caixa de emendas influenciam nas restrições do problema de otimização. Logo, fez-se necessário o projeto de *loops* passivos para a blindagem do campo magnético nessas duas situações. Desta forma, para todos os problemas analisados, o trecho convencional de uma linha subterrânea foi definido com o espaçamento entre os cabos de 30 centímetros e comprimento do trecho de 200 metros. Já no trecho da caixa de emendas, o espaçamento e o comprimento foram definidos de 75 centímetros e de 12 metros, respectivamente.

#### 5.2.4. Definição matemática do problema

O problema de otimização analisado no presente trabalho se refere à mitigação do campo magnético gerado por linhas subterrâneas por meio da técnica dos *loops* passivos, podendo ser definido matematicamente como:

$$\boldsymbol{x}^{*} = \arg\min_{\boldsymbol{x}} [f_{1}(\boldsymbol{x}), f_{2}(\boldsymbol{x}), f_{3}(\boldsymbol{x})]$$
(5.1)

sujeito as seguintes restrições:

$$\begin{cases} -0.5 \le x_n \le 0.5 \ (trecho\ convencional) \\ -1.25 \le x_n \le 1.25 \ (caixa\ de\ emendas) \\ -1.45 \le y_n \le -0.5 \\ 0 \le FA \le 1 \\ 0 \le FC \le 1\ ou\ FC \ = \ C(10, 15, 22, 33, 47, 68, 100, 150\ ou\ 220\ mF) \\ R(35, 70, 120, 240, 500\ ou\ 1000\ mm^2) \\ FR \ge 1 \end{cases}$$
(5.2)

sendo que:

x – variáveis de decisão: x<sub>n</sub> e y<sub>n</sub> (posição do condutor "n" dos *loops*), FA ou FC (fator de acoplamento ou compensação) e **R** (seção transversal dos condutores);

 $f_1$  – máximo do campo magnético resultante;

 $f_2$  – perda na ampacidade;

 $f_3$  – custo financeiro;

C – capacitores de compensação;

FR - fator de redução.

É importante destacar que os métodos de otimização multiobjetivo geram um conjunto diverso de resultados ( $x^*$ ), sendo que a solução a ser implementada deverá ser escolhida no conjunto de soluções com base nas necessidades da aplicação em questão. No presente trabalho, foram utilizados os métodos de NSGA-II e da Soma Ponderada com o algoritmo Elipsoidal para a resolução do problema descrito nas equações (5.1) e (5.2).

## 5.3. Estudo de Caso com Dois Objetivos

Nesta etapa do trabalho, o problema de blindagem do campo magnético foi otimizado para apenas dois objetivos: eficácia da blindagem e impacto causado na capacidade de condução de corrente da linha. Para isso, foram projetadas configurações de *loops* passivos para a mitigação do campo em um trecho convencional e em uma caixa de emendas de uma linha subterrânea.

Devido ao fato do problema analisado nesta fase do trabalho não contemplar o custo financeiro da blindagem, a seção transversal determinada no processo de otimização foi de 1000 mm<sup>2</sup> para a configuração com compensação capacitiva. A utilização da maior bitola pode ser creditada pela diminuição no valor da resistência do condutor, acarretando no aumento da corrente de compensação e na redução das perdas, ou seja, na melhoria dos dois objetivos analisados. Contudo, o cabo de maior bitola possui o preço mais elevado, como mostrado na Tabela 3-1; uma vez que tal desvantagem não foi avaliada neste problema, esta foi a seção transversal do cabo

definida pelo algoritmo. Logo, para efeito de comparação entre as configurações de *loops*, também foi utilizado o condutor de 1000 mm<sup>2</sup> para os arranjos com alto acoplamento.

A seguir são apresentados os resultados obtidos pelos algoritmos de otimização multiobjetivo. Para o algoritmo do NSGA-II, em todas as situações analisadas, o número de indivíduos na população e o número de gerações foram de 300 e 6000, respectivamente. No método da Soma Ponderada, o problema ponderado foi minimizado através do algoritmo Elipsoidal, determinando um conjunto de 50 soluções para cada situação analisada.

#### 5.3.1. Trecho convencional

Na blindagem para o trecho convencional, a posição dos cabos foi restringida pelas dimensões da vala subterrânea, permitindo, assim, que os condutores dos *loops* pudessem ficar próximos aos cabos fase. A Tabela 5-2 apresenta as restrições aplicadas neste item.

Posicionamento lateral do condutor (m)	-0,5 a 0,5		
Posicionamento vertical do condutor (m)	-1,4 a -0,5		
Seção transversal do condutor (mm²)	35, 70, 120, 240, 500 ou 1000		
Fator de compensação (%)	0 a 100		
Fator de acoplamento (%)	0 a 100		

Tabela 5-2 - Restrições para trecho convencional do problema com dois objetivos.

A Figura 5.4 apresenta os resultados obtidos pelo NSGA-II para os arranjos com os núcleos magnéticos e com os capacitores.



Figura 5.4 - Resultados do NSGA-II para o trecho convencional do problema com dois objetivos.

Observando os resultados apresentados na Figura 5.4, pode-se perceber que, como esperado, os objetivos minimizados foram conflitantes, justificando assim, a utilização de técnicas de otimização multiobjetivo para a resolução deste problema. No entanto, o valor máximo do campo magnético resultante não é um bom comparativo quanto ao nível de mitigação do campo. Dessa forma, o parâmetro do Fator de Redução (FR) foi calculado para cada um dos arranjos obtidos. A Figura 5.5 apresenta os conjuntos de soluções obtidos pelo NSGA-II, utilizando o FR e a perda na ampacidade nos eixos do gráfico.



Figura 5.5 - Resultados do NSGA-II para o trecho convencional do problema com dois objetivos (análise do Fator de Redução).

Ao analisar o resultado obtido, pode-se observar que ambas as técnicas dos *loops* apresentaram soluções semelhantes, ou seja, os resultados possuem a mesma tendência nas relações de compromisso entre os objetivos. Contudo, os arranjos com compensação capacitiva apresentaram melhores resultados para as configurações com maior eficácia (FR maior do que 4,5), isto é, para fatores de redução semelhantes, a perda de ampacidade causada foi menor. Cada ponto das curvas corresponde a uma solução diferente para o problema, com diferentes posicionamentos e níveis distintos de acoplamentos ou compensação. É importante ressaltar que a elevação da eficácia da blindagem implicou o aumento da perda na ampacidade da linha subterrânea, mostrando as relações de compromisso entre os objetivos analisados. Além disso, vale destacar que, para as configurações de *loops* implementadas, o algoritmo do NSGA-II conseguiu determinar um conjunto de soluções não dominadas. Dito de outra forma, as soluções da mesma técnica, ou seja, não existiu alguma solução melhor do que as outras nos dois objetivos.

O posicionamento otimizado dos condutores foi distinto na comparação entre as configurações de alto acoplamento e com compensação capacitiva. Tais disposições
foram exemplificadas para as duas configurações de *loops* passivos, sendo utilizadas as soluções com fatores de redução de aproximadamente 4,2 e perdas na ampacidade de aproximadamente 0,81%. A Tabela 5-3 apresenta as variáveis de decisão obtidas pelo NSGA-II, ao passo que a Figura 5.5 mostra o posicionamento dos condutores dos *loops* e da linha subterrânea.

Variáveis de	<b>x</b> <sub>1</sub> ( <b>m</b> )	y <sub>1</sub> (m)	x <sub>2</sub> (m)	y <sub>2</sub> (m)	x <sub>3</sub> (m)	y <sub>3</sub> (m)	Bitola	FA ou FC *
Alto acoplamento	-0,5	-0,61	-0,02	-0,61	0,5	-0,61	1000	$   \begin{array}{r}     (70) \\     1 - 32,05 \\     2 - 32,32 \\     3 - 32,09   \end{array} $
Compensação capacitiva	0,5	-0,85	0,5	-1,07	-0,5	-1,12	1000	1 - 86,39 2 - 72,64 3 - 75,63

Tabela 5-3 - Variáveis de decisão para o treco convencional do problema com 2 objetivos (FR igual a 4,2

\* O índice (1, 2 ou 3) indica o fator de acoplamento ou de compensação dos três condutores dos loops.



Figura 5.6 - Disposição dos condutores para o trecho convencional do problema com 2 objetivos.

A Figura 5.6 mostra que a solução dos *loops* com alto acoplamento apresentou posicionamento semelhante ao dos condutores da linha, ou seja, os loops foram dispostos em uma mesma profundidade, e posicionados no centro e nas extremidades laterais da vala. No entanto, para a solução com compensação capacitiva, os *loops* foram instalados nas extremidades laterais da vala e enterrados em diferentes profundidades. Logo, em virtude da utilização do *backfill* na obra civil, a disposição dos condutores em uma mesma profundidade pode facilitar a instalação dos *loops* na vala.

Dessa forma, em uma aplicação prática, os *loops* com alto acoplamento podem proporcionar um posicionamento mais favorável do que aqueles com compensação capacitiva. Vale ressaltar que, ainda que com algumas variações no posicionamento dentre as diversas soluções, o posicionamento dos *loops* apresentou a mesma tendência mostrada na Figura 5.6 para todas as soluções com alto acoplamento e compensação capacitiva.

Apesar da diferença no posicionamento entre as configurações, as soluções apresentadas na Tabela 5-3 resultaram na mesma atenuação de campo magnético, como demonstrado pelos perfis dos campos magnéticos descritos na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Perfis de campo magnético para o trecho convencional do problema com dois objetivos.

Estas diferenças de posicionamento ocorrem devido aos ângulos de fase das correntes de compensação. Para a configuração de alto acoplamento, o ângulo de fase das correntes nos *loops* é "condicionado" pelo núcleo magnético inserido no circuito, de forma que a corrente que circula em cada um dos cabos dos *loops* terá sentido oposto à corrente em cada cabo da linha (defasagem de 180°). Na configuração sem o uso do transformador, a amplitude e o ângulo de fase da corrente são determinados pelo circuito equivalente formado pela linha e pelos condutores dos *loops* (equação (3.13)), possibilitando, assim, maior "flexibilidade" no posicionamento dos condutores. Essa diferença entre os ângulos de fase das correntes nos *loops* encontra-se ilustrada no diagrama fasorial da Figura 5.8.



(a) *Loops* com alto acoplamento (b) *Loops* com compensação capacitiva Figura 5.8 - Digrama fasorial das correntes para o trecho convencional do problema com 2 objetivos.

No diagrama fasorial é possível observar que, para os *loops* com alto acoplamento, os vetores das correntes de compensação apresentaram a mesma direção e sentido oposto aos vetores das correntes da linha, justificando o posicionamento simétrico dos condutores para gerar um campo oposto ao da linha. Contudo, para a configuração com compensação capacitiva, o baixo acoplamento entre os circuitos fez com que os vetores das correntes de compensação tivessem direção e sentido diferentes dos vetores das correntes da linha, resultando num posicionamento semelhante ao do arranjo em volta independente.

Observando os resultados para os *loops* com alto acoplamento, percebeu-se que, devido à maior proximidade dos *loops* em relação ao nível do solo, os fatores de acoplamento dos transformadores utilizados foram relativamente baixos, de aproximadamente 35%. Dessa forma, a intensidade da corrente de compensação foi menor, acarretando em um impacto reduzido na corrente admissível do sistema, com perda de ampacidade inferior a 7%. Além disso, em virtude do comprimento do trecho convencional (200 metros), foi necessária a utilização de um núcleo magnético com dimensões elevadas para garantir a circulação da corrente em todo o trecho. Uma alternativa recomendada para a redução do tamanho do transformador é a fabricação do núcleo com aço de grão orientado, cuja curva de magnetização apresenta maior inclinação do que a do grão não-orientado (Figura 5.9). Assim, é possível a fabricação de transformadores menores para um mesmo fator de acoplamento. No entanto, o preço

do aço de grão orientado é bem superior ao do não-orientado, inviabilizando a utilização desse material em muitas situações.



Figura 5.9 - Curva de magnetização de diferentes tipos de metais [17].

Para as configurações com compensação capacitiva, o fator de compensação utilizado foi de até 85%, representando, assim, para o trecho com 200 metros de comprimento, um capacitor de aproximadamente 20 mF. Todavia, a tensão induzida no *loop* foi baixa, de aproximadamente 10 V para a solução apresentada na Figura 5.6. Dessa forma, pode-se perceber que os capacitores listados na Tabela 3-11 pertencem à faixa de fatores de compensação calculados para o trecho convencional.

Após a análise das soluções obtidas com o NSGA-II, foi utilizado o método da Soma Ponderada ( $P_{\lambda}$ ) com algoritmo Elipsoidal para a otimização das configurações de *loops* passivos. Dessa forma, foi possível a comparação entre as soluções determinadas nos dois métodos de otimização multiobjetivo. A Figura 5.10 apresenta os resultados obtidos pelo método de Soma Ponderada para os arranjos com alto acoplamento e com compensação capacitiva.



Figura 5.10 - Resultados da Soma Ponderada com Algoritmo Elipsoidal para o trecho convencional do problema com dois objetivos.

Analisando os resultados obtidos pela Soma Ponderada pode-se perceber que o método escalar também determinou um conjunto de soluções não dominadas para a resolução do problema. Sendo assim, foi feita a comparação entre as soluções obtidas pelos dois métodos multiobjetivo (NSGA-II e Soma Ponderada), sendo apresentadas as curvas com resultados para os arranjos com alto acoplamento e com compensação capacitiva nas Figuras 5.11 e 5.12, respectivamente.



Figura 5.11 - Comparação dos resultados dos *loops* com alto acoplamento para o trecho convencional (NSGA-II e Soma Ponderada).



Figura 5.12 - Comparação dos resultados dos *loops* com compensação capacitiva para o trecho convencional (NSGA-II e Soma Ponderada).

Confrontando os resultados obtidos pelo NSGA-II e pela Soma Ponderada, pode-se perceber que as soluções obtidas pelos algoritmos de otimização multiobjetivo foram semelhantes para o arranjo com alto acoplamento (Figura 5.11). No entanto, para os *loops* com compensação capacitiva, o método do NSGA-II apresentou os melhores resultados (Figura 5.12). O pior mapeamento das soluções pelo método da Soma Ponderada pode ser creditado a não convexidade de algumas partes do conjunto de solução, como pode ser observado pelos pontos de inflexão na curva azul da Figura 5.4. Dessa forma, o método escalar não foi capaz de determinar o melhor conjunto de soluções e, consequentemente, a Fronteira Pareto.

Vale ressaltar que as soluções obtidas pela Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal apresentaram as mesmas características de posicionamento dos condutores dos *loops* mostradas nas soluções determinadas pelo NSGA-II (Figura 5.6), tanto para o arranjo com alto acoplamento como para os *loops* com compensação capacitiva.

#### 5.3.2. Caixa de emendas

Para a mitigação do campo magnético nas proximidades de uma caixa de emendas, o posicionamento dos *loops* foi novamente restringido pelas limitações construtivas da vala. A Tabela 5-4 descreve as restrições impostas para este problema, enquanto a Figura 5.13 apresenta os conjuntos de soluções obtidos pelo NSGA-II para as configurações com compensação capacitiva e alto acoplamento.

Posicionamento lateral do condutor (m)	-1,5 a 1,5
Posicionamento vertical do condutor (m)	-1,4 a -0,5
Seção transversal do condutor (mm <sup>2</sup> )	35, 70, 120, 240, 500 ou 1000
Fator de compensação (%)	0 a 100
Fator de acoplamento (%)	0 a 100

Tabela 5-4 - Restrição para a caixa de emendas do problema com dois objetivos.



Figura 5.13 - Resultados do NSGA-II para a caixa de emendas do problema com dois objetivos.

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que as soluções encontradas pelo NSGA-II estiveram na faixa negativa de perda de ampacidade, devido ao maior espaçamento entre as fases nessa região. Todavia, não existe "ganho" na ampacidade, visto que esta é definida pelo ponto onde o cabo apresenta maior temperatura ao longo de toda linha, e não apenas no trecho onde os cabos estão mais distantes entre si. Sendo assim, para a análise de situações reais, foram determinadas soluções que apresentaram impactos reais na corrente admissível do sistema, implementando-se uma restrição para que o valor da perda na ampacidade fosse igual ou superior a 0 (zero). Dito de outra forma, adotou-se uma nova restrição para a função objetivo que determina este valor, obtendo-se maiores fatores de redução, tal como é necessário para as blindagens nas proximidades de caixas de emendas. Sendo assim, foi incorporada a restrição no valor da perda de ampacidade nos algoritmos do NSGA-II e da Soma Ponderada para a determinação dos resultados na caixa de emendas. As Figuras 5.14 e 5.15 apresentam os resultados obtidos pelos métodos de otimização multiobjetivo para os arranjos com alto acoplamento e compensação capacitiva, respectivamente.



Figura 5.14 - Comparação dos resultados dos *loops* com alto acoplamento para a caixa de emendas (NSGA-II e Soma Ponderada).



Figura 5.15 - Comparação dos resultados dos *loops* com compensação capacitiva para a caixa de emendas (NSGA-II e Soma Ponderada).

Como esperado, as soluções encontradas pelos métodos de otimização multiobjetivos acarretaram em redução na capacidade de transmissão da linha. Além disso, para as alternativas consideradas, foram obtidas atenuações do campo magnético superiores a 10 vezes. Logo, a inclusão desta restrição proporcionou soluções mais efetivas de blindagem do que às soluções apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.10.

Confrontando os resultados obtidos pelas duas técnicas de otimização, pode-se perceber que o método Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal apresentou os melhores resultados, determinando soluções com maior eficácia de blindagem e menor comprometimento na capacidade de transmissão de corrente. A discrepância entre à convergência dos métodos pode ser creditada a inclusão da restrição no valor da perda na ampacidade. Dessa forma, apesar do elevado número de gerações, as soluções determinadas pelo NSGA-II não conseguiram convergir para a Fronteira Pareto, indicando uma convergência lenta do algoritmo evolutivo. Além disso, a descontinuidade das curvas determinadas pela Soma Ponderada pode ser creditada a não convexidade de algumas partes do conjunto de solução, principalmente para o arranjo com compensação capacitiva.

Cabe ressaltar que, na comparação entre as técnicas de *loops*, as configurações com alto acoplamento apresentaram os melhores resultados, isto é, para fatores de redução semelhantes, a perda na ampacidade causada foi menor. O maior impacto causado na corrente pela configuração com os capacitores de compensação pode ser creditado ao baixo acoplamento entre os circuitos. Em outras palavras, os *loops* passivos tiveram que ser dispostos muito próximos das fases para aumentar a intensidade da corrente de compensação e, consequentemente, dos fatores de redução. Além disso, para as soluções com fatores de redução mais elevados, foram obtidas correntes de intensidades maiores do que a das fases, devido ao posicionamento mais próximo da linha e a compensação capacitiva. No caso dos *loops* com alto acoplamento, o uso do núcleo magnético possibilitou um afastamento um pouco maior entre os condutores dos *loops* e os da linha subterrânea.

É importante ressaltar que o maior afastamento entre os condutores na caixa de emendas possibilitou a utilização de blindagens com fatores de redução elevados e sem tanto impacto na corrente máxima admissível da linha, em comparação com as soluções obtidas para o trecho convencional.

Para as configurações de *loops* com compensação capacitiva, foi obtido o fator de compensação de no máximo 85%, valor próximo ao implementado para o trecho convencional. No entanto, devido ao menor comprimento da caixa de emendas, esse fator de compensação representa um capacitor de aproximadamente 500 mF, inviabilizando, assim, a utilização dessa solução na região da caixa de emendas. Uma alternativa para reduzir a capacitância é a utilização de voltas em série nos condutores dos *loops* [10], aumentando o comprimento total dos cabos; no entanto, tal alternativa não foi considerada neste trabalho em virtude do acréscimo no custo da blindagem.

Na configuração com alto acoplamento foram obtidos fatores de acoplamento de aproximadamente de 60 a 70% para os maiores fatores de redução do campo. Dessa forma, tal como discutido no Capítulo 3, o aumento do nível de acoplamento fez com que os *loops* fossem instalados mais próximos da linha subterrânea, em comparação com as soluções apresentadas para o trecho convencional.

A Figura 5.16 exemplifica o posicionamento dos condutores dos *loops* passivos para a mitigação do campo magnético na proximidade de uma caixa de emendas, sendo utilizadas as configurações com alto acoplamento (FR de aproximadamente 42 e perda na ampacidade de 0,24% - Figura 5.14) e compensação capacitiva (FR de aproximadamente 15 e perda na ampacidade de 0,21% - Figura 5.15 ). Os perfis de campo magnético originados por essas configurações são mostrados na Figura 5.17.



Figura 5.16 - Disposição dos condutores para a caixa de emendas do problema com dois objetivos.



Figura 5.17 - Perfís de campo magnético para a caixa de emendas do problema com dois objetivos.

Considerando a disposição dos condutores mostrada na Figura 5.16, foi possível observar que o posicionamento dos *loops* apresentou as mesmas características obtidas para as blindagens no trecho convencional. Contudo, para a caixa de emendas, os condutores foram instalados mais próximos da linha subterrânea, devido ao maior fator de acoplamento e a redução das impedâncias mútuas entre os circuitos para as configurações com alto acoplamento e compensação capacitiva, respectivamente. No entanto, em algumas aplicações práticas, dificilmente consegue-se instalar algum sistema de blindagem com distâncias inferiores a 35 centímetros dos cabos de alta tensão, devido à presença do *backfill* no entorno da linha e das etapas de compactação desse material. Sendo assim, foi necessária a imposição de uma limitação construtiva no posicionamento dos condutores dos *loops*, de forma que no problema de otimização com três objetivos foram analisados os resultados sem e com essa restrição.

### 5.4. Estudo de Caso com Três Objetivos

Para o estudo de caso final, foi incorporado o custo financeiro do material no problema descrito anteriormente, representando, assim, um problema de otimização com três objetivos. Logo, para a realização da estimativa do custo, fez-se necessária a discretização de algumas variáveis de decisão (seção transversal e capacitores de compensação), tornando, assim, ineficiente a utilização do algoritmo Elipsoidal para a

resolução do problema, uma vez que é necessária a determinação do valor gradiente da função objetivo. Dessa forma, para o estudo de caso com três objetivos, foi utilizado apenas o método do NSGA-II, sendo que, em todas as situações analisadas, o número de indivíduos na população e o número de gerações foram de 200 e 8000, respectivamente.

As configurações dos *loops* passivos com alto acoplamento e compensação capacitiva foram novamente implementadas para os casos de blindagem nas proximidades de um trecho convencional e de uma caixa de emendas. Contudo, para este problema, foram consideradas as possíveis limitações construtivas na instalação do sistema de compensação, sendo analisadas as situações sem e com o uso dessa restrição.

É importante ressaltar que o conjunto de soluções obtido pelo NSGA-II terá três dimensões, tendo em vista que o problema analisado possui três objetivos. No entanto, em virtude da dificuldade de visualização dos pontos nessa curva, os resultados também serão mostrados graficamente em duas dimensões, para diferentes faixas de preços da blindagem. Desta forma, os resultados obtidos pela otimização multiobjetivo serão apresentados tanto por meio do conjunto de soluções como de curvas em duas dimensões.

#### 5.4.1. Trecho convencional

Para a atenuação do campo magnético nas proximidades de um trecho convencional de linha subterrânea, as configurações de *loops* passivos implementadas foram com alto acoplamento e compensação capacitiva. Com relação ao posicionamento dos condutores dos *loops*, foram consideradas as situações sem e com limitação construtiva, ou seja, variou-se a limitação do posicionamento vertical dos *loops*. As restrições para o trecho convencional do problema com três objetivos foram mostradas na Tabela 5-5.

rubbli 5 5 Resultções para o neeno conteneronar do protrema com des cojentos.				
Posicionamento lateral do condutor (m)	-0,5 a 0,5			
Posicionamento vertical do condutor (m)	-1,4 a -0,5			
sem a limitação construtiva				
Posicionamento vertical do condutor (m)	-1,15 a -0,5			
com a limitação construtiva				
Seção transversal do condutor (mm <sup>2</sup> )	35, 70, 120, 240, 500 ou 1000			
Capacitor (mF)	10, 15, 22, 33, 47, 68, 100, 150 ou 220.			
Fator de acoplamento (%)	0 a 100			

Tabela 5-5 - Restrições para o trecho convencional do problema com três objetivos.

#### 5.4.1.1. Loops com alto acoplamento

As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam os resultados obtidos pelo NSGA-II para a situação sem a limitação construtiva.



Figura 5.18 - Conjunto de soluções com os resultados dos *loops* com alto acoplamento para o trecho convencional (sem restrição construtiva).



Figura 5.19 - Curva com os resultados dos *loops* com alto acoplamento para o trecho convencional (sem limitação construtiva).

Para facilitar a análise dos resultados (Figura 5.18), as soluções obtidas foram mostradas para diferentes limites de preço, resultando na curva em duas dimensões mostrada na Figura 5.19. No entanto, a comparação do custo financeiro entre as soluções de uma mesma faixa de preço não pôde ser realizada, pois o aumento do custo pode resultar na melhoria da eficácia da blindagem, na redução da perda de ampacidade ou na melhoria dos dois objetivos. Sendo assim, a curva em duas dimensões possibilita apenas a comparação entre as soluções de diferentes faixas de preço. A comparação entre o preço das soluções de uma mesma faixa deverá ser realizada por meio da análise da tabela com os resultados de todas as soluções obtidas. Todavia, devido ao número elevado de soluções obtidas, não foi apresentada neste trabalho a tabela com a descrição de todas as soluções correspondentes das funções objetivo.

O crescimento do custo financeiro da blindagem foi exemplificado na Figura 5.20 pelo emprego de setas, sendo mostrada uma parte da faixa de preço de R\$ 30.500,00 a R\$ 49.500,00 da Figura 5.19.



Figura 5.20 - Análise do crescimento do custo financeiro dos *loops* com alto acoplamento.

A partir destas considerações iniciais, observou-se que as soluções de maior custo financeiro apresentaram as melhores relações de compromisso entre os objetivos, ou seja, soluções com maiores fatores de redução e menos impacto na corrente máxima admissível da linha. Os fatores de redução obtidos variaram entre 1 e 17 e resultaram em perdas na ampacidade de até 11%, apresentando um maior impacto na corrente máxima admissível do sistema em comparação aos mesmos resultados obtidos para o problema com dois objetivos (Figura 5.11). A discrepância entre os resultados pode ser creditada à diferença entre as seções transversais dos condutores utilizados. No problema com dois objetivos, como explicado anteriormente, foram utilizados cabos de 1000 mm<sup>2</sup>. Já para o problema com três objetivos, os condutores foram dimensionados a partir da intensidade da corrente de compensação, ou seja, o fator de acoplamento determinou a seção transversal dos *loops* que, para a maioria das soluções, foi inferior a 1000 mm<sup>2</sup>.

É importante ressaltar que o aumento da seção transversal dos condutores dos *loops* resulta na redução do impacto causado na corrente máxima de operação da linha, pois o aumento da bitola reduz a resistência do condutor e, consequentemente, as perdas por efeito Joule. No entanto, a utilização de cabos com maiores seções transversais provoca um acréscimo no custo da blindagem e esta alternativa deve ser considerada apenas para a situação em que é necessário reduzir ao máximo a perda na ampacidade da linha, como pode ser visto na faixa de preço de R\$ 210.000,00 a R\$ 260.000,00 da Figura 5.19.

Com relação ao custo financeiro da blindagem, pode-se perceber que, devido ao comprimento do trecho analisado (200 metros), o preço por metro do condutor foi determinante no custo total do sistema de compensação. Contudo, o preço do núcleo magnético não pode ser desprezado em relação ao valor total, representando aproximadamente 5 a 15% do custo. Para as soluções apresentadas na Figura 5.19, foram obtidos valores entre R\$ 7.500,00 a R\$ 260.000,00 para as configurações de *loops* passivos de alto acoplamento. Além disso, pode-se observar que a incorporação do objetivo do custo financeiro resultou na determinação de soluções intermediárias para as diferentes faixas de preço, de forma que a definição da solução a ser implementada será realizada tomando por base as necessidades do problema em questão e a capacidade de investimento financeiro. Novamente, vale destacar que o NSGA-II conseguiu obter um conjunto de soluções não dominadas nas últimas gerações do problema de otimização.

Para a análise da influência das restrições causadas por possíveis limitações construtivas, foram incorporadas no problema de otimização as restrições descritas na Tabela 5-5, de forma que os resultados são apresentados na Figura 5.21.



Figura 5.21 - Curva com os resultados dos *loops* com alto acoplamento para o trecho convencional (com limitação construtiva).

Confrontando as curvas apresentadas sem e com a limitação construtiva, pode-se observar que as soluções obtidas para a situação com limitação construtiva apresentaram menores fatores de redução devido ao posicionamento mais afastado dos *loops* para as fases. Como discutido no capítulo 3, o aumento do fator de redução é obtido com o aumento do fator de acoplamento. Contudo, à medida que se eleva a intensidade da corrente de compensação, o posicionamento ideal dos *loops* fica cada vez mais próximo dos cabos de alta tensão. Sendo assim, a restrição construtiva limita esse posicionamento mais próximo e, consequentemente, a obtenção de soluções com maiores atenuações do campo magnético.

Vale destacar que, para as soluções com menores fatores de redução (aproximadamente até 6 vezes), as configurações determinadas sem e com uso da restrição construtiva foram bem semelhantes, de forma que a restrição no posicionamento não limitou os resultados com menor nível de mitigação do campo. Essa semelhança entre as soluções ocorreu devido ao posicionamento mais afastado dos condutores dos *loops* para as fases da linha, ou seja, os condutores foram dispostos fora da região restringida. Além disso, é importante ressaltar que os condutores dos *loops* apresentaram as mesmas características de posicionamento mostradas no problema com dois objetivos (Figura 5.6), ou seja, disposição semelhante à das fases da linha subterrânea.

#### 5.4.1.2. Loops com compensação capacitiva

Nesta seção, foram analisados os *loops* com compensação capacitiva para a atenuação do campo magnético nas proximidades de um trecho convencional de linha. Os resultados obtidos pelo NSGA-II são apresentados nas Figuras 5.22 e 5.23.



Figura 5.22 - Fronteira Pareto com os resultados dos *loops* com compensação capacitiva para o trecho convencional (sem restrição construtiva).



Figura 5.23 - Curva com os resultados dos *loops* com compensação capacitiva para o trecho convencional (sem limitação construtiva).

Diante dos resultados encontrados, pode-se perceber que, como esperado, as soluções financeiramente mais caras apresentaram-se como as melhores, de forma que os intervalos dos valores dos fatores de redução e das perdas na ampacidade variaram de 1 a 4,5 e de 0 (zero) a 9%, respectivamente. A diferença entre as soluções para os problemas com dois e três objetivos pode ser explicada pela discretização dos valores de capacitâncias utilizados em cada caso. Para um problema com dois objetivos, a compensação capacitiva foi determinada de 0 (zero) a 100%, ou seja, os valores dos capacitores não foram discretizados. Já para o problema com três objetivos, foram utilizados os capacitores listados na Tabela 5-5.

Além disso, vale destacar que o custo financeiro total da blindagem foi praticamente determinado pelo preço do cabo, maior que 95% do valor total, sendo que, para as soluções com os cabos de maior seção transversal, o preço do capacitor foi inferior a 1% do custo total. Novamente, devido ao comprimento do trecho (200 metros), o custo financeiro da configuração dos *loops* passivos apresentou valores elevados, entre R\$ 7.500,00 a R\$ 114.500,00.

Prosseguindo com a análise para a configuração com compensação capacitiva, o problema foi otimizado com três objetivos para a situação com limitação construtiva no entorno da linha e os resultados dessa análise são apresentados na Figura 5.24.



Figura 5.24 - Curva com os resultados dos *loops* com compensação capacitiva para o trecho convencional (com limitação construtiva).

A partir dos resultados acima, pode-se perceber que, para a situação com limitação construtiva, as soluções obtidas apresentaram menores fatores de redução comparadas ao problema sem essa restrição. Essa diferença na atenuação do campo pode ser creditada ao afastamento entre os condutores provocado pela limitação construtiva. Sendo assim, a corrente de compensação induzida nos *loops* foi reduzida e, consequentemente, também a eficácia da blindagem.

Com relação à disposição dos *loops* na vala subterrânea, pode-se observar que o posicionamento dos condutores apresentou as mesmas características dos problemas com dois objetivos (Figura 5.6), ou seja, os *loops* foram dispostos nas extremidades laterais da vala e enterrados a diferentes profundidades.

#### 5.4.2. Caixa de emendas

Nesta parte do trabalho, em virtude do comprimento da caixa de emendas (12 metros), a configuração de *loops* com compensação capacitiva não foi implementada, pois demanda uso de capacitâncias de valores impraticáveis. Dessa forma, foi analisada apenas a configuração de *loops* com alto acoplamento e as restrições do problema multiobjetivo foram apresentadas na Tabela 5-6. Novamente, foram consideradas as situações sem e com limitação construtiva para o posicionamento dos *loops* no entorno da linha. Além disso, foi adotada também a restrição de perda na ampacidade para a determinação de soluções com maiores fatores de redução.

Posicionamento lateral do condutor (m)	-1,5 a 1,5	
Posicionamento vertical do condutor (m) sem	-1,4 a -0,5	
a limitação construtiva		
Posicionamento vertical do condutor (m)	-1,15 a -0,5	
com a limitação construtiva		
Seção transversal do condutor (mm <sup>2</sup> )	35, 70, 120, 240, 500 e 1000	
Fator de acoplamento (%)	0 a 100	

Tabela 5-6 - Restrição para a caixa de emendas do problema com três objetivos.

#### 5.4.2.1. *Loops* com alto acoplamento

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam os resultados obtidos pelo algoritmo de otimização para a caixa de emendas sem limitação construtiva.



Figura 5.25 - Fronteira Pareto com os resultados dos *loops* com alto acoplamento para a caixa de emendas (sem restrição construtiva).



Figura 5.26 - Curva com os resultados dos *loops* com alto acoplamento para a caixa de emendas (sem restrição construtiva).

Analisando os resultados, observou-se que, para os pontos que correspondem às soluções mais caras, foram obtidos os maiores fatores de redução, atenuando o campo magnético em até 25 vezes. No entanto, algumas soluções apresentaram o maior impacto na corrente máxima admissível do sistema (1,8%) e também um custo financeiro mais elevado (R\$ 10.500,00). Além disso, tem-se que o custo da blindagem na caixa de emendas foi muito inferior àquele obtido para o trecho convencional (Figura

5.19), o que pode ser explicado pela diferença entre os comprimentos dos trechos. Vale ser destacado que, em decorrência do maior afastamento dos cabos fase da linha, as soluções com os maiores FR obtidas para a caixa de emendas apresentaram um menor impacto térmico do que aquelas determinadas para o trecho convencional, 1,8 e 11,1%, respectivamente.

O resultado obtido para o problema com três objetivos teve soluções com menores fatores de redução do que soluções determinadas para problema com 2 objetivos (Figura 5.14). Além disso, apesar do número elevado de gerações, as soluções obtidas pelo NSGA-II não convergiram para a Fronteira Pareto, evidenciando, novamente, a convergência lenta do algoritmo evolutivo para a resolução do problema na caixa de emendas.

Prosseguindo com a análise para a caixa de emendas, foram comparados os resultados obtidos para a situação com limitação construtiva com aquela apresentada na Figura 5.26. Os resultados com menores fatores de redução apresentaram soluções semelhantes para as situações sem e com a restrição de posicionamento; no entanto, para as faixas de preço mais elevadas, foram obtidas soluções distintas em cada situação (Figura 5.27).



SL\* - resultados obtidos para a situação sem limitação construtiva CL \*\* - resultados obtidos para a situação com limitação construtiva

Figura 5.27 - Comparação entre os resultados dos *loops* com alto acoplamento para as situações sem e com limitação construtiva (caixa de emendas).

Diante dos resultados expostos, pode-se observar que, para o problema com restrição construtiva, os fatores de redução obtidos foram menores em comparação com a situação sem essa limitação, evidenciando o mesmo comportamento observado nas soluções obtidas para a trecho convencional (Figuras 5). Além disso, para as soluções com eficácias semelhantes, o custo financeiro da blindagem foi muito superior para as soluções com a restrição construtiva. No entanto, essas soluções apresentaram um menor impacto na ampacidade da linha devido ao posicionamento mais afastado dos *loops* para os cabos de alta tensão.

## 5.5. Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados computacionais de otimização relativos ao projeto de configurações de *loops* passivos para a mitigação do campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão subterrâneas. Para isso, foi modelada uma vala típica de linha subterrânea, analisando-se dois trechos da linha: o trecho convencional e a caixa de emendas. As configurações de *loops* passivos implementadas neste estudo foram as de alto acoplamento e com compensação capacitiva.

Para o projeto do sistema de compensação, foram utilizados os métodos de otimização multiobjetivo do "*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*" (NSGA-II) e da Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal. Para isso, foram considerados três fatores fundamentais de uma blindagem: eficácia, impacto causado na capacidade de transmissão de corrente da linha e custo financeiro do material utilizado. É importante lembrar que os métodos de otimização multiobjetivo determinam um conjunto de soluções para o problema, de forma que a solução a ser implementada deverá ser escolhida nesse conjunto com base nas necessidades da aplicação em questão.

Confrontando os resultados obtidos pelos dois métodos de otimização pode-se perceber as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas utilizadas. O NSGA-II apresentou, para o problema estudado, uma convergência lenta para determinação da Fronteira Pareto, sendo que, para o trecho da caixa de emendas, não fez-se possível a convergência para as soluções ótimas, mesmo implementando um número elevado de gerações (8000). Uma vantagem do algoritmo evolutivo é a possibilidade da utilização de variáveis contínuas e discretas para a resolução do problema. No entanto, o tratamento utilizado para as variáveis discretas não se mostrou completamente eficaz, indicando um fator que pode ser melhorado no desenvolvimento de trabalhos futuros. Analisando os resultados obtidos pelo método da Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal, pode-se perceber que a convergência do método escalar foi mais rápida. No entanto, a presença de variáveis discretas tornou o algoritmo Elipsoidal ineficaz para a resolução do problema com 3 objetivos. Além disso, a limitação existente do método da Soma Ponderada para problemas não convexos resultou em um mapeamento descontínuo do conjunto de soluções dos arranjos com compensação capacitiva. Um resumo dos principais resultados obtidos para o estudo de caso com 3 objetivos encontra-se Tabela 5-7.

<i>Loops</i> passivos	Trecho da linha	Fator de Redução	Perda na ampacidade (%)	Custo Financeiro (R\$)
		1 a 7,6	0 a 8,4	7.500 a 85.000
Alto acoplamento	Convencional	1 a 17,2	0 a 11,1	110.000 a 160.000
		1 a 16,8	0 a 6,4	210.000 a 260.000
Compensação capacitiva		1 a 1,4	0 a 3,7	7.500 a 26.500
	Convencional	1 a 2,0	0 a 9,0	51.000 a 52.500
		1 a 4,6	0 a 8,1	113.500 a 114.500
Alto		1 a 2,8	0 a 0,3	1.200 a 3.500
	Caixa de	1,8 a 14,7	0 a 1,8	3.000 a 5.600
acopiamento	Chichuas	16,8 a 24,9	0 a 0,4	10.000 a 10.500

Tabela 5-7 - Resumo dos resultados obtidos no Capítulo 5.

Vale ressaltar que, para os resultados apresentados na Tabela 5-7, é possível a determinação de soluções com maiores fatores de redução, caso o problema em estudo tenha a necessidade de elevadas atenuações do campo magnético. Para isso, será preciso a definição de uma restrição de um valor mínimo para a função objetivo do problema magnético, como, por exemplo, fator de redução obtido maior que 5. Cabe ressaltar que, contudo, tais soluções implicarão em maior impacto na capacidade de transmissão de corrente e/ou aumento do custo financeiro da blindagem.

# 6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a modelagem utilizada para o projeto de um sistema de compensação baseado em *loops* passivos para a mitigação do campo magnético gerado por linhas de transmissão subterrâneas. Para isso, foi desenvolvida a metodologia de cálculo analítico do campo magnético na ausência e na presença do sistema de blindagem, determinando, assim, a eficácia do sistema de compensação, denominada de Fator de Redução (FR). Da mesma maneira, para a análise do problema térmico, a norma IEC 60287 foi utilizada para o cálculo da capacidade de transmissão de corrente da linha e, consequentemente, das perdas na ampacidade causadas pelo uso da blindagem. As metodologias desenvolvidas para a resolução dos problemas magnético e térmico foram validadas por meio de comparações com resultados computacionais encontrados na literatura. Além disso, um estudo experimental foi realizado para diferentes configurações de *loops* passivos, sendo confrontados os resultados obtidos experimentalmente com os valores calculados pela metodologia de cálculo do campo magnético.

Dentre as configurações de *loops* passivos analisadas, o arranjo com alto acoplamento apresentou as maiores atenuações do campo magnético, sendo medidos fatores de redução de 3,95 e de 16,58 para os arranjos do *loop* encadeado e do HMCPL, respectivamente. Esses valores foram superiores aos fatores de redução medidos para os *loops* passivos com baixo acoplamento (FR de 2,33 para o arranjo em 8 voltas independentes).

Os maiores fatores de redução obtidos pelos *loops* com alto acoplamento podem ser explicados pela utilização dos transformadores de corrente no circuito de compensação. Dessa forma, eleva-se o valor da corrente induzida nos *loops* e, por conseguinte, a atenuação do campo magnético. Da mesma maneira, a corrente de compensação não foi mais determinada pelo posicionamento dos *loops*, mas pelo acoplamento magnético proporcionado pelo transformador, possibilitando um maior afastamento desses condutores da linha subterrânea. Logo, o impacto causado na capacidade de transmissão foi reduzido, resultando em perdas na ampacidade menores do que as proporcionadas pelos *loops* de baixo acoplamento.

Para as configurações com baixo acoplamento, os fatores de redução mais elevados foram obtidos para os arranjos com maior número de voltas e/ou com compensação capacitiva. A utilização do maior número de voltas em paralelo mostrouse mais vantajosa comparada ao uso de condutores com maior bitola. No entanto, a utilização do condutor de maior seção transversal mostrou-se mais eficiente para as configurações com compensação capacitiva, pois a inserção do capacitor no circuito dos *loops* reduz a indutância, tornando mais significativo o efeito do aumento da bitola. Apesar disto, o elevado valor da capacitância pode tornar essa alternativa inviável em situações em que o comprimento total do trecho é reduzido, como, por exemplo, a caixa de emendas.

A partir da análise desenvolvida foi possível evidenciar que a definição dos parâmetros dos *loops* (posição, número de voltas, fator de acoplamento ou compensação capacitiva) influencia diretamente na corrente de compensação e, consequentemente, no nível de atenuação do campo magnético. Da mesma maneira, esses parâmetros também determinam o impacto na operação da linha, pois, termicamente, os *loops* se comportaram como fontes adicionais de calor nos cabos de alta tensão.

Dessa forma, forma utilizados dois algoritmos de otimização multiobjetivo (NSGA-II e Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal) para determinar as melhores configurações dos *loops* passivos, tendo em vista três fatores fundamentais de uma blindagem: eficácia (Fator de Redução), impacto causado na ampacidade da linha e custo financeiro do material utilizado. Os algoritmos de otimização determinaram os conjuntos de soluções para a blindagem tanto de um trecho convencional como de uma caixa de emendas de uma linha subterrânea. Dessa forma, a escolha da solução (configuração do *loop*) a ser implementada deverá ser realizada com base nas necessidades da aplicação em questão, como, por exemplo, atenuação necessária do campo, impacto permitido na ampacidade da linha ou capacidade de investimento financeiro.

Para o trecho convencional, foram analisadas as configurações de *loops* passivos com compensação capacitiva e alto acoplamento. Na configuração com os capacitores, foi atingido atenuações de até 5 vezes, enquanto que, em relação a limitação na capacidade de condução, foi obtida perda de no máximo 3,5%. Para os arranjos dos *loops* com os transformadores de corrente, o maior fator de redução determinado foi de 17 vezes, com perda na ampacidade de até 11%. Além disso, na comparação entre os

resultados com maiores fatores de redução, pode-se perceber que as soluções com alto acoplamento apresentaram custo financeiro maior do que aquelas com compensação capacitiva, devido ao valor mais elevado da corrente de compensação e, consequentemente, a utilização de maiores seções transversais dos condutores dos *loops*. A vantagem dos arranjos com núcleo magnético foi o posicionamento dos *loops* na vala subterrânea, pois a instalação dos condutores em uma mesma profundidade facilita a obra civil e a inserção das camadas de *backfill*. Cabe ser lembrado que maiores atenuações do campo magnético podem ser atingidas por estas configurações de *loops* passivos. No entanto, tais soluções irão provocar maior impacto na capacidade de condução de corrente na linha, o que pode inviabilizar a sua aplicação.

A configuração de *loops* analisada para a caixa de emendas foi a de alto acoplamento, sendo obtidos fatores redução de aproximadamente 25 vezes, associado a uma redução na ampacidade da linha de 2%. O aquecimento mútuo menor entre as fases nesse trecho resultou na determinação de soluções com elevadas atenuações de campo e menor impacto na operação do sistema em comparação com aquelas obtidas para o trecho convencional. Além disso, o custo financeiro da blindagem foi menor na caixa de emendas do que no trecho convencional, devido a diferença entre os comprimentos dos trechos de 12 e 200 metros, respectivamente.

Em relação às soluções obtidas com e sem a limitação construtiva do posicionamento dos *loops*, pode-se inferir que a imposição da restrição provocou a redução da eficácia do sistema de compensação. Todavia, essa redução foi mais significativa para as configurações de *loops* com baixo acoplamento, pois a instalação dos condutores acima da lajota (35 centímetros da linha) resultou na redução da corrente induzida e, consequentemente, na diminuição do fator de redução de 4 para 2,5. Nos *loops* com alto acoplamento, a corrente de compensação é determinada pelo acoplamento magnético proporcionado pelo transformador, não resultando, assim, em reduções bruscas da eficácia de blindagem. Dessa forma, a diminuição do fator de redução do fator de redução to redução so valor encontrado nos arranjos com baixo acoplamento, sendo considerável apenas para as soluções com maiores FR, como nos resultados obtidos tanto para o trecho convencional como para a caixa de emendas.

Em síntese, a técnica dos *loops* passivos apresentou-se como uma alternativa interessante para a mitigação dos campos magnéticos gerados por linhas de transmissão subterrâneas, podendo ser utilizada tanto em trechos convencionais como em caixas de

emendas. Além disso, a constituição da blindagem por cabos isolados facilita a instalação dos *loops* em linhas já existentes, tornando essa alternativa muito atraente por sua viabilidade prática.

No que tange as propostas de continuidade na investigação dos problemas aqui apresentados, uma tarefa de fundamental importância é quantificar o custo financeiro real da configuração dos *loops* e não apenas o custo do material utilizado, contabilizando, assim, os valores de instalação, mão-de-obra (homens-hora) e manutenção do sistema de compensação. Dessa forma, o custo calculado pelo algoritmo será mais próximo do valor encontrado na aplicação prática.

Além disso, os algoritmos de otimização multiobjetivos utilizados, NSGA-II e da Soma Ponderada com algoritmo Elipsoidal, podem ser melhorados para a determinação de soluções mais eficazes, como discutido nas considerações finais do Capítulo 5.

Por fim, ainda com relação a futuras análises, outras configurações de blindagem (chapas metálicas, canaletas e tubos) também podem ter suas dimensões otimizadas. Logo, a mesma análise acerca da otimização multiobjetivo realizada no presente trabalho poderá ser conduzida para outras técnicas de mitigação do campo, considerando os mesmos fatores fundamentais da blindagem: eficácia, impacto causado na capacidade de condução da linha e custo financeiro.

# **BIBLIOGRAFIA**

- [1] ICNIRP International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kH)," 2010. [Online]. Available: http://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPLFgdl.pdf.
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, "Resolução Normativa Nº616,"
   2014. [Online]. Available: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2013/097/resultado/resoluc ao\_398\_atualizada\_2014.pdf.
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas, "Métodos de medição e níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 Hz e 60 Hz," Norma Brasileira - NBR 15415, 2006.
- [4] National Institute for Public Health and the Environment, "Comparison of international policies on eletromagnetic fields (power frequency and radiofrequency fields)," Maio 2011. [Online]. Available: http://ec.europa.eu/health/electromagnetic\_fields/docs/emf\_comparision\_policies \_en.pdf.
- [5] CIGRÉ Working Group C4.204, "Guidelines for mitigation techniques of power frequency magnetic fields originated from eletric power systems, TB 373," 2009.
- [6] M. L. Murta, "Blindagem ativa para campos magnéticos em baixa frequência," Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.
- [7] M. T. A. Êvo, "Estudo de alternativas para a redução do campo magnético de linhas subterrâneas com o menor comprometimento de sua capacidade de transmissão," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2014.
- [8] J. C. del Pino Lopez e P. C. Romero, "Influence of different types of magnetic shields on the thermal behavior and ampacity of underground power cables," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, nº 4, pp. 2659-2667, Outubro 2011.
- [9] J. C. del Pino Lopez e P. C. Romero, "The effectiveness of compensated passive loops for mitigating underground power cable magnetic fields," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, nº 2, pp. 674-683, Abril 2011.
- [10] P. Cruz, J. Hoeffelman e J. C. del Pino Lopez, "Mitigación de campos magnéticos en líneas subterráneas de potencia mediante el elmpleo de lazos passivos," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 4, nº 1, pp. 39-65, Março 2008.

- [11] A. Canova e L. Giaccone, "A novel technology for magnetic-field mitigation: High Magnetic Coupling Passive Loop," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, nº 3, pp. 1625-1633, Julho 2011.
- [12] J. C. del Pino Lopez e P. C. Romero, "Thermal effects on the design of passive loops to mitigate the magnetic field generated by underground power cables," *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 26, nº 3, pp. 1718 - 1726, Julho 2011.
- [13] P. Cruz, J. M. Riquelme, A. de la Villa e J. L. Martínez, "Ga-based passive loop optimization for magnetic field mitigation of transmission lines," *Neurocomput*, nº 70, pp. 2679-2686, 2007.
- [14] K. Deb, S. A. Pratap e T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, nº 2, pp. 182-197, Abril 2002.
- [15] R. H. C. Takahashi, "Otimização Escalar e Vetorial Volume 3," Notas de Aula, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [16] R. R. Saldanha, R. H. C. Takahashi, J. A. Vasconcelos e J. A. Ramírez, "Adaptive deep-cut method in Ellipsoidal optmization for eletromagnetic design," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, nº 3, pp. 1746 - 1749, Maio 1999.
- [17] F. G. Oliveira, "Estudo de instalações de linhas subterrâneas de alta tensão com relação a campos magnéticos," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
- [18] D. S. C. Souza, M. T. A. Êvo, C. E. F. Caetano, H. de Paula, I. J. S. Lopes e R. O. C. Moreira, "Avaliação teórico-experimental de sistemas de blindagem de campos magnéticos nas proximidades de linhas subterrâneas," em *Encontro Nacional Ibero-Americano de Cigré*, Puerto Iguazú, 2015.
- [19] J. C. del Pino, L. Giaccone, A. Canova e P. Cruz, "Ga-based active loop optimization for magnetic field mitigation of MV/LV substations," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, nº 6, 1055 - 1061 Setembro 2014.
- [20] D. S. C. Souza, M. T. A. Êvo, G. E. Viera, A. S. M. Miranda, J. O. S. Paulino, H. de Paula e I. J. S. Lopes, "Estudo experimental de técnicas de blindagem de campo magnético produzidas por linhas de distribuição subterrâneas de 138 kV," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2014.
- [21] R. O. C. Moreira, "Avaliação teórico experimental de campos magnéticos nas proximidades das linhas de transmissão subterrâneas," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.
- [22] CIGRÉ Task Force, "Characterization of ELF magnetic fields, TB 320," 2007.
- [23] CEMIG-D, "Detalhes técnicos do cabo FOREX AL/XLPE 138 kV," 2011.

- [24] "Eletric cables-calculation of current catings-part 1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses-section-general," IEC 60287-1-1, 2006.
- [25] "Eletric cables-calculation of current catings-part 2: thermal resistancecalculation of thermal resistance," IEC 60287-2-1, 2006.
- [26] "Eletric cables-calculation of current catings-part 3: sections on operating conditions - reference operating conditions and selection of cable type," IEC 60287-3-1, 2006.
- [27] D. C. Meeker, "Finite Element Method Magnetics," [Online]. Available: http://www.femm.info.
- [28] Arrow Electronics, [Online]. Available: http://www.arrow.com/. [Acesso em 20 Junho 2015].
- [29] Premier Farnell Company, [Online]. Available: http://cpc.farnell.com/. [Acesso em 20 Junho 2015].
- [30] Vishay Intertechnology, "Capacitors for power eletronic," [Online]. Available: http://www.vishay.com/capacitors/. [Acesso em 20 Junho 2015].
- [31] "Global Optimization ToolBox," MathWorks, [Online]. Available: http://www.mathworks.com/help/gads/genetic-algorithm.html. [Acesso em 17 Maio 2015].
- [32] R. H. C. Takahashi, "Otimização Escalar e Vetorial Volume 1," Notas de Aula, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [33] R. H. C. Takahashi, "Otimização Escalar e Vetorial Volume 2," Notas de Aula, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [34] F. G. S. Santos, "Gerenciamento de riscos: otimização multiobjetivo e análise de portifólio de compra e venda de energia," Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- [35] H. A. da Silva, "Algoritmo de otimização multinível aplicado a problemas de planejamento de redes," Tese de doutorado em Informática, Pontíficia Universidade Católica do Paraná, 2012.
- [36] E. Zitler, M. Laumanns e L. Thiele, "SPEA2: improving the strenght pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization," *Computer Engineering and Networks Laboratory (TIK)*, 2001.
- [37] D. W. Corne, J. D. Knowles e M. J. Oates, "The pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization," *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*, vol. 1917, pp. 839-848, 2000.

- [38] F. Xue, A. C. Sanderson e R. J. Graves, "Pareto-based multi-objective differital evolution," *IEEE Congress on Evolutionary Computation 2*, pp. 862-869, 2003.
- [39] A. R. P. Neto, "Modelo híbrido de otimização multiobjetivo para formação de células de manufatura," Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, 2008.
- [40] A. S. Souza, "Desenvolvimento de modelos e algoritmos sequenciais e paralelos para o planejamento da expansão de sistemas de transmisisão de energia elétrica," Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, 2012.
- [41] A. Martignoni, Transformadores, Rio de Janeiro: Editora Globo, 1969.

# **APÊNDICE A – Otimização Multiobjetivo**

## A.1. Introdução

Entende-se por otimização o processo de determinar as melhores soluções para um determinado problema, sem a necessidade de se avaliar todas as possibilidades de solução. Evidentemente, em cada contexto há um conjunto de informações que permitem a descrição matemática de cada problema, sendo adotada a seguinte formulação geral para um problema de otimização mono-objetivo [32]:

$$\boldsymbol{x}^{*} = \arg\min_{\boldsymbol{x}} f(\boldsymbol{x})$$
sujeito a: 
$$\begin{cases} g_{j}(\boldsymbol{x}) \leq 0, i = 1, \dots, p \\ h_{k}(\boldsymbol{x}) = 0, k = 1, \dots, q \end{cases}$$
(A.1)

O vetor **x** é o vetor das variáveis de decisão, que representa o conjunto das variáveis cujos valores procura-se especificar por meio do processo de otimização [33]. Tal conjunto pode ser formado por números reais ou discretos (inteiros ou binários) e se encontra definido em um espaço de busca das variáveis (*F*). Desta forma, define-se a função objetivo f(.) que será uma função que, para cada conjunto de valores especificados no vetor **x**, irá fornecer o valor da função objetivo, f(x). Essa função representa o índice de desempenho do sistema, cujo valor, por convenção, será minimizado para a determinação do desempenho ótimo [33]. O problema descrito é delimitado pelas restrições de igualdade e de desigualdade, g(x) e h(x), respectivamente. Sendo assim, a partir do problema descrito, é possível a determinação do vetor ótimo das variáveis **x**<sup>\*</sup>, que faz com que a função objetivo atinja seu valor mínimo  $f(x^*)$ . Uma revisão mais detalhada a respeito dos conceitos apresentados nesse índice pode ser encontrada em [15,32,33].

No entanto, cabe apontar que situações encontradas no mundo real apresentam problemas com mais de um objetivo a ser otimizado e, na maioria dos casos, os vários objetivos existentes no problema são conflitantes entre si, ou seja, a melhora de um objetivo provoca uma deterioração de outro. Logo, torna-se necessário o uso de técnicas de otimização multiobjetivos, também denominadas de multicritério, multidesempenho ou otimização vetorial. Esse problema, composto de "m" objetivos, restrições de desigualdade e restrições de igualdade, pode ser definido pela seguinte formulação geral [15]:

$$X^{*} = x^{*} \in \mathbb{R}^{n}$$

$$x^{*} = \arg\min_{x} [f_{1}(x), f_{2}(x), ..., f_{m}(x)]$$
(A.2)
sujeito a: 
$$\begin{cases} g_{j}(x) \leq 0, j = 1, ..., p \\ h_{k}(x) = 0, k = 1, ..., q \end{cases}$$

onde f(.):  $\mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^m$  é o vetor de objetivos do problema e as restrições de igualdade e desigualdade determinam a região factível das variáveis de decisão.

Diferentemente do caso mono-objetivo, a solução do problema multiobjetivo não apresenta necessariamente um ponto ótimo, mas um conjunto de soluções entre as quais não existe uma preferência nítida (**X**\*). Dessa forma, se torna interessante o mapeamento das soluções no espaço dos objetivos. A Figura A.1 apresenta o mapeamento realizado por f(.), transformando os pontos do espaço das varáveis de decisão (*X*) para espaço dos objetivos (*Y*). Os pontos { $y_A$ ,  $y_B$ } no espaço *Y* correspondem às variáveis do ponto { $x_A, x_B$ } no espaço *X*, respectivamente.





Neta situação, torna-se necessária a definição de um parâmetro para a comparação das soluções, sendo adotado neste trabalho a relação de Dominância Pareto assim definida [15]:

**Definição 3.1. (Dominância Pareto)** Seja  $x_1, x_2 \in X$ , dizemos que  $x_1$  Pareto domina (ou, simplesmente domina)  $x_2$  se  $f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$  e  $f_i(x_1) \neq f_i(x_2) \forall i$ . Equivalentemente, afirma-se que  $f_i(x_1) \in Y$  domina  $f_i(x_2) \in Y$ , nessas mesmas condições. Esta relação de dominância é escrita como  $f_i(x_1) \prec f_i(x_2)$ .

A Figura A.2 apresenta uma descrição visual da definição da Dominância Pareto citada anteriormente. Na representação gráfica, um cone paralelo aos eixos coordenados do espaço *Y* é colocado com vértice numa solução. Logo, todos os pontos no interior desse cone são dominados pela solução do vértice, de forma que, na Figura A.2 (a), a solução  $y_A$  domina  $y_B$  [15].



Figura A.2 - Conceito de Dominância Pareto (retirado de [15]).

Dessa forma, torna-se possível a comparação de todas as soluções do problema e, assim, a determinação das soluções não-dominadas ou Pareto-ótimas, definidas como [15]:

*Definição 3.2 (Solução Pareto-ótima ou não-dominada)* Diz-se que  $x^* \in X$  é uma solução Pareto ótima do problema multiobjetivo se não existe qualquer outra solução  $x \in X$  tal que  $f_i(x_1) \leq f_i(x^*)$  e  $f_i(x_1) \neq f_i(x^*) \forall i$ , ou seja, se  $x^*$  não é dominado por nenhum outro ponto factível.

O conjunto dessas soluções e a imagem desse conjunto no espaço dos objetivos são definidos como Conjunto Pareto-ótimo e Fronteira Pareto, respectivamente. A Figura A.3 apresenta a Fronteira Pareto no espaço dos objetivos.



Figura A.3 - Fronteira Pareto no espaço dos objetivos.

Na literatura são encontradas várias abordagens para a resolução de problemas multiobjetivos, sendo os métodos escalares e evolucionários as técnicas mais utilizadas. No método escalar, é reduzido o número de objetivos do problema para apenas um, seja alterando-se a função objetivo (soma ponderada), inserindo novas restrições (*\varepsilon*-restrito) ou utilizando abordagem híbrida de ponderações e restrições [15]. Já no método evolucionário, o problema original é resolvido, ou seja, não é realizada a simplificação dos objetivos. Algoritmos baseados nesse princípio, também chamados de algoritmos evolutivos (AEs), são inspirados no processo biológico de seleção natural e da evolução das espécies de Charles Darwin. Neste sentido, cada indivíduo (solução) que compõe certa população (conjunto de soluções), evolui durante as gerações (iteração) para a resolução do problema. Uma nova geração é originada através do processo de seleção, cruzamento e mutação e, como na teoria de seleção natural, as características das melhores soluções têm maior probabilidade de "sobreviver" para as futuras gerações. Assim, as melhores soluções do problema de otimização são mantidas no processo evolutivo. O método converge quando algum critério de parada é atingido, como por exemplo, o número máximo de gerações é alcançado. Vale ressaltar que, caso a função que se deseja otimizar não seja conhecida, não será possível garantir que os pontos calculados na última geração sejam pontos ótimos do problema [34]. Contudo, o algoritmo genético converge probabilisticamente para a solução ideal. A Figura A.4 apresenta um diagrama simplificado de um Algoritmo Genético, que é o método mais conhecido da família dos AEs.


Figura A.4 - Diagrama básico de um algoritmo genético (retirado de [35]).

A partir do conceito de algoritmo evolutivo apresentado, muitas técnicas de otimização foram desenvolvidas ao longo dos anos para a resolução de problemas multiobjetivos. Dentre as técnicas mais descritas na literatura, encontram-se: os métodos baseados na teoria de evolução de Charles Darwin, sendo eles "*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*" (NSGA-II) [14], "*Strength Pareto Evolutionary Algorithm*" (SPEA-II) [36] e "*Pareto Envelope-based Selection Algorithm*" (PESA) [37]; e o método que se baseia na evolução diferencial "*Multi-Objective Diferential Algorithm*" (MODE) [38].

No presente trabalho foram utilizados o método evolutivo do NSGA-II [14] e o método escalar da Soma Ponderada ( $P_{\lambda}$ ) [15] para a resolução do problema de blindagem do campo magnético, sendo que, para o método escalar, foi utilizado o algoritmo Elipsoidal [16] para a minimização da nova função objetivo. As técnicas de otimização multiobjetivo utilizadas no presente trabalho são descritas a seguir.

## A.2. "Nondominated Sorting Genetic Algorithm" II: NSGA-II

O NSGA-II foi o algoritmo desenvolvido no ano 2000 como aprimoramento do algoritmo NSGA dos mesmos autores [14]. Essa nova versão apresenta menor complexidade computacional do que a antecessora e insere o conceito de elitismo, isto

é, a manutenção dos melhores indivíduos para as futuras gerações. Sendo assim, o algoritmo é capaz de cumprir os dois principais requisitos na resolução de problemas multiobjetivos, que são: convergir para a fronteira Pareto-ótima e determinar um conjunto de soluções distribuídas sobre a fronteira, ou seja, este algoritmo apresenta diversidade das soluções [14].

O NSGA-II é baseado em dois pressupostos principais: a ordenação das soluções em fronteiras hierárquicas de dominância e a utilização da distância de "*crowding*", para diferenciar soluções de uma mesma fronteira. Primeiro, o algoritmo inicia com uma população de pais (Pt) contendo N indivíduos, que é utilizada para gerar uma população de descendentes (Qt) e tamanho N, resultando assim, em uma nova população (F) de tamanho 2N. Após esse passo inicial, um classificador ordena a nova população (F) em uma relação de subconjuntos de acordo com os níveis de não dominância (F1, F2, F3, ..., Fn). Nessa classificação, o subconjunto de nível 1 é o conjunto não dominado que domina todos os outros, o de nível 2 é o subconjunto que domina os restantes, mas é dominado pelo 1, e essa relação vai até o nível n, que não domina ninguém mas é dominado por todos os subconjuntos anteriores [39]. Esses subconjuntos representam as diferentes fronteiras presentes numa população e são apresentadas na Figura A.5.



Figura A.5 - Níveis de não dominância.

Uma vez ordenadas, as soluções pertencentes às primeiras fronteiras Pareto serão incorporadas à nova população até que esta alcance o tamanho N de indivíduos. No entanto, nem todas as fronteiras caberão por completo nessa nova população, sendo então necessário a ordenação das soluções de uma mesma fronteira Pareto. Para isso, é utilizada a ordenação por distância de "*crowding*" ou distância de aglomeração. Nessa classificação é calculada a medida da distância de um indivíduo para seus vizinhos adjacentes em cada uma das dimensões, sendo que as "n" funções objetivos representam "n" dimensões. Caso o indivíduo represente uma das extremidades das fronteiras, o valor da distância de "*crowding*" é atribuído como infinito. Desse modo, o parâmetro é o cálculo do cuboide do "vazio" em torno de uma solução, como pode ser observado na representação geométrica da Figura A.6.



Figura A.6 - Cálculo da distância de aglomeração (retirado de [40])

Portanto, regiões que apresentam menor densidade de soluções, ou seja, maior diversidade, possuem indivíduos com maior distância de "*crowding*", sendo então priorizadas pelo algoritmo. Após essa etapa, os "melhores" indivíduos são escolhidos para a próxima geração, formando assim uma a nova população ( $P_{t+1}$ ). A Figura A.7 apresenta o diagrama de funcionamento para uma iteração "t" do algoritmo NSGA-II.



Figura A.7 - Diagrama do funcionamento do NSGA-II (adaptado de [14]).

## A.3. Soma Ponderada

No método escalar, o problema multiobjetivo original é transformado em um problema mono-objetivo, podendo, assim, ser resolvido por qualquer método de otimização não-linear. Para o método da Soma Ponderada ( $P_{\lambda}$ ), emprega-se uma soma ponderada dos objetivos do problema original, dado pela seguinte formulação [15]:

$$\boldsymbol{x}^{*} = \arg\min_{\boldsymbol{x}} \boldsymbol{w}^{\prime} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} w_{i} f_{i}(\boldsymbol{x})$$
sujeito a: 
$$\begin{cases} g_{j}(\boldsymbol{x}) \leq 0, j = 1, \dots, p \\ h_{k}(\boldsymbol{x}) = 0, k = 1, \dots, q \\ \boldsymbol{x} \in X \end{cases}$$
(A.3)

 $\operatorname{com} w_i \ge 0 \ \operatorname{e} \sum_i w_k = 1.$ 

Dessa forma, qualquer técnica de otimização que for capaz de resolver cada problema mono-objetivo individualmente será capaz de resolver essa formulação em particular. A escolha dos pesos (w<sub>i</sub>) é de fundamental importância, pois afeta diretamente a relevância que se atribui a cada objetivo. Vale ser observado que é necessária a normalização de cada função objetivo, pois elas podem ter diferentes magnitudes, influenciando, assim, no valor da ponderação.

As principais vantagens da Soma Ponderada são a facilidade de programação (computacionalmente muito simples) e do problema ponderado ( $P_{\lambda}$ ) apresentar a mesma estrutura de restrições do problema original [15]. No entanto, essa metodologia não se aplica a problemas não convexos [15]. Além disso, a utilização de vetores de pesos uniformemente distribuídos não garante um conjunto de soluções uniformemente distribuídos não garante um conjunto de soluções uniformemente distribuídos não garante séries podem estar associadas à mesma solução eficiente.

Os métodos de "direção de busca" tendem a ser aplicáveis na resolução do problema ponderado, a menos que haja uma particular complexidade preexistente nos problemas individuais. No caso do presente trabalho, foi utilizado o algoritmo Elipsoidal para a resolução do problema ponderado ( $P_{\lambda}$ ).

## A.3.1. Algoritmo Elipsoidal

O algoritmo Elipsoidal é um método determinístico de otimização que delimita uma região na qual se encontra o ponto ótimo do problema de minimização restrita de uma função, definida matematicamente pela equação (A.1). A ideia básica do método é cercar a região factível do problema com um elipsoide de *n* dimensões, no qual *n* é o número de variáveis da função objetivo. A cada iteração, o valor gradiente da restrição mais violada (ou valor gradiente da função objetivo) é utilizado na geração de um novo elipsoide, menor do que o anterior, mas ainda mantendo em seu interior o ponto ótimo da função. Através de iterações sucessivas, o centro do elipsoide  $E_k$  converge para a solução do problema.

Assumindo que exista o ponto de mínimo ( $x^*$ ), e que seja possível determinar um elipsoide inicial E<sub>0</sub> que contenha esse ponto ( $x^* \in E_0$ ), o método gera uma sequência de elipsoides sucessivamente menores, garantindo que cada um deles contenha o  $x^*$ . Dado um elipsoide E<sub>k</sub>, o próximo elipsoide E<sub>k+1</sub> é gerado através da divisão do elipsoide E<sub>k</sub> em dois, de forma que o elipsoide E<sub>k+1</sub> contenha a solução do problema. A equação genérica de um elipsoide é dada por:

$$E = E(x, Q) = \{x: (x - x_c)^T Q^{-1} (x - x_c) \le 1\}$$
(A.4)

onde  $Q^{-1}$  é a matriz característica do elipsoide (ordem *n*) e  $x_c$  representa o ponto de centro do elipsoide. Logo, o próximo elipsoide será definido por  $x_{k+1}$  e  $Q_{k+1}$ , e dado por [16]:

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\beta_1 Q_k g_k}{(g_k^T Q_k g_k)^{1/2}}$$
(A.5)

$$Q_{k+1} = \beta_2 \left[ Q_k - \frac{\beta_3 Q_k g_k (Q_k g_k)^T}{(g_k^T Q_k g_k)^{1/2}} \right]$$
(A.6)

sendo que  $g_k$  representa o gradiente da restrição mais violada, ou da função objetivo caso  $x_k$  seja viável. No presente trabalho, foi utilizada uma variação do método do Elipsoidal, denominada de Elipsoidal de Cortes Múltiplos (MCEM) [16]. Dessa forma, os valores das constantes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são dados pelas seguintes equações [16]:

$$\beta_1 = \frac{(1+n\alpha)}{(n+1)} \tag{A.7}$$

$$\beta_2 = \frac{[n^2(1-\alpha^2)]}{(n^2-1)} \tag{A.8}$$

$$\beta_3 = \frac{2(1 - n\alpha)}{(n+1)(n+\alpha)}$$
(A.9)

onde  $\alpha$  é o parâmetro do corte. Mais detalhes a respeito do método do MCEM e do cálculo dos parâmetros para cada iteração podem ser encontrados em [16].

Logo, o problema ponderado descrito na equação (A.3) é minimizado através do método Elipsoidal para a determinação das melhores configurações dos arranjos de *loops* passivos.

## **APÊNDICE B – Dimensionamento do Transformador de Corrente**

Para aumentar o acoplamento dos *loops* com os cabos de alta tensão, faz-se necessária a inserção de transformadores de corrente no circuito. Os núcleos magnéticos são projetados de modo que a tensão induzida no seu secundário garanta a circulação de uma determinada corrente de compensação. A estimativa desse valor é dada pela razão da tensão no secundário pela queda da tensão nos *loops*. Logo, esse dimensionamento é realizado para se determinar o fator de acoplamento entre a corrente nos *loops* e na linha. A tensão induzida foi calculada pela seguinte expressão [41]:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{4}, \boldsymbol{4}\boldsymbol{4} \times \boldsymbol{B}_{max} \times \boldsymbol{A}_{c} \times \boldsymbol{N} \times \boldsymbol{f}$$
(B.1)

onde E é a tensão induzida no secundário,  $B_{max}$  é o valor máximo da densidade de fluxo magnético,  $A_c$  é a área da seção transversal do núcleo, N é o número de espiras e f é a frequência de alimentação. No caso dos núcleos projetados com o propósito de blindagem, o número de espiras e a frequência são 1 e 60 Hz, respectivamente.

O valor do fluxo magnético é estimado através da curva de magnetização do tipo de aço utilizado. Para isso, é necessário se determinar o campo magnético confinado no núcleo, dado pela seguinte expressão:

$$H = \frac{l}{l_{med}} \tag{B.2}$$

onde H é o campo magnético, I é a corrente que circula nas fases e  $l_{med}$  é o comprimento médio do núcleo. Para os transformadores dimensionados neste trabalho, o aço considerado foi o SAE 1006 de grão não-orientado. A Figura B.1 apresenta a curva de magnetização desse tipo de aço.

Os valores do comprimento médio e da área da seção transversal são determinados pelas dimensões físicas do núcleo. A Figura B.2 apresenta o projeto de um núcleo ferromagnético especialmente projetado para o sistema de compensação.



Figura B.1 - Curva de magnetização do SAE 1006 [27].



Figura B.2 - Dimensões do núcleo ferromagnético utilizado na blindagem de *loops* com alto acoplamento.

Para o núcleo mostrado na Figura B.2, o comprimento médio do núcleo de material ferromagnético é:

$$l_{med} = \frac{(2a+2c) + (2d+2e)}{2} = a + c + d + e \tag{B.3}$$

Sendo assim, a partir da determinação das dimensões do núcleo e da definição das seções transversais dos *loops*, foi possível estimar o valor do fator de acoplamento do transformador.