

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE E DUTOS METÁLICOS AÉREOS

Aluno: Hugo Rodrigues VieiraOrientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira SchroederCo-orientador: Prof. Dr. Warlley de Sousa Sales

São João del-Rei, Dezembro de 2013



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



CEFET-MG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO OPERANDO EM REGIME PERMANENTE E DUTOS METÁLICOS AÉREOS

por

Hugo Rodrigues Vieira

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos.

Linha de pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado.

Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder **Co-orientador:** Prof. Dr. Warlley de Sousa Sales

São João del-Rei, Dezembro de 2013



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Hugo Rodrigues Vieira

Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos

São João del-Rei, Dezembro de 2013

"Acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos"

Hugo Rodrigues Vieira

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Apresentada em 20 de Dezembro de 2013.

Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder – Doutor UFSJ – Orientador

> Prof. Warlley de Sousa Sales – Doutor UFSJ – Co-orientador

Prof. Márcio Matias Afonso – Doutor CEFET – MG – Membro interno

Prof. Clever Sebastião Pereira Filho – Doutor UFMG – Membro externo

"Dedico esta conquista ao meu pai, Márcio Vilela Vieira, e a minha mãe, Maria José Rodrigues Vieira, pelo apoio incondicional na busca de mais uma vitória".

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela saúde, perseverança e dedicação que precisei ter durante este período todo de mestrado.

Agradeço ao meu amigo, e também orientador, professor Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, pela acolhida, pelos ensinamentos, conselhos, conversas, enfim, por todo o apoio e atenção direcionados a mim.

Ao meu co-orientador, professor Warlley de Sousa Sales, agradeço pelos ensinamentos e orientações para realização deste trabalho.

Agradeço aos professores Manso, Leônidas, Márcio e Valceres pelas disciplinas ministradas durante o período de mestrado.

Agradeço meu pai Márcio Vilela Vieira por sempre me apoiar, a minha mãe Maria José pelas palavras de incentivo para continuar, e a minha irmã Suzana pelo carinho e orientações.

Aos meus colegas de mestrado, agradeço pela ajuda nos momentos de dificuldade e por dividirem comigo conhecimentos, anseios, dúvidas etc. Não posso deixar de citar alguns deles tais como: Rodolfo Antônio, André Tiso, Moisés, Fernando Assis, Rubisson e a Mariana, os quais sempre me ajudaram quando precisei. Enfim, todos foram muito importantes nesta caminhada.

Agradeço ao meu aluno Igor Evandro pelo apoio durante a elaboração do trabalho.

Agradeço a Meghy Silva Marques por incondicionalmente desejar que este trabalho se concretizasse.

Agradeço especialmente a pessoa que me trouxe para a Universidade Federal de São João del-Rei, meu amigo e companheiro de trabalho Eduardo Ferroni, sem seu apoio e incentivo este momento não teria chegado.

Finalmente, agradeço à Universidade Federal de São João del-Rei pela acolhida e oportunidade de realizar este trabalho.

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES	xii
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Contextualização da dissertação	1
1.2 – Relevância do tema sob investigação	4
1.3 – Objetivos geral e específicos	5
1.4 – Metodologia	5
1.5 – Organização do texto	6
1.6 – Publicação decorrente desta dissertação	7
CAPÍTULO 2 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOB ESTUDO	8
2.1 – Introdução	8
2.2 – Linhas de transmissão	8
2.2.1 – Visão geral	8
2.2.2 – Características físicas das linhas de transmissão aéreas	11
2.2.3 – Descrição das linhas de transmissão sob estudo	13
2.3 – Dutos	19
2.3.1 – Visão geral	19
2.3.2 – Características físicas dos dutos	22
2.4 – Linhas de transmissão e dutos	24
2.5 – Conclusão	25
CAPÍTULO 3 – ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE LINHAS	DE
TRANSMISSÃO E DUTOS METÁLICOS	26
3.1 – Introdução	26
3.2 – Avaliação dos efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos	27

SUMÁRIO

3.3 – Visão geral da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos 31		
3.3.1 – Introdução		
3.3.2 – Aspectos físicos		
3.3.3 – Descrição		
3.4 – Modelagem eletromagnética para análise da interferência magnética		
3.4.1 – Introdução		
3.4.2 – Premissas e limites de validade41		
3.4.3 – Cálculo dos campos vetoriais intensidade de campo magnético $\left(ec{H} ight)$ e densidade		
de fluxo magnético (\vec{B}) 48		
3.4.3.1 – Lei de Ampère para fenômenos quase estáticos		
3.4.3.2 – Método das Imagens49		
3.4.3.3 – Modelagem do efeito do solo: Método das Imagens complexas de A. Deri 52		
3.4.3.4 – Correntes nos cabos fase54		
3.4.3.5 - Inclusão das correntes induzidas nos cabos para-raios pelas correntes dos		
cabos fase		
3.4.3.5.1 – Impedâncias próprias dos cabos fase e cabos para-raios54		
3.4.3.5.2 – Impedâncias mútuas entre cabos fase e cabos para-raios		
3.4.3.5.3 – Cálculo das correntes nos cabos para-raios		
3.4.3.6 – Equações finais para cálculo de (\vec{H}) e (\vec{B}) 62		
3.4.3.6.1 – Introdução62		
3.4.3.6.2 – "Método Aproximado"65		
3.4.3.6.3 – Método no Domínio do Tempo66		
3.4.3.6.4 – Método das Elipses66		
3.4.4 – Tensão e corrente induzidas nos dutos 68		
3.4.4.1 – Lei da indução magnética de Faraday68		
3.4.4.2 – Tensão induzida no duto e tensão do duto70		
3.4.4.3 – Impedância e admitância dos dutos72		
3.4.4.4 – Corrente induzida nos dutos e em corpos em contato com os mesmos73		
3.5 – Técnicas de mitigação74		

3.6 – Conclusão
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES77
4.1 – Introdução
4.2 – Resultados associados à avaliação do campo magnético
4.2.1 – Validação dos resultados77
4.2.1.1 – Comparação com resultados de medições divulgados na literatura78
4.2.1.2 – Comparação com resultados computacionais divulgados na literatura 87
4.2.2 – Análise do perfil transversal do campo magnético a 1 metro do solo95
4.2.2.1 – Sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão
4.2.2.2 – Sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios 101
4.2.2.3 – Sensibilidade em relação à resistividade elétrica do solo
4.2.3 – Polarização do campo magnético112
4.3 – Resultados associados à tensão induzida no duto metálico aéreo
4.3.1 – Análise do perfil transversal da tensão induzida no duto metálico aéreo 115
4.3.1.1 – Sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão
4.3.1.2 – Sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios 118
4.3.1.3 – Sensibilidade em relação à resistividade elétrica do solo
4.3.1.4 – Sensibilidade em relação à altura do duto metálico em relação ao solo126
4.4 – Resultados associados à avaliação da tensão transversal e corrente longitudinal no duto
4.4.1 – Análise da tensão transversal e corrente longitudinal no duto 128
4.4.1.1 – Sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão
4.4.1.2 – Sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios 133
4.4.1.3 – Sensibilidade em relação à resistividade elétrica do solo
4.4.1.4 – Sensibilidade em relação ao posicionamento e a configuração geométrica do duto
4.4.2 – Aspectos de Segurança Pessoal142

4.5 – Conclusão	143
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	145
5.1 – Introdução	145
5.2 – Principais conclusões	146
5.3 – Propostas de continuidade	148
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	150

RESUMO

O território brasileiro, devido a sua grande extensão, é percorrido por um vasto sistema de linhas de transmissão que é responsável pelo abastecimento energético dos grandes, médios e pequenos centros consumidores. O sistema elétrico de potência do Brasil tem em sua matriz energética a geração hidráulica como a maior responsável pela energia, e verifica-se a grande distância entre as usinas hidrelétricas e os centros consumidores; fato este que justifica a existência de linhas de transmissão extensas. Paralelo a este cenário, o transporte dutoviário no Brasil cresce. Este crescimento se dá por motivos de logística de transporte e, principalmente, custos. A implantação de dutos metálicos dentro da faixa de passagem de uma linha de transmissão existente acaba por gerar interferências eletromagnéticas nos mesmos. Tal fato caracteriza um estudo relevante para as empresas dos setores elétrico e dutoviário, pois envolve fatores de seguranca em pessoas, animais ou objetos localizados nas faixas de passagens das linhas de transmissão que as dividem com dutos metálicos, uma vez que equipamentos conectados aos dutos metálicos submetidos a tensões induzidas elevadas podem ser danificados e os referidos dutos metálicos quando submetidos a essas tensões induzidas por um período longo de tempo poderão ter sua estrutura metálica danificada por meio da corrosão da sua proteção catódica. Tendo em vista a conexão proposital dos dutos metálicos ao solo (dutos aterrados), o objetivo deste trabalho é calcular os níveis de interferência magnética (acoplamento magnético ou indutivo) entre linhas de transmissão operando em regime permanente (frequência de 60 Hz) e dutos metálicos aéreos. A interferência magnética é definida como os níveis de campo magnético e tensões/correntes induzidas nos dutos pelas distribuições de correntes, variáveis no tempo, existentes nos cabos fase e cabos para-raios de uma linha de transmissão. Para alcançar o objetivo deste trabalho é realizada a modelagem eletromagnética do acoplamento magnético entre a linha de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos com a inclusão do efeito do solo, via aplicação direta das Equações de Maxwell. O efeito do solo é modelado pelo plano complexo de retorno segundo A. Deri, visto que o campo magnético penetra o solo. A obtenção dos resultados é feita por meio de um programa computacional, desenvolvido no Matlab[®], que permite a realização de uma série de simulações. As análises de sensibilidade incluem, dentre outras, variação das configurações geométricas da linha de transmissão, variações dos parâmetros do solo (notadamente sua resistividade elétrica medida em baixa frequência) e inclusão das correntes induzidas nos cabos para-raios da linha de transmissão. Práticas de proteção são avaliadas, assim como técnicas de mitigação dos efeitos do campo magnético são apresentadas. A validação dos resultados obtidos é feita por meio de comparações com os resultados, experimentais e computacionais, existentes na literatura.

Palavras Chave: Acoplamento Magnético. Dutos Metálicos Aéreos. Linhas de Transmissão. Regime Permanente.

ABSTRACT

The Brazilian territory, due to its big extension, is traversed by a huge transmission lines system which is responsible for the energy supply of large, medium and small consumer centers. The Brazil's electric power system has in its energy matrix, the hydraulic generation as the main responsible for the energy, and it's noticed the enormous distance between the hydroelectric and the consumer centers; so that it justifies the existence of extensive transmission lines. At the same time, the pipeline system in Brazil increases. This raising is due to transportation logistics and, mainly, to costs reasons. The implantation of metallic pipes inside the passband of an existent transmission line generates electromagnetic interferences over them. This fact characterizes a relevant study for the companies of both electrical and pipeline system, because it involves safety factors in people, animals or objects located in the transmission lines passbands that divide them with metallic pipes, once equipment's connected to metallic pipes submitted to high induced voltage can be damaged and the mentioned metallic pipes when submitted to these induced voltage for a long time can have their metallic structure damaged by the corrosion of its cathodic protection. In view of the purposeful connection of the metallic pipes to the soil (grounded pipes), the objective of this project is to calculate the levels of magnetic interference (magnetic or inductive coupling) between transmission lines operating in a permanent regime (60 Hz frequency) and metallic air pipes. The magnetic interference is defined as the levels of magnetic fields and induced voltage/current in the pipes for the current distributions, time-varying, that exist in the phase cable and ground wires of a transmission line. To achieve this project's objective, it's made the magnetic coupling's electromagnetic modeling between the transmission line operating in a permanent regime and metallic air pipes including the soil effect, via direct application of Maxwell Equations. The soil effect is modeled by the complex return plan according to A. Deri, once the magnetic field penetrates the soil. The results obtainment is made by a computing program, developed on *Matlab[®]* which allows users to make a lot of simulations. The sensibility analyzes include, among others, variation of geometric configurations of the transmission line, variations of soil parameters (notedly its electrical resistivity measured in low frequency) and the inclusion of induced currents in transmission lines ground cables. Protection practices are evaluated, as well as techniques for magnetic fields effects mitigations are presented. The validation of the obtained results is made by comparison with the experimental and computation results, which are available in the literature.

Key Words: Magnetic Coupling. Metallic Air Pipes. Transmission Lines. Permanent Regime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Estrutura organizacional e os agentes do setor elétrico brasileiro9
Figura 2.2: Silhueta da torre do Sistema 1 - Linha de Transmissão de 138 kV. Fonte: [11]14
Figura 2.3: Silhueta da torre do Sistema 2 - Linha de Transmissão de 345 kV. Fonte: [11] 15
Figura 2.4: Silhueta da torre do Sistema 3 - Linha de Transmissão de 500 kV. Fonte: [11] 16
Figura 2.5: Altura média dos condutores. Fonte: Adaptado de [11]17
Figura 2.6: Cabo com condutor múltiplo18
Figura 2.7: Fases ABC em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado
Figura 2.8: Fases CBA em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado
Figura 2.9: Mapa dos principais gasodutos do Brasil. Fonte: [11]
Figura 3.1: Comparativo de valores de campo magnético. Fonte: Adaptado de [42]28
Figura 3.2: Gasoduto e linha de transmissão. Fonte: [50]
Figura 3.3: Sistema físico real monofásico generalizado para cálculo do campo magnético, composto por 2 meios semi-infinitos: ar para z > 0 e solo para z < 0. A linha de transmissão se estende ao longo do eixo y. Este sistema de eixos é utilizado em todas as representações geométricas desta dissertação
Figura 3.4: Método das Imagens para um sistema monofásico
Figura 3.5: Método das Imagens para um sistema trifásico
Figura 3.6: Método das Imagens Complexas de A. Deri para um sistema monofásico 53
Figura 3.7: Fases ABC em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado
Figura 3.8: Linha de transmissão trifásica com dois cabos para-raios (D e E)57
Figura 3.9: Linha de transmissão trifásica com dois cabos para-raios e suas imagens no plano complexo de A. Deri, [14]57
Figura 3.10: Sistema físico real para impedâncias mútuas58
Figura 3.11: Sistema físico equivalente para impedâncias mútuas
Figura 3.12: Impedância e correntes de uma linha de transmissão trifásica com dois cabos para-raios
Figura 3.13: Método das Imagens aplicado ao sistema trifásico com dois cabos para-raios.63
Figura 3.14: Campo magnético no ponto P por um sistema trifásico com dois cabos para- raios64

Figura 3.15: Representação da polarização elíptica do campo magnético para um ponto no Figura 3.16: Zona de influência da linha de transmissão no duto. Adaptado de [56]......70 Figura 3.17: Circuito equivalente de parte da seção paralela do duto. Fonte: Adaptado de Figura 4.1: Geometria da linha de transmissão. Fonte [13]......78 Figura 4.2: Silhueta da linha de transmissão. Fonte [13].....79 Figura 4.3: Curva de carga da linha de transmissão no horário de medição. Fonte [13]. 80 Figura 4.4-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta Figura 4.4-B: Perfil de campo magnético obtido por medições. Fonte [13]......81 Figura 4.6-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta Figura 4.6-B: Perfil de campo magnético obtido por medições e cálculos. Fonte [78].84 Figura 4.7: Linha de transmissão de 500 kV com circuito duplo. Fonte [78]......85 Figura 4.8-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta Figura 4.8-B: Perfil de campo magnético obtido por medições e cálculos. Fonte [78]..........86 Figura 4.9-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta Figura 4.10: Linha de transmissão de 765 kV com circuito Horizontal. Fonte [79]......90 Figura 4.11: Linha de transmissão de 765 kV com circuito em Cross Rope. Fonte [79]......90 Figura 4.13-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para as linhas de transmissão apresentadas nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.91 Figura 4.15-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta

Figura 4.16: Análise de sensibilidade do campo magnético a 1 metro do solo, sem os cabos para-raios, para os Sistemas 1,2 e 3, e considerando o solo como um condutor elétrico Figura 4.17: Análise de sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão para os seis sistemas com a mesma corrente de operação (1000 A). 100 Figura 4.18: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 1......101 Figura 4.19: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presenca dos cabos para-raios para o Sistema 2......102 Figura 4.20: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presenca dos cabos para-raios para o Sistema 3......103 Figura 4.21-A: Gráfico do módulo de "p" com várias resistividades e variação da Figura 4.21-B: Gráfico do ângulo de fase de "p" com várias resistividades e variação da Figura 4.22-A: Gráfico do módulo de "p" com várias permissividades elétricas relativas e variação da resistividade elétrica do solo.....106 Figura 4.22-B: Gráfico do ângulo de fase de "p" com várias permissividades elétricas relativas e variação da resistividade elétrica do solo.....107 Figura 4.23: Análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 1 para várias resistividades do solo......108 Figura 4.24: Análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 2 para várias resistividades do solo......109 Figura 4.25: Análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 3 para várias resistividades do solo......109 Figura 4.26: Análise de sensibilidade do campo magnético para os Sistemas 1, 2 e 3 com Figura 4.27: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presença dos cabos Figura 4.28: Onda plana com direção de propagação no eixo y. Fonte: Adaptado de [24]. 112 Figura 4.29: Evolução dos componentes de B ao longo do tempo para o Sistema 3...... 114

v

Figura 4.30: Variação de B_z versus B_x, a cada ciclo, para cinco posições (0, 6, 12, 18 e 24 m), Sistema 3, sem cabos para-raios, resistividade do solo igual a 2400 Ω .m e a 1 metro do solo......114 Figura 4.31: Análise de sensibilidade da tensão induzida nos dutos a 1 metro do solo, sem os cabos para-raios, para os Sistemas 1,2 e 3. 116 Figura 4.32: Análise de sensibilidade da tensão induzida nos dutos a 1 metro do solo, sem os cabos para-raios, para os seis sistemas.117 Figura 4.33: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 1......119 Figura 4.34: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 2......119 Figura 4.35: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 3......120 Figura 4.36: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos Figura 4.37: Perfil da tensão induzida nos dutos para do Sistema 1 com várias resistividades Figura 4.38: Perfil da tensão induzida nos dutos para do Sistema 2 com várias resistividades Figura 4.39: Perfil da tensão induzida nos dutos para do Sistema 3 com várias resistividades Figura 4.40: Perfil da tensão induzida nos dutos para os Sistemas 1, 2 e 3 com resistividade Figura 4.41: Perfil da tensão induzida nos dutos para o Sistema 1 com resistividade do solo de 2400 Ω.m e inclusão dos cabos para-raios.126 Figura 4.42: Perfil da tensão induzida nos dutos para o Sistema 3 com resistividade do solo Figura 4.43: Duto metálico se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão sem que o mesmo possua algum aterramento. Fonte: Adaptado de [56]...... 128 Figura 4.44: Duto metálico se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de Figura 4.45: Duto metálico se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão e é aterrado em uma das extremidades. Fonte: Adaptado de [56]......130

Figura 4.46: Caso A, tensão do duto para os seis sistemas	
Figura 4.47: Caso A, corrente no duto para os seis sistemas	
Figura 4.48: Caso B, tensão do duto para os seis sistemas	132
Figura 4.49: Caso B, corrente no duto para os seis sistemas	
Figura 4.50: Caso C, tensão do duto para os seis sistemas	132
Figura 4.51: Caso C, corrente no duto para os seis sistemas	
Figura 4.52: Casos A, B e C tensão do duto para o Sistema 1	
Figura 4.53: Caso A, corrente no duto para o Sistema 1	
Figura 4.54: Caso B, corrente no duto para o Sistema 1	
Figura 4.55: Caso C, corrente no duto para o Sistema 1	
Figura 4.56: Casos A, B e C tensão do duto para o Sistema 2	
Figura 4.57: Caso A, corrente no duto para o Sistema 2	
Figura 4.58: Caso B, corrente no duto para o Sistema 2	134
Figura 4.59: Caso C, corrente no duto para o Sistema 2	
Figura 4.60: Casos A, B e C tensão do duto para o Sistema 3	
Figura 4.61: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3	
Figura 4.62: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3	135
Figura 4.63: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3	135
Figura 4.64: Caso A, tensão do duto para o Sistema 1	
Figura 4.65: Caso B, tensão do duto para o Sistema 1	
Figura 4.66: Caso C, tensão do duto para o Sistema 1	136
Figura 4.67: Caso A, corrente no duto para o Sistema 1	
Figura 4.68: Caso B, corrente no duto para o Sistema 1	
Figura 4.69: Caso C, corrente no duto para o Sistema 1	
Figura 4.70: Caso A, tensão do duto para o Sistema 2	
Figura 4.71: Caso B, tensão do duto para o Sistema 2	
Figura 4.72: Caso C, tensão do duto para o Sistema 2	
Figura 4.73: Caso A, corrente no duto para o Sistema 2	
Figura 4.74: Caso B, corrente no duto para o Sistema 2	

Figura 4.75: Caso C, corrente no duto para o Sistema 2	
Figura 4.76: Caso A, tensão do duto para o Sistema 3	137
Figura 4.77: Caso B, tensão do duto para o Sistema 3	137
Figura 4.78: Caso C, tensão do duto para o Sistema 3	138
Figura 4.79: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3	138
Figura 4.80: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3	138
Figura 4.81: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3	138
Figura 4.82: Casos A, B e C, tensão do duto para o Sistema 3	139
Figura 4.83: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3	
Figura 4.84: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3	140
Figura 4.85: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3	140
Figura 4.86: Casos A, B e C, tensão do duto para o Sistema 3	141
Figura 4.87: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3	141
Figura 4.88: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3	141
Figura 4.89: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3	141
Figura 4.90: Casos A, B e C, tensão do duto para o Sistema 3	142
Figura 4.91: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3	142
Figura 4.92: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3	142
Figura 4.93: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3	

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Maiores agentes de capacidade instalada no Brasil. Fonte: [22]. 10
Tabela 2.2: Capacidade de geração de energia por estado. Fonte: [21]. 11
Tabela 2.3: Características geométricas e elétricas do Sistema 1 - Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 138 kV. Fonte: Adaptado de [27]
Tabela 2.4: Características geométricas e elétricas do Sistema 2 - Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 345 kV. Fonte: Adaptado de [28]
Tabela 2.5: Características geométricas e elétricas do Sistema 3 - Linha de Transmissão Trifásica Circuito Simples de 500 kV. Fonte: Adaptado de [29]16
Tabela 2.6: Evolução do sistema dutoviário brasileiro. Fonte: Adaptado de [11]21
Tabela 2.7: Números da Transpetro. Fonte: [34]21
Tabela 2.8: Fatores para escolha físico-química de um duto. Fonte [36]23
Tabela 2.9: Principais características de três sistemas dutoviários reais de Minas Gerais.Fonte: [34].23
Tabela 3.1: Valores limite de campos magnéticos, densidades de correntes e correntesinduzidas para o público geral. Fonte: [45], [46], [47] e [48].31
Tabela 3.2: Valores limite de campos magnéticos, densidades de correntes e correntesinduzidas para exposição ocupacional. Fonte: [45], [46], [47] e [48].31
Tabela 4.1: Comparação entre os valores medidos por [13] e os calculados nesta dissertação
Tabela 4.2: Comparação entre os valores medidos por [78] e os calculados nesta dissertação
Tabela 4.3: Comparação entre os valores medidos por [78] e os calculados nesta dissertação
Tabela 4.4: Comparação entre os valores calculados por [24] e os calculados nesta dissertação
Tabela 4.5: Geometrias e características das linhas de transmissão em análise. Fonte [79]. 90
Tabela 4.6: Comparação entre os valores calculados por [79] e os calculados nesta dissertação92

Tabela 4.7: Comparação entre os valores calculados por [80] e os calculados nesta dissertação......95 Tabela 4.8: Informações numéricas da Figura 4.16 referentes ao campo magnético dos três sistemas em análise nesta dissertação......97 Tabela 4.9: Características geométricas e elétricas do Sistema 4. Fonte: Adaptado de [11]. Tabela 4.10: Características geométricas e elétricas do Sistema 5. Fonte: Adaptado de [11]. Tabela 4.11: Características geométricas e elétricas do Sistema 6. Fonte: Adaptado de [79]. Tabela 4.12: Informações numéricas da Figura 4.17 referentes ao campo magnético dos seis sistemas simulados para avaliação da sensibilidade quanto à geometria da linha de Tabela 4.13: Informações numéricas da Figura 4.18 referente ao campo magnético gerado pelo Sistema 1 com e sem a presença dos cabos para-raios.102 Tabela 4.14: Informações numéricas da Figura 4.19 referente ao campo magnético gerado Tabela 4.15: Informações numéricas da Figura 4.20 referente ao campo magnético gerado Tabela 4.16: Informações numéricas da Figura 4.26 referentes ao campo magnético dos três Tabela 4.17: Informações numéricas da Figura 4.27 referentes ao campo magnético gerado pelo Sistema 3 com e sem os cabos para-raios para uma resistividade de 2400 Ω.m. 112 Tabela 4.18: Informações numéricas da Figura 4.31 referentes à tensão induzida nos dutos dos Sistemas 1,2 e 3 sob estudo nesta dissertação.....116 Tabela 4.19: Informações numéricas da Figura 4.32 referentes à tensão induzida nos dutos dos seis sistemas em análise nesta dissertação para avaliação da sensibilidade quanto à geometria da linha de transmissão.118 Tabela 4.20: Informações numéricas da Figura 4.33 referentes à tensão induzida nos dutos Tabela 4.21: Informações numéricas da Figura 4.34 referentes à tensão induzida nos dutos do Sistema 2......120

Tabela 4.22: Informações numéricas da Figura 4.35 referentes à tensão induzida nos dutos
do Sistema 3
Tabela 4.23: Informações numéricas da Figura 4.36 referentes à tensão induzida nos dutos
do Sistema 3 para uma resistividade do solo igual a 2400 Ω .m.
Tabela 4.24: Informações numéricas da comparação dos valores máximos do Sistema 3
com e sem a inclusão do efeito do solo na tensão induzida122
Tabela 4.25: Informações numéricas da tensão induzida com a variação da altura dos dutos
para o Sistema 3127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ABRATE	Associação Brasileira de Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica	
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	
CAA	Condutor de Alumínio com alma de Aço	
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais	
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica	
CESP	Companhia Energética de São Paulo	
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco	
CIGRÉ	Conselho de Grandes Sistemas Elétricos	
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico	
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética	
CNP	Conselho Nacional do Petróleo	
CPFL	Companhia Paulista Força e Luz	
COPEL	COPEL Geração e Transmissão	
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A	
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	
FEM	Força Eletromotriz	
FURNAS	Furnas Centrais Elétricas	
GASBEL I	Gasoduto Duque de Caxias - Betim	
GASBEL II	Gasoduto Volta Redonda - São Brás do Suaçuí	
GASMIG	Companhia de Gás de Minas Gerais	
GASNET	Companhia de Transporte de Gás	
GASPAJ	Gasoduto Paulínia - Jacutinga	
GNL	Gás Natural Liquefeito	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
ICNIRP	International Commission on non-Ionizing Radiation Protection Technical Report	
MME	Ministério de Minas e Energia	
OMS	Organização Mundial de Saúde	
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico	
ORBEL	Oleoduto Rio - Belo Horizonte	
ORSUB	Oleoduto Recôncavo - Sul da Bahia	
OSBRA	Oleoduto São Paulo - Brasília	
PETROBRÁS	Empresa brasileira responsável pela extração e transporte de petróleo	
PILT	Pacote Computacional de Cálculo de Interferências Eletromagnéticas devido às	
	Linhas de Transmissão	
	Refinaria do Planalto Paulista	
	Refinaria Landulpho Alves	
RING	Raio Medio Geometrico	
SEP	Sistema Eletrico de Potencia	
SNPIEE	Seminano Nacional de Produção e Transmissão de Energia Eletrica	
TRACIEBEL		
IRANSPETRO	I ransportadora de Petroleo e derivados da PETROBRAS	

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 – Contextualização da dissertação

O sistema de energia elétrica tem sua configuração formada basicamente pela geração, transformação, transmissão e distribuição. Dentre estes citados, o que possui maior extensão está relacionado à transmissão. Corresponde basicamente às linhas de transmissão (cabos fase, cabos para-raios, torres, cadeias de isoladores, ferragens e aterramentos elétricos) que atravessam o país em todas as direções, com a finalidade de transportar energia entre as estações geradoras e os grandes centros urbanos consumidores, compondo assim o Sistema Elétrico de Potência do Brasil (SEP), [1]. Por motivos físicos e econômicos existe a necessidade de elevação da tensão nas linhas de transmissão, com níveis também elevados de correntes elétricas, o que consequentemente eleva os níveis de interferência eletromagnética em suas proximidades. A elevação desses níveis pode ser nociva a estruturas e seres vivos que estejam posicionados na faixa de passagem das linhas de transmissão, [2], [3] e [4]. Devido a tal exposição torna-se necessária a delimitação, em ambos os lados de uma linha de transmissão, de uma distância de segurança face a exposição a campos eletromagnéticos. Tais delimitações são denominadas faixas de passagem, [5] e [6].

Atualmente, as linhas de transmissão cobrem o Brasil, que tem dimensões continentais, fornecendo energia elétrica a 97,8% dos domicílios do país, [7]. Esse percentual elevado de atendimento no Brasil acarreta a necessidade de construção de linhas de transmissão menores, próximas aos grandes centros urbanos, fato este que leva a presença de estruturas existentes que ficam dentro da faixa de passagem da linha de transmissão. Isso ocorre pelo fato da carência de rotas adequadas e uma necessidade de redução de custos de implantação. Com o aumento da demanda dos grandes centros urbanos, verifica-se cada vez mais a implantação de subestações próximas às áreas urbanas, o que motiva e torna cada vez mais importante o estudo das interferências eletromagnéticas entre as linhas de transmissão e as estruturas afetadas, [8].

O Brasil, com suas dimensões continentais, possui a produção de diversos tipos de produtos muito afastada das grandes cidades e, consequentemente, dos grandes centros consumidores dos mesmos. Partindo desta premissa, torna-se necessário a construção de uma infraestrutura capaz de transportar esses produtos aos grandes centros consumidores.

Transportar os produtos não é a única preocupação do setor de implantação. Existe a necessidade cada vez maior de um transporte com custos menores e eficientes. Nesse papel se encaixam os dutos metálicos, que servem de meio de transporte para produtos aos grandes centros consumidores. Destacam-se como produtos importantes, óleos, gases, minérios e outros.

Paralelamente à construção de linhas de transmissão, a implantação dos dutos metálicos, sejam eles enterrados ou aéreos, cresce no país. Esta situação está atrelada à busca pela diminuição dos custos de ambos, redução do impacto ambiental e uma viabilidade maior na implantação, o que acarreta em pontos onde linhas de transmissão e dutos metálicos coexistem próximos. Por "próximo" deve-se entender como estando os dutos instalados na faixa de passagem da linha de transmissão, [6]. Tal situação requer que sejam feitos estudos que avaliem os níveis de interferência eletromagnética que as linhas de transmissão exercem sobre os dutos metálicos que estão instalados dentro de sua faixa de passagem. Essas interferências eletromagnéticas provocam o aparecimento de tensões/correntes induzidas nos dutos metálicos.

O estudo do surgimento e aumento do valor das grandezas envolvidas vem tomando um espaço importante para as empresas concessionárias de energia elétrica, bem como para as empresas responsáveis pelos dutos metálicos. Tal necessidade de estudo se justifica pelas seguintes razões:

- Seres humanos ou animais, que estejam em contato direto com o duto metálico afetado por tensões induzidas correm o risco de um choque elétrico;
- II. Equipamentos conectados aos dutos metálicos submetidos a tensões induzidas elevadas, em relação ao solo, podem ser danificados;
- III. Dutos metálicos quando submetidos a essas tensões induzidas por um período longo de tempo poderão ter sua estrutura metálica danificada por meio da corrosão da sua proteção catódica, [9] e [10].

Para uma avaliação criteriosa pode-se analisar a interferência eletromagnética de duas maneiras, com a linha de transmissão operando em regime permanente ou em regime transitório:

- Linha de transmissão operando em regime permanente senoidal (frequência de 50 Hz ou 60 Hz). Pode-se decompor a interferência eletromagnética em acoplamentos elétrico (capacitivo e condutivo) e magnético (indutivo). Pela baixa frequência de operação da linha os acoplamentos podem ser analisados e calculados de forma independente [11].
- Linha de transmissão operando em regime transitório (situações de curto circuito, operações de chaveamento, incidência de descargas atmosféricas, dentre outros).
 Nessa situação a faixa de frequências é elevada, variando de 100 Hz a 1 MHz, [12].

Neste caso, os efeitos da interferência eletromagnética devem ser avaliados na faixa de frequências superior do espectro o que impede que os acoplamentos elétrico e magnético sejam analisados e calculados de forma independente, [11].

Os estudos na literatura apontam para valores de tensões induzidas nos dutos muito elevados quando é feita a análise da linha de transmissão operando em regime transitório, fato este que é notado pelos altos valores de correntes e sobretensões que surgem na linha de transmissão quando um evento transitório a afeta. No entanto, esses eventos transitórios, além de possuírem um tempo de ocorrência relativamente reduzido, não solicitam a linha de transmissão de forma contínua. Por este motivo, nesta dissertação faz-se a opção pelas análises das interferências eletromagnéticas somente em regime permanente, pois as mesmas impõem tensões induzidas de forma contínua nos dutos em questão.

A análise do acoplamento elétrico de uma linha de transmissão operando em regime permanente está devidamente abordada em [11]. O acoplamento magnético tem sua fonte na variação temporal das correntes dos condutores das linhas de transmissão, às quais podem, também, sofrer variações durante o período em análise, em decorrência da demanda variável ao longo do dia. Nesta dissertação opta-se por analisar os níveis de corrente de uma linha de transmissão considerando o seu valor máximo de operação, garantindo assim que os valores calculados possam ser utilizados na análise de implantação e operação de uma linha de transmissão visto que podem ser comparados aos recomendados segundo as normas em vigência, [13].

Por fim, o acoplamento magnético contemplado nesta dissertação inclui o efeito do solo por meio do modelamento do mesmo via plano complexo segundo A. Deri, [14]. Adicionalmente, faz-se a opção pelo estudo dos dutos metálicos aéreos, e assim, por consequência os dutos metálicos enterrados são tratados como uma proposta de estudos futuros (continuidade desta dissertação), mencionados no Capítulo 5.

Face às razões mencionadas anteriormente, esta dissertação busca analisar e calcular os níveis de interferência magnética, acoplamento indutivo, entre as linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos.

Para a obtenção dos resultados pretendidos, utiliza-se um modelo eletromagnético que possibilita o cálculo dos níveis de campo magnético próximo às linhas de transmissão, bem como os valores de tensão e corrente induzidas nos dutos metálicos aéreos que estejam instalados próximos às mesmas. Também os fatores de segurança de seres vivos são avaliados, dado o possível contato dos mesmos com os dutos metálicos e métodos de mitigação desses efeitos são propostos, caso os valores dos níveis de interferência ultrapassem os limites impostos pelas legislações em vigência.

1.2 – Relevância do tema sob investigação

O Brasil possui um sistema de linhas de transmissão que interliga todo o território nacional, levando energia aos grandes, médios e pequenos centros consumidores.

Minas Gerais possui um sistema de transmissão que equivale a 16% da capacidade de transmissão do Brasil. Esse sistema, com extensas linhas de transmissão, leva a energia elétrica das usinas hidrelétricas, que são responsáveis pela maior parte da energia gerada, até os centros consumidores, [11].

Pela necessidade de redução de custos de implantação e diminuição dos impactos ambientais é cada vez maior a existência de dutos metálicos instalados próximos às linhas de transmissão, pelo fato de se aproveitar o caminho já existente pelas linhas de transmissão, caracterizando interferências eletromagnéticas de estudos relevantes.

O estudo do tema em investigação é de grande importância para as concessionárias de energia elétrica, responsáveis pelas linhas de transmissão, e pelas agências responsáveis pelo gerenciamento e transporte do petróleo, gás e minérios no Brasil. No Estado de Minas Gerais, tal estudo interessa, também, à Gasmig. Para o ano de 2013 a Gasmig prevê a implantação de gasodutos nas regiões do Vale do Aço, Sul de Minas e Triângulo Mineiro. O seu plano de expansão levará a companhia a triplicar, até 2013, sua malha de gasodutos, volume de distribuição de gás natural e faturamento. A Gasmig é uma empresa coligada à Cemig, uma vez que se constitui na grande responsável pela expansão do emprego do gás no estado, originando vários pontos de cruzamento e paralelismo com linhas ao longo dos trajetos dos gasodutos, [15]. Em relação ao Brasil, a Petrobrás, por meio de sua presidente Graça Foster, reitera que entre 2012 e 2016 serão investidos US\$ 6,9 bilhões da Petrobrás no segmento de dutos e terminais, a fim de garantir o suprimento de derivados no país. Dentre os principais projetos, pode-se destacar o Plano Diretor de Dutos da região de São Paulo, para a ampliação e modernização da malha de dutos do estado, interligando refinarias e terminais. Há também projetos na Carteira em Avaliação, para aumentar a capacidade de oleodutos, como o OSBRA, que liga a Refinaria de Paulínia (REPLAN) aos terminais em São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal; e o ORSUB, que liga a Refinaria Landulpho Alves (RLAM) aos terminais de Itabuna e Jequié, [16].

Minas Gerais possui também o mineroduto Mariana (MG) - Ponta do Ubu (ES) com cerca de 396 km de extensão, com vazão nominal de aproximadamente 15 milhões de toneladas de minério de ferro, [11] e [16]. Além disso, está sendo instalado, ao longo do estado (sistema Minas-Rio), o maior mineroduto do mundo com aproximadamente 525 km para atendimento à Anglous Ferrous, [11] e [17].

O exposto acima ilustra a relevância do tema sob investigação e justifica os esforços de pesquisa na temática de interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos metálicos.

1.3 – Objetivos geral e específicos

O objetivo geral deste trabalho é calcular os níveis de interferência magnética entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. O termo "interferência magnética" deve ser entendido como os níveis de campo magnético e tensões/correntes induzidas nos dutos pelas distribuições de correntes, variáveis no tempo, existentes nos cabos fase e cabos para-raios de uma linha de transmissão.

Para alcançar o objetivo geral de forma convincente e consolidada, alguns objetivos intermediários (específicos) devem ser obtidos sequencialmente, são eles:

- Modelagem eletromagnética do acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos para cálculo dos níveis de campo magnético e tensões/correntes induzidas nos dutos;
- ii. Inclusão do efeito do solo modelado pelo plano complexo de retorno, segundo
 A. Deri, [14];
- iii. Validação dos cálculos via estudos já realizados na área;
- iv. Análises de sensibilidade em relação ao campo magnético e tensões/corrente induzidas nos dutos metálicos aéreos.

1.4 – Metodologia

Para este trabalho de pesquisa é necessário que alguns passos sejam realizados, que em seu conjunto correspondem à metodologia adotada, a saber:

- Revisão Bibliográfica Estudo do Estado da Arte;
- Caracterização do comportamento eletromagnético das linhas de transmissão, operando em regime permanente, que correspondem às fontes de interferência em dutos metálicos;
- Modelagem eletromagnética do acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. O efeito do solo é

considerado no plano complexo de retorno segundo A. Deri [14], visto que o campo magnético penetra o solo mesmo em baixas frequências;

- Validação dos cálculos e programas desenvolvidos por meio de comparação com resultados já existentes na literatura;
- Realização de análises de sensibilidade em relação ao campo magnético e tensões/correntes induzidas nos dutos metálicos aéreos;
- Avaliação dos efeitos da exposição a longo prazo dos dutos a campos magnéticos gerados pelas linhas de transmissão;
- Avaliação dos níveis de tensão e corrente nos seres vivos em contato com os dutos e determinação de práticas de proteção (aterramento do duto);
- Avaliação de técnicas de mitigação.

1.5 – Organização do texto

O texto desta dissertação está organizado em cinco capítulos, o que inclui este primeiro capítulo introdutório.

No Capítulo 2, *Descrição do Sistema sob Estudo*, é feita uma análise do sistema em estudo. Neste capítulo são apresentadas e caracterizadas as linhas de transmissão aéreas e os dutos metálicos; suas características físicas e geométricas são abordadas consistentemente, pois são o foco de estudo desta dissertação.

No Capítulo 3, Acoplamento Magnético Entre Linhas de Transmissão e Dutos Metálicos, é feita a avaliação dos efeitos de exposição de seres humanos a campos eletromagnéticos. Em sequência, é apresentada a demonstração dos métodos utilizados para o cálculo dos níveis de campo magnético e suas tensões/correntes induzidas nos dutos metálicos aéreos. Por fim, os cálculos finais de campo magnético, tensões/correntes induzidas por linhas de transmissão operando em regime permanente são apresentados. Técnicas de mitigação são apresentadas neste capítulo.

No Capítulo 4, *Resultados e Análises*, são apresentados os resultados das simulações realizadas sobre os níveis de campos magnéticos além dos valores de tensões/corrente induzidas nos dutos. Os aspectos de segurança pessoal são analisados. Neste capítulo são realizadas as simulações para as diferentes configurações de linhas de transmissão apresentadas no Capítulo 2.

Por fim, no Capítulo 5 são descritas as conclusões finais desta dissertação, bem como propostas de continuidade do tema em investigação.

1.6 – Publicação decorrente desta dissertação

A seguinte publicação tem origem deste trabalho de dissertação:

H. R. Vieira, M. A. O. Schroeder e W. S. Sales, "Acoplamento magnético entre linhas de transmissão e dutos metálicos," XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE, Foz do Iguaçu, Maio 2014.

CAPÍTULO 2 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOB ESTUDO

2.1 – Introdução

Neste capítulo é feita a apresentação dos sistemas abordados nesta dissertação, as linhas de transmissão aéreas e os dutos metálicos.

Inicialmente, é feita uma abordagem geral sobre o setor de energia elétrica do Brasil. Posteriormente, as linhas de transmissão são caracterizadas quanto as suas características físicas e elétricas de projeto e por fim as configurações geométricas utilizadas nesta dissertação são apresentadas.

Em um segundo momento, o sistema dutoviário brasileiro é descrito e as características físicas dos dutos metálicos, objeto de estudo desta dissertação, são detalhadas.

Por fim, são apresentados os principais fatores de cruzamento e paralelismo entre uma linha de transmissão e um duto metálico.

2.2 – Linhas de transmissão

2.2.1 – Visão geral

Um sistema elétrico de potência é composto por quatro partes básicas que são a geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica.

Como objetivo, um sistema elétrico de potência (SEP), deve gerar, transmitir e fazer a distribuição da energia elétrica seguindo normas de confiabilidade, qualidade, disponibilidade, segurança, custos e reduzido impacto ambiental, [1]. Resumidamente, define-se os itens citados anteriormente por:

- Confiabilidade: Define a probabilidade do sistema e seus componentes em realizar suas funções por determinado período sem falhar;
- Qualidade: É determinada pela compatibilidade entre o sistema de geração e a carga consumidora, atendendo a critérios de conformidade senoidal;

- Disponibilidade: Representa a probabilidade do sistema operar normalmente quando o mesmo for solicitado para uso;
- Segurança: Representa a capacidade de o sistema continuar operando quando o mesmo sofre distúrbios de natureza negativa;
- Custos: Representa o melhor custo benefício na elaboração do projeto de um sistema elétrico de potência;
- Reduzido impacto ambiental: Determina que o projeto de um sistema elétrico de potência deve seguir normas rígidas sobre os impactos da implantação do sistema elétrico de potência no meio ambiente.

A transmissão da energia elétrica pelo território brasileiro é diferenciada por vários níveis de tensão que são determinados pela quantidade de potência a ser transmitida, o que remete a parâmetros físicos e econômicos de construção de linhas de transmissão para esse transporte da energia elétrica, [1].

A integração dos sistemas regionais e nacionais é indispensável para um sistema elétrico de potência, pois permite um intercâmbio de energia entre diversos sistemas de acordo com a necessidade de cada um, o que permite a construção de centrais mais eficientes, aumento da reserva global de energia e maior confiabilidade do sistema perante situações de distúrbios, [18].

Mundialmente, o setor elétrico foi reestruturado, o qual é dividido em quatro segmentos bem definidos; são eles: geração, transmissão, distribuição e comercialização.

A reestruturação do setor elétrico no Brasil aconteceu na desestatização das empresas do setor elétrico brasileiro e consequente abertura de capital do mercado de energia elétrica brasileiro, [19]. Este modelo reestruturado do Brasil é regulamentado e gerenciado por novas instituições e por instituições já existentes com funções modificadas. A Figura 2.1 mostra a hierarquia entre esses órgãos, os quais têm como função principal o gerenciamento do setor elétrico brasileiro, garantindo a confiabilidade e segurança da geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica, [20].



Figura 2.1: Estrutura organizacional e os agentes do setor elétrico brasileiro.

O Brasil possui um sistema de energia elétrica com uma capacidade total de geração de aproximadamente 124.334.241 kW de potência, [21]. A Tabela 2.1 fornece os dez maiores agentes no que se refere à potência instalada no Brasil.

N٥	Agentes do Setor	Potência Instalada (kW)
1	Companhia Hidroelétrica do São Francisco - CHESF	10.618.327
2	Furnas Centrais Elétricas S/A - FURNAS	9.456.900
3	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A - ELETRONORTE	9.256.933
4	Companhia Energética de São Paulo - CESP	7.455.300
5	Itaipu Binacional – ITAIPU (Brasil)	7.000.000
6	Tractebel Energia - S/A - TRACTEBEL	6.965.350
7	Cemig Geração e Transmissão S/A - CEMIG-GT	6.782.134
8	Petróleo Brasileiro S/A - PETROBRÁS	4.832.276
9	Copel Geração e Transmissão S/A - COPEL-GT	4.544.914
10	AES Tietê S/A - AES TIETÊ	2.645.050

Tabela 2.1: Maiores agentes de capacidade instalada no Brasil. Fonte: [22].

A transmissão de energia do Brasil é composta por linhas de transmissão e distribuição que possibilitam a interligação dos centros de geração e consumo que cobrem, segundo [7], 97,8% do território nacional. A transmissão dessa energia é feita em vários níveis de tensão de acordo com fatores já mencionados nesta dissertação, [18].

As linhas de transmissão no Brasil geralmente são extensas pelo fato das grandes usinas hidrelétricas, que respondem pela maior parte da geração, estarem situadas a grandes distâncias dos centros consumidores de energia.

O sistema de transmissão de energia do Brasil é composto por cerca de 950 linhas de transmissão, as quais somam aproximadamente 100000 km com tensão igual ou superior a 230 kV, [23]. Minas Gerais possui aproximadamente 5320 km de linhas de transmissão, o que corresponde a cerca de 5% do total nacional.

O estado de Minas Gerais possui uma capacidade de geração de energia elétrica de aproximadamente 20.009.842 kW de potência, o que representa 16,1% da capacidade instalada no Brasil. A Cemig, por intermédio de suas controladas e coligadas de transmissão de energia elétrica, opera uma rede de transmissão de 7506 km, fato que a leva ser o terceiro maior grupo de transmissão de energia do Brasil. A Cemig desenvolve atividades de distribuição de energia elétrica em 774 municípios e 5415 localidades do estado de Minas Gerais, atendendo cerca de 96% do território do estado, [11].

A Tabela 2.2 mostra a capacidade de potência instalada por estado e o percentual de cada um no Brasil.

UF	Capacidade Instalada (kW)	%
DF	16.178	0,01
RR	122.610,40	0,1
AC	189.691,30	0,15
AP	297.949	0,24
ΡI	316.944	0,25
PB	641.470	0,52
RN	902.251	0,73
ES	1.872.815	1,51
RO	1.930.748,48	1,55
CE	2.186.828	1,76
AM	2.262.845	1,82
MT	2.784.328,82	2,24
MA	2.802.595,27	2,25
ТО	2.908.080	2,34
ΡE	3.190.833,70	2,57
SE	3.281.999,40	2,64
SC	7.211.577,80	5,8
AL	7.748.086,50	6,23
MS	8.518.892	6,85
RJ	8.822.487,40	7,1
PA	9.054.729,60	7,28
RS	9.121.002,70	7,34
BA	9.883.307,30	7,95
GO	10.572.043,20	8,5
PR	18.163.208,46	14,61
MG	20.009.842,54	16,1
SP	24.983.678,52	20,1

Tabela 2.2: Capacidade de geração de energia por estado. Fonte: [21].

Perante a importância da Cemig para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em Minas Gerais e no Brasil, neste trabalho utilizam-se configurações de linhas de transmissão reais da concessionária para o desenvolvimento dos estudos. As características físicas de linhas de transmissão são abordadas na subseção 2.2.2 e as configurações das linhas de transmissão utilizadas neste trabalho são descritas na subseção 2.2.3.

2.2.2 – Características físicas das linhas de transmissão aéreas

O desempenho de uma linha de transmissão aérea tem uma dependência muito grande em função de suas características físicas. Tais características determinam o seu

comportamento em regime normal de operação definindo, assim, os seus parâmetros elétricos.

Fisicamente uma linha de transmissão aérea pode ser dividida em duas partes, uma ativa e outra passiva.

Entende-se como parte ativa de uma linha de transmissão aérea os cabos condutores, que são os responsáveis pelo transporte da energia elétrica. Os cabos condutores ideais para linhas aéreas de transmissão devem apresentar as seguintes características: alta condutividade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes, [18] e [24]. Nenhum material é capaz de atender a todas essas características simultaneamente. O material mais utilizado em linhas de transmissão é o alumínio e suas ligas, [18].

A parte passiva de uma linha de transmissão aérea é composta pelos isoladores, ferragens e estruturas, as quais garantem o afastamento dos condutores do solo e entre si e devem resistir tanto às solicitações mecânicas quanto às elétricas. Cabos para-raios e aterramentos também fazem parte das características físicas de uma linha de transmissão aérea, [18] e [24].

As estruturas metálicas de uma linha de transmissão aérea constituem os meios de sustentação dos cabos condutores e cabos para-raios, denominadas torres de transmissão. As dimensões e formas dependem de diversos fatores tais como o número de circuitos (um ou dois circuitos), disposição dos condutores (triangular, vertical e horizontal), função da cadeia de isolador (suspensão, ancoragem e ângulo), tensão da linha, formato (tronco piramidal de circuito simples e duplo, delta e estaiada), resistência mecânica das estruturas, dentre outros, [11] e [18].

A configuração geométrica de uma linha de transmissão aérea depende de diversos fatores, sendo os de maior relevância os seguintes: tensão de operação, número de circuitos, cadeias de isoladores, cabos para-raios, diâmetros dos condutores ou feixes de condutores, ferragens, forma de resistir, dentre outros. Outro fator muito importante na configuração da linha de transmissão aérea escolhida é a busca por aquela que apresenta o menor impacto ao meio ambiente. Adicionalmente, a linha deve se adequar aos aspectos de segurança relativos aos níveis de campos eletromagnéticos gerados, rádio interferência e nível de ruído, [24] e [25].

Ao projetar uma linha de transmissão aérea, uma das primeiras etapas é o levantamento do traçado. Nessa etapa o perfil do terreno e solo, cadastro de propriedades, reservas ambientais, obstáculos no percurso, dentre outros, são de fundamental importância

a fim de garantir que o sistema seja viável (financeiramente e fisicamente), confiável e seguro, tanto para os seres vivos quanto para as estruturas próximas, [26].

Nessa etapa do projeto de uma linha de transmissão aérea, também é de grande relevância a definição da faixa de passagem da mesma, que é a faixa de terra, ao longo de sua extensão, onde fica terminantemente proibida a construção de quaisquer estruturas. A regulamentação de uma faixa de passagem faz-se necessária a fim de garantir um bom desempenho da linha de transmissão aérea e principalmente a segurança dos seres vivos e estruturas, [6].

De acordo com [6], nos casos mais comuns, linhas de transmissão de 69, 88 e 138 kV possuem uma faixa de passagem de 30 metros (15 metros para cada lado). Para linhas de transmissão com tensões de 34,5 kV, a faixa de passagem mínima é de 20 metros (10 metros para cada lado). Para linhas de transmissão com tensões acima de 138 kV a faixa de servidão depende do tipo da torre a ser instalada. Partindo destas informações, ao projetar uma linha de transmissão, os seguintes aspectos devem ser analisados, [6]: i) minimizar a quantidade de torres; ii) determinar espaçamento uniforme entre as torres; iii) evitar torres em terrenos acidentados, úmido ou com erosão; iv) garantir uma distância mínima dos cabos condutores em relação ao solo; v) evitar o paralelismo entre a linha de transmissão e linhas férreas, cercas de arame e gasodutos.

Neste trabalho são utilizadas três linhas de transmissão, que representam configurações geométricas reais de algumas linhas de transmissão do território de Minas Gerais utilizadas pela Cemig e Furnas, cujos detalhes são ilustrados na subseção a seguir. No Capítulo 4, com a intenção de explicitar a influência da configuração geométrica da linha de transmissão em determinadas análises de sensibilidade, são apresentadas mais três configurações de linhas de transmissão reais as quais são detalhadas no capítulo informado.

2.2.3 – Descrição das linhas de transmissão sob estudo

Face ao exposto anteriormente, nesta dissertação são utilizadas configurações reais de algumas linhas de transmissão da Cemig, cujas descrições detalhadas são apresentadas por meio da figura da silhueta da torre mais comum em seu trajeto e de uma tabela contendo informações de configurações elétrica e geométrica.

A. Sistema 1 - Linha de transmissão Janaúba - Salinas (138 kV)

A.1 - Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 1, Figura 2.2.



Figura 2.2: Silhueta da torre do Sistema 1 - Linha de Transmissão de 138 kV. Fonte: [11].

A.2 - Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Tabela 2.3.

Características geométricas e elétricas do Sistema 1	
Tensão de operação	138 kV
Potência máxima transmitida	35 MVA
Corrente de operação	146,43 A
Comprimento da linha	140 km
N° de condutores/fase	1
Código dos condutores fase	Linnet
Tipo dos condutores fase	CAA
N° de cabos para-raios (PR)	1
Tipo de cabos para-raios	Aço galvanizado
Código do condutor para-raios	EHS
Distância entre subcondutores	0
Altura média fase A	12,15 m
Altura média fase B	14,01 m
Altura média fase C	15,87 m
Altura média cabos para-raios	22,90 m
Diâmetro cabos Fase	18,31 mm
Diâmetro cabos para-raios	7,94 mm
Vão Médio	400 m
М	3,00 m

Tabela 2.3: Características geométricas e elétricas do Sistema 1 - Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 138 kV. Fonte: Adaptado de [27].
B. Sistema 2 – Linha de transmissão Pimenta - Barbacena (345 kV)



B.1- Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 2, Figura 2.3.

Figura 2.3: Silhueta da torre do Sistema 2 - Linha de Transmissão de 345 kV. Fonte: [11].

B.2- Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Tabela 2.4.

Fabela 2.4: Caracter	ísticas geométricas e elétricas do Sistema 2 - Linha de Transmissão tr	rifásica
	circuito simples de 345 kV. Fonte: Adaptado de [28].	

Configurações Geométricas e Elétricas - Sistema 2			
Tensão de operação	345 kV		
Potência máxima transmitida	250 MVA		
Corrente de operação média	418,3 A		
Comprimento da Linha	231 km		
N° de condutores/fase	2		
Tipo de condutores fase	CAA		
Código dos condutores fase	Rail		
N° de cabos para-raios (PR)	2		
Tipo dos cabos para-raios	Aço Galvanizado		
Código dos condutores para-raios	3/8 EHS		
Distância entre subcondutores	0,457 m		
Altura média fase A	14,00 m		
Altura média fase B	14,00 m		
Altura média fase C	14,00 m		
Altura média cabos para-raios	18,95 m		
Diâmetro cabos fase	29,59 mm		
Diâmetro cabos para-raios (PR)	9,52 mm		
Vão Médio	413 m		
Μ	9,50 m		
Ν	13,70 m		

C. <u>Sistema 3 – Linha de transmissão São Gonçalo – Ouro Preto 2</u> (500 kV)

C.1- Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 3, Figura 2.4.



Figura 2.4: Silhueta da torre do Sistema 3 - Linha de Transmissão de 500 kV. Fonte: [11].

C.2- Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Características geométricas e elétricas do Sistema 3 - Linha de Transmissão	Trifásica
Circuito Simples de 500 kV. Fonte: Adaptado de [29].	

Características Geométricas e Elétricas - Sistema 3			
Tensão de operação	500 kV		
Capacidade de transmissão	725 MVA		
Corrente de operação média	837,15 A		
Comprimento da linha	120,31 km		
N° de condutores/fase	3		
Tipo dos condutores fase	CAA		
Código dos condutores fase	Ruddy		
N° de cabos para-raios (PR)	2		
Tipo de cabos para-raios	Aço Galvanizado		
Código dos condutores para-raios	7/16 EHS		
Distância entre subcondutores	0,457 m		
Altura média fase A	16,53 m		
Altura média fase B	16,53 m		
Altura média fase C	16,53 m		
Altura média cabos para-raios	30,71 m		
Diâmetro cabos Fase	28,74 mm		
Diâmetro cabos para-raios	11,11 mm		
Vão médio	468,13 m		
Μ	10,25 m		
N	14,50 m		

As seguintes observações, relacionadas às configurações geométricas e características elétricas dos Sistemas 1, 2 e 3, são importantes:

 A altura média dos condutores de uma linha de transmissão em relação ao solo é calculada pela Equação (2.1).

$$H_{\rm m} = h_{\rm máx} - \frac{2}{3}F \tag{2.1},$$

onde h_{máx} é a altura máxima do condutor na torre, e F é a flecha, [11], [18] e [30]. Verifica-se que a altura média dos condutores da linha de transmissão em relação ao solo considera o cálculo da flecha, a qual se refere à distância ortogonal do ponto mínimo da catenária ao vão nivelado, [11], [18] e [30]. A Figura 2.5 mostra a representação dos parâmetros citados anteriormente.



Figura 2.5: Altura média dos condutores. Fonte: Adaptado de [11].

Para calcular o valor da flecha (F) utiliza-se a Equação (2.2), [30]:

$$F = \frac{pA_{e}^{2}}{8T_{0}}[m]$$
(2.2),

onde p é o peso próprio do cabo em kgf/m, A_e é o vão em questão em metros e T_0 é a tração sobre a qual o cabo está submetido, em kgf.

Para linhas de transmissão que possuem múltiplos subcondutores, dispostos em feixe, o cálculo do raio equivalente desse condutor é realizado com base no método do Raio Médio Geométrico (RMG), onde fica determinado que o condutor equivalente ao feixe está a uma altura igual ao centro da circunferência do feixe. Para cabos com dois, três e quatro subcondutores o RMG é dado pelas Equações (2.3), (2.4) e (2.5), respectivamente, [31].

$$\mathsf{RMG} = \sqrt{\mathsf{D}_{\mathsf{s}}\mathsf{d}} \tag{2.3},$$

$$\mathsf{RMG} = \sqrt[3]{\mathsf{D}_{\mathsf{s}}\mathsf{d}^2} \tag{2.4},$$

$$RMG = 1,09\sqrt[4]{D_s d^3}$$
(2.5),

onde RMG é o raio do condutor equivalente, D_s é o raio dos condutores individuais corrigido pelo efeito pelicular (o qual é fornecido por meio de tabelas de acordo com o tipo do cabo, referência [31]) e d é a distância entre os subcondutores. A Figura 2.6 mostra a disposição de cabos múltiplos para dois, três e quatro subcondutores.



Figura 2.6: Cabo com condutor múltiplo.

 O cálculo dos valores de corrente nas fases do sistema sob estudo é feito considerando o mesmo como simétrico e equilibrado. As fases estão dispostas na sequência positiva de fase ABC, conforme Figura 2.7.



Figura 2.7: Fases ABC em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado.

Assim, inicialmente calcula-se a corrente I, [1], [18], [24] e [31], segundo a Equação (2.6).

$$I = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V}$$
(2.6),

onde $S_{3\phi}$ é potência trifásica (potência aparente) e V é a tensão fase-fase da linha de transmissão.

Por fim, é feito o defasamento das correntes nas fases A, B e C, [1] e [31], como representado na Equação (2.7).

$$I_{A} = I \angle 0^{\circ}$$

$$I_{B} = I \angle -120^{\circ}$$

$$I_{C} = I \angle 120^{\circ}$$
(2.7).

Caso a sequência de fase seja CBA, [1] e [31], o resultado final do defasamento das fases é descrito pela Equação (2.8).

$$I_{A} = I \angle 0^{\circ}$$

$$I_{B} = I \angle 120^{\circ}$$

$$I_{C} = I \angle -120^{\circ}$$
(2.8).

A Figura 2.8 mostra a sequência de fase CBA.



Figura 2.8: Fases CBA em um sistema trifásico, simétrico e equilibrado.

2.3 – Dutos

2.3.1 – Visão geral

A logística de uma empresa no que diz respeito a custos, tem no quesito transporte um fator de grande impacto para os mesmos. Segundo [32], aproximadamente 60% das despesas com logísticas são responsáveis pelo transporte de produtos.

Paralelamente aos custos envolvidos no transporte, existe um aumento da busca por fontes energéticas econômicas e com menor impacto ao meio ambiente. A utilização do gás natural cresce cada vez mais e, assim, surge a necessidade de realizar o seu transporte de maneira econômica e segura. Nesse contexto, a utilização de dutos se sobressai sobre os demais métodos de transporte, [33].

Empresas na área de petróleo, gás e saneamento optam pelo transporte por meio de dutos por diversas vantagens, tais como: confiabilidade, baixa influência de fatores meteorológicos, menor impacto ambiental, dentre outros, [33].

Segundo [34] algumas características técnicas, operacionais e econômicas dos dutos são explicitadas por:

- Facilidade de implantação;
- Alta confiabilidade, pelo fato do transporte não ser influenciado pelo fator do tempo e clima;
- Baixo consumo de energia;
- Alta especialização, uma vez que por meio da aplicação de técnicas de automação de alguns processos exige-se apenas o emprego de uma quantidade baixa de mão de obra especializada.

Dutos terrestres podem ser divididos em três categorias, no que diz respeito ao seu modo de implantação; são elas, [11] e [33]:

- Dutos subterrâneos: possuem algumas vantagens tais como uma maior proteção contra ações do tempo, veículos, vazamento, vandalismo, dentre outras devido a grande quantidade de terra que os envolve;
- Dutos aparentes: geralmente instalados na chegada das estações de carregamento e descarregamento de produtos;
- Dutos aéreos: utilizado em grandes vales, rios, pântanos ou terrenos muito acidentados, são o objeto de estudo desta dissertação;
- Dutos submarinos: utilizado regularmente no transporte da produção de petróleo de plataformas marítimas para as refinarias.

Outra classificação também pode ser referenciada aos dutos. Trata-se da classificação relativa ao produto transportado e suas finalidades; são elas:

- Gasodutos: no Brasil a Transpetro é a principal empresa responsável pelo abastecimento de gás natural no país com aproximadamente 75% de todo volume transportado, [11] e [34];
- Oleodutos: responsáveis pela interligação entre duas plataformas de petróleo, entre uma plataforma de petróleo e uma refinaria e interligam as refinarias com os centros consumidores de derivados;
- Minerodutos: segundo [35] o mineroduto reduz o tráfego de caminhões pesados próximos às comunidades e nas rodovias estaduais e federais, fornecendo mais segurança e preservando as rodovias;
- Polidutos: transportam outros tipos de produtos.

A evolução resumida do sistema dutoviário do Brasil é apresentada na Tabela 2.6, [11].

Ano	Descrição
1942	Construção do primeiro oleoduto no Brasil (Bahia).
1946	Conselho Nacional do Petróleo (CNP) analisa o anteprojeto de oleodutos entre Santos e São Paulo.
1948	Construção da rede de oleodutos Santos e São Paulo.
1953	Criação da Petrobrás e o transporte por dutos é intensificado.
1954	Conselho Nacional do Petróleo (CNP) realiza estudos técnicos para a organização da Rede Nacional de Oleodutos.
1966	Entra em operação o primeiro oleoduto Rio - Belo Horizonte (Orbel), o mais extenso do Brasil com 365 km de comprimento.
1970	Entram em atividade o oleoduto Angra dos Reis - Reduc, e outros, no Rio de Janeiro e em São Paulo.
1977	Entra em operação o maior terminal marítimo da Petrobrás.
1980	Construção de um grande número de gasodutos, principalmente para interligação da Bacia de Campos com os centros consumidores.
1986	Entra em operação o gasoduto "Nordestão" com 423 km de extensão, interligando três estados.
1997	Tem início a construção do Gasoduto Bolívia - Brasil.
1999	Entra em operação o gasoduto Bolívia - Brasil.
2003	O Brasil conta com, aproximadamente, 5451 km de dutos.
2010	O Brasil conta com uma malha dutoviária de aproximadamente 10000 km instalados e em operação.
2013	Previsão de produção aproximada de 3,32 milhões de barris de óleo por dia.

Tabela 2.6: Evolução do sistema dutoviário brasileiro.	Fonte:	Adaptado	de [11].
--	--------	----------	----------

No Brasil a maior empresa dedicada a exploração e refino do petróleo e seus derivados é a Petrobrás. Para o transporte e armazenamento do petróleo e seus derivados uma coligada da Petrobrás, a Transpetro realiza esses serviços. Os números da Transpetro são mostrados na Tabela 2.7. A Figura 2.9 mostra os principais gasodutos no Brasil.

Tabela 2.7: Números da Transpetro. Fonte: [34].

Carga movimentada			
Oleodutos: 396 milhões de m ³ /ano de petróleo, derivados e álcool.			
Gasodutos: 60 milhões de m³/dia de gás natural/dia.			
Capacidade de armazenamento			
Terminais: 10 milhões m ³ .			
Capacidade de processamento de gás			
19700 milhões m³/dia.			
Dutos e Terminais			
7517 km de oleodutos.			
7128 km de gasodutos.			



Figura 2.9: Mapa dos principais gasodutos do Brasil. Fonte: [11].

2.3.2 – Características físicas dos dutos

O sistema dutoviário em sua maioria é constituído por dutos de aço, pois se adequam a oleodutos, gasodutos, minerodutos e polidutos por diversos fatores, os quais destacam-se sua alta resistência aos fatores climáticos, suportam altas pressões e podem ser construídos por muitos quilômetros. As peças de aço são unidas através de soldas, [36].

O projeto de um sistema dutoviário tem sua etapa inicial na definição do traçado por onde os dutos irão passar. Essa etapa é de fundamental importância, pois nela é identificada a necessidade de desapropriação de áreas particulares, reservas indígenas e de preservação permanente, áreas de patrimônio histórico, cultural e arqueológico, dentre outros, [37]. As características físicas do duto a ser instalado é o próximo passo da implantação do sistema. Essas características são definidas de acordo com o tipo de produto que será transportado, extensão dos dutos e da vazão que se pretende do produto, [36] e [38].

Para escolher corretamente a composição físico-química de um duto são levados em consideração alguns fatores, os quais são mostrados na Tabela 2.8.

	Enterrado		
Tipo de Duto	Aéreo		
	Submarino		
Produto transportado	Óleo		
	Gás		
	Minério		
	Água		
	Outros		
Extenção	Curta		
Extensão	Longa		

Tabela 2.8: Fatores para escolha físico-química de um duto. Fonte [36].

Para os estudos desta dissertação, as características físicas dos dutos necessárias aos estudos do acoplamento magnético são a extensão do duto e seu diâmetro.

Para definição do diâmetro de um duto os fatores preponderantes são o tipo do produto transportado e a vazão desejada. O Brasil possui uma malha dutoviária com dutos de diâmetro que variam de 4 a 32 polegadas, [11].

A extensão de um sistema de dutos pode ser definida como curta, ou seja, com poucos quilômetros, (Gasoduto GNL - PCÉM - Ceará - 19 km), e longas, com milhares de quilômetros (Gasoduto Brasil - Bolívia - 2000 km), [11].

A análise de sensibilidade desta dissertação utiliza duas configurações diferentes, cujos dados de algumas configurações reais são fornecidos pela Transpetro, [34]. Opta-se por realizar a análise de dutos com diâmetros de 30 cm e 50 cm, por compreender os valores reais e, também, para uma maior variação dos resultados. A Tabela 2.9 ilustra as características principais de três sistemas dutoviários reais de Minas Gerais.

Empresa	Origem	Destino (MG)	Extensão (km)	Diâmetro (m)
GASPAJ	Paulínia	Jacutinga	80	0,35
GASBEL I	Duque de Caxias	Betim	357	0,40
GASBEL II	Volta Redonda	São Brás do Suaçuí	260	0,45

2.4 – Linhas de transmissão e dutos

O desenvolvimento econômico do Brasil faz com que as empresas, de diversos setores, que utilizam o transporte de produtos pelo sistema dutoviário, aumentem gradativamente as malhas, visando um atendimento melhor e mais eficaz aos seus centros consumidores. Paralelamente a este aumento, a demanda por energia elétrica também cresce e, assim, as linhas de transmissão, responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica pelo país, também crescem.

A busca pela redução de custos de implantação, tanto de dutos quanto de linhas de transmissão, faz com que haja um compartilhamento cada vez maior das áreas de implantação dos dutos e das linhas de transmissão. Este compartilhamento faz com que as empresas responsáveis pela implantação se preocupem com as interferências eletromagnéticas das linhas de transmissão nos dutos instalados próximos as mesmas (dentro dos limites de faixa de passagem da linha de transmissão).

A preocupação das empresas abrange aspectos de segurança dos seres vivos que possivelmente entram em contato com os dutos, bem como vazamentos dos produtos transportados pelos dutos devido à exposição dos mesmos à corrente alternada, o que pode causar corrosão, [9].

Por todo o território nacional encontram-se locais onde existe o paralelismo e cruzamento de uma linha de transmissão e um duto metálico.

A maior parte dos acidentes com dutos metálicos está relacionada com a interferência de agentes externos, defeitos de fabricação, falhas na implantação e corrosão, [9] e [11]. A corrosão atmosférica, pela exposição do duto às intempéries do tempo, é um dos principais fatores que levam a falha no sistema de dutos, ocasionando assim desastres naturais.

Existem medidas que minimizam a corrosão atmosférica, dentre as quais se destaca o isolamento do duto metálico ao ambiente agressivo. Deve ficar claro que nenhuma prática de minimização desses efeitos é perfeita, mas esse potencial pode ser reduzido por meio de programas de manutenção e inspeções de dutos os quais realizam as correções necessárias para evitar acidentes, [9] e [11].

Esta dissertação não analisa as falhas de um sistema de dutos e, conforme ressaltado no Capítulo 1, o objetivo é estudar a interação magnética (indutiva) entre uma linha de transmissão operando em regime permanente, 60 Hz, e dutos metálicos aéreos, os quais são detalhados nas seções anteriores. É válido adiantar que são considerados e analisados os dutos que apresentam um percurso paralelo à linha de transmissão.

2.5 – Conclusão

Este capítulo mostra a visão geral dos sistemas sob estudo, que são as linhas de transmissão e os dutos metálicos aéreos.

Inicialmente, na subseção 2.2.1 é feito um panorama do setor energético no Brasil onde são mostrados os dados atuais da quantidade de energia gerada no Brasil pelas principais concessionárias de energia e a capacidade produtiva de cada estado. Na subseção 2.2.2 é feita a apresentação das principais características que devem ser levadas em consideração no projeto de uma linha de transmissão, e finalmente na subseção 2.2.3 é feito o detalhamento dos três sistemas de linhas de transmissão que são os objetos sob estudo desta dissertação. Nesta subseção também são apresentadas as características físicas e elétricas dos sistemas sob estudo.

Os dutos são apresentados na subseção 2.3.1, onde é mostrada uma visão geral de um sistema dutoviário e sua importância para empresa no que diz respeito a custos e atendimento aos seus consumidores. Vários tipos de produtos podem ser transportados pelos dutos os quais também são descritos nessa subseção. Na subseção 2.3.2 as principais características físicas dos dutos são apresentadas, dentre elas vale destacar a extensão e diâmetro, que são objetos de estudo desta dissertação.

Por fim na seção 2.4 procura-se destacar a importância do estudo da interação eletromagnética em uma linha de transmissão e dutos metálicos, a qual é baseada em aspectos de segurança a seres vivos e relacionada aos impactos ambientais de uma falha estrutural nos dutos.

Com o conteúdo apresentado neste capítulo, o próximo passo refere-se ao detalhamento da modelagem eletromagnética a ser adotada para o cálculo de tensões induzidas nos dutos metálicos aéreos pelas distribuições de correntes elétricas variáveis no tempo, presentes nos condutores fase e cabos para-raios de linhas de transmissão operando em regime permanente. A descrição da modelagem em causa é tópico do próximo capítulo.

CAPÍTULO 3 – ACOPLAMENTO MAGNÉTICO ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO E DUTOS METÁLICOS

3.1 – Introdução

A presente dissertação busca avaliar a interferência magnética entre uma linha de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. Para isso é importante analisar, inicialmente, os efeitos da exposição dos seres humanos a campos eletromagnéticos e suas consequências. Desta forma, na seção 3.2 é feita uma análise desses efeitos e uma exposição das normas regulamentadoras inerentes ao assunto. Em seguida, na seção 3.3 apresenta-se uma visão generalizada da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos, a motivação para tal análise e, também, uma breve evolução histórica dos trabalhos apresentados sobre essa interferência.

Como já amplamente enfatizado nos capítulos anteriores, as correntes nas linhas de transmissão operando em regime permanente na frequência de 60 Hz geram em suas proximidades campos magnéticos e, consequentemente, tensões e correntes induzidas em estruturas instaladas nessas mediações. Nesta dissertação são apresentados os cálculos de campo magnético a um metro do solo (em consonância com a exigência das normas), bem como tensões e correntes induzidas nos dutos metálicos. Para tal, a modelagem do cálculo é feita de modo sequencial onde são abordados separadamente, nas seções descritas a seguir, cada etapa dos cálculos, com objetivo final de obtenção de equações fisicamente consistentes.

Diante do exposto acima, a seção 3.4 apresenta toda evolução do modo como são feitos os cálculos, premissas, limites de validade para culminar nas equações finais de cálculo bem como mostrar algumas modelagens já existentes na literatura. A modelagem eletromagnética é, inicialmente, vinculada às suas premissas que a validam no escopo desta dissertação, o que pode ser visto na subseção 3.4.2 (após uma breve introdução na subseção 3.4.1).

Posteriormente, para a modelagem eletromagnética são calculados os valores dos campos vetoriais intensidade de campo magnético (\vec{H}) e densidade de fluxo magnético (\vec{B}), os quais são detalhados na subseção 3.4.3. Esta subseção é organizada da seguinte forma sequencial: i) Lei de Ampère para fenômenos quase estáticos; ii) Correntes nos cabos fases; iii) Método das imagens; iv) Modelagem do solo mediante o método das imagens complexas de A. Deri [14]; v) Inclusão das correntes induzidas nos cabos para-raios pelas correntes

dos cabos fase; vi) Equações finais para cálculo de \vec{H} e \vec{B} . Os cálculos finais de \vec{H} e \vec{B} são mostrados de três maneiras, a saber: "Método Aproximado"; Método no Domínio do Tempo; e Método das Elipses.

A continuidade dos cálculos é feita agora na subseção 3.4.4 onde os valores de tensão e corrente induzidas nos dutos são calculados. A sequência de apresentação envolve o seguinte: i) Lei da indução magnética de Faraday e tensões induzidas nos dutos; ii) Impedâncias dos dutos; iii) Correntes induzidas nos dutos e em corpos em contato com os mesmos.

Por fim, na seção 3.5 são apresentadas algumas técnicas de mitigação das tensões e correntes induzidas pelos campos magnéticos em questão e uma conclusão final sobre os aspectos eletromagnéticos envolvidos é realizada na seção 3.6.

3.2 – Avaliação dos efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos

A partir do século XX a utilização da energia elétrica se intensifica o que possibilita uma evolução econômica e desenvolvimento de tecnologias no mundo. Atualmente, a energia elétrica transforma a vida da população mundial, sendo um elemento essencial para a vida das populações em todo o mundo.

Esse avanço na utilização da energia elétrica globalizado reflete no modo como as pessoas a utilizam. É perceptível uma presença de aparelhos elétricos no cotidiano das pessoas cada vez maior, por oferecerem facilidades como segurança, praticidade e conforto para as atividades de cada um.

Visando atender esse maior consumo de energia elétrica e prosseguir com o desenvolvimento econômico, torna-se necessário investir na ampliação do setor elétrico existente no país. Investimentos em novas usinas e ampliação da rede de transmissão de energia tornam-se indispensáveis.

Uma solução tecnicamente viável para atender a essa nova demanda de consumo é a construção de linhas de transmissão que operem em tensões mais elevadas, o que reduz as perdas ôhmicas e possibilita aumentar o fluxo de potência ativa nas linhas.

Por sua vez, visando atender a esse consumo cada vez maior de energia elétrica, as ampliações dos sistemas de transmissão e distribuição, bem como a presença de novas subestações, se tornam presentes nas grandes cidades. Esses fatores motivam a comunidade científica a analisar os efeitos dos campos elétrico e magnético que essas novas instalações causam na saúde dos seres vivos expostos aos mesmos.

Diversos estudos vêm sendo elaborados nas últimas três décadas no intuito de analisar a relação entre esses campos elétrico e magnético e possíveis efeitos que eles causam na saúde das pessoas expostas aos mesmos, [39], [40] e [41].

Nesta seção busca-se mostrar as normas, análises e efeitos do campo magnético incidente sobre os seres vivos.

A avaliação dos níveis de campo magnético que incidem sobre os seres vivos, no caso especial das pessoas, é bem caracterizada por meio da utilização de instrumentos convencionais de medição. Esta medição é realizada mediante a utilização do instrumento "dosímetro" que, fixado junto ao corpo da pessoa, mensura o nível do campo magnético a que a mesma está exposta diariamente, devido a várias fontes de campos magnéticos.

Neste momento, torna-se oportuno informar que os valores do campo magnético são fornecidos em miliGauss (mG), vide Figura 3.1, e a conversão para microTesla (μ T) é feita sabendo-se que 1 μ T equivale a 10 mG.

A Figura 3.1 mostra os valores do campo magnético gerado por utensílios domésticos, linhas de transmissão de 500 kV e linhas de distribuição, variando de acordo com a distância dos mesmos.



Figura 3.1: Comparativo de valores de campo magnético. Fonte: Adaptado de [42].

Os estudos dos efeitos dos campos elétrico e magnético em seres vivos ao longo do tempo trouxeram várias conclusões e perspectivas importantes. Os estudos realizados por [43], [44] e [45] contribuem para as seguintes conclusões:

- Em seres vivos que são expostos a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial de 60 Hz há o surgimento de correntes induzidas internas nos mesmos. A característica dessa corrente induzida é a sua não uniformidade quando percorre o corpo do ser vivo em questão. Distribuições de corrente induzida dos campos elétrico e magnético são diferentes.
- Residências, ambientes a 60 Hz, e em locais de trabalho os níveis de campo magnético são da ordem de 0,3 a 10000 mG. Elevados níveis de campo magnético se localizam abaixo de linhas de transmissão e em determinados locais de trabalho. Abaixo da linha de transmissão entende-se como verticalmente sob os cabos fase da linha de transmissão e como locais de trabalho podem-se citar, por exemplo, subestações de energia elétrica e cabines de alta tensão.
- Seres humanos quando expostos a um campo magnético de 0,1 mG são submetidos a uma densidade de corrente induzida de valor máximo 1 µA/m². O corpo humano por natureza, devido a atividade elétrica de células nervosas, apresenta uma densidade de corrente endógena de valor aproximado de 1 mA/m². Percebe-se que os valores de densidade de corrente induzidas por agentes externos são 1000 vezes menores do que a densidade de corrente que ocorre naturalmente no corpo humano.
- Não são encontrados, na literatura existente, dados teóricos ou experimentais sobre valores de densidade de corrente induzida em células e tecidos do corpo humano os quais levam em consideração as propriedades elétricas do meio, tais como a condutividade e permissividade.
- Cientificamente não foram constatadas evidências relevantes no que diz respeito ao surgimento do câncer em animais quando expostos a campos elétricos e magnéticos na frequência de 60 Hz.

Os estudos sobre os efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos têm se expandido e para regulamentar os níveis máximos de exposição, normas nacionais e internacionais regulamentam os valores de campo magnético, densidade de corrente e corrente induzida nos seres humanos e seus respectivos valores limites. Os valores de referência para campos magnéticos, aos quais um ser humano pode eventualmente se submeter, são estabelecidos pela Comissão Internacional para Proteção contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP) os quais são reconhecidos pela Organização Mundial de Saúde (OMS), [45] e [46].

Os efeitos biológicos em seres humanos são os fatores preponderantes no estabelecimento dos valores de referência, citados anteriormente, para os campos magnéticos. Esses efeitos são caracterizados pela exposição imediata aos campos

magnéticos, dentre os quais são de relevância a estimulação de células nervosas do cérebro, nervos periféricos e músculos, incluindo o coração, [46].

O corpo humano quando submetido a campos magnéticos está sujeito a densidades de correntes induzidas e, por não ser eletricamente homogêneo, é modelado por meio de métodos computacionais que têm grande resolução anatômica, [46].

Os níveis de exposição humana aos efeitos dos campos magnéticos são feitos com base em relações entre as grandezas físicas correspondentes e os efeitos biológicos que as mesmas causam. De acordo com [46], a grandeza física utilizada nesses casos é a densidade de corrente elétrica, a qual possui um valor de referência de 100 mA/m² como limite para que excitações indesejáveis no sistema nervoso central comecem a aparecer.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda que os valores de referência sejam analisados em função de sua amostra instantânea, recomendação que se justifica pela escassez de dados que relacionam as correntes transitórias com efeitos na saúde.

Segundo [45], [46], [47] e [48] para a frequência de 60 Hz utiliza-se a grandeza densidade de corrente para determinar os limites de exposição humana visto que, na faixa de frequência de 4 Hz a 1 kHz, quando seres humanos são expostos a um valor de densidade de corrente superior a 100 mA/m² o sistema nervoso central é excitado indevidamente, além de outros efeitos indesejáveis. Assim, a partir da determinação desse parâmetro, é estabelecido que, na faixa de frequência citada acima, deve ser adotado um fator de segurança de valor 10, ou seja, o limite de exposição ocupacional de seres humanos deve ser limitado a uma densidade de corrente de valor não superior a 10 mA/m². Ainda, para o público em geral adota-se um fator de segurança de valor 50, o que limita o valor máximo de densidade de corrente em 2 mA/m².

O valor limite de referência para os níveis máximos de corrente induzida em seres humanos, em frequências de até 2,5 kHz, é de 0,5 mA, [45], [46] e [48]. A Organização Mundial de Saúde (OMS) estabelece como normal um valor de 1 mA.

As Tabelas 3.1 e 3.2 fornecem um resumo dos valores limites de exposição de seres humanos a campos magnéticos, densidades de correntes e correntes induzidas, para o público em geral e exposição ocupacional, respectivamente, [45], [46], [47] e [48]. Neste momento, torna-se relevante também esclarecer a diferença entre exposição para público geral e exposição ocupacional, bem como o motivo da maior severidade dos valores para o público em geral. Segundo [46] tais razões são caracterizadas por: i) Indivíduos adultos que ocupacionalmente estão expostos a tais condições de interferência eletromagnética conhecem as referidas condições e, assim, possuem treinamento técnico, ficando atentos ao potencial de risco, sendo capazes de tomar as devidas precauções; ii) Contrastando com o indivíduo de exposição ocupacional, o público em geral é composto de pessoas de todas

as idades e condições de saúde, o que implica na possível incidência de indivíduos particularmente suscetíveis; iii) O público em geral, em sua maioria não possui consciência dos efeitos de uma exposição a interferência eletromagnética, além de não possuir treinamento ou capacidade de tomar as devidas precauções que minimizem ou evitem esta exposição.

Tabela 3.1: Valores limite de campos magnéticos, densidades de correntes e correntes induzidas
para o público geral. Fonte: [45], [46], [47] e [48].

	Valores para o Público Geral				
Parâmetro / Órgão	ICNIRP [45]	ABNT [46]	NBR 15415 [47]	IEEE C95.6 [48]	
Densidade de Fluxo Magnético (µT)	83,3	83,3	83,3	904	
Densidade de Fluxo Magnético (mG)	833	833	833	9040	
Densidade de Corrente (mA/m ²)	2	2	2	2	
Corrente Induzida (mA)	0,5	0,5	-	0,5	
*Obs.: 1 μT = 10 mG					

Tabela 3.2: Valores limite de campos magnéticos, densidades de correntes e correntes induzidas para exposição ocupacional. Fonte: [45], [46], [47] e [48].

	Valores para Exposição Ocupacional				
Parâmetro / Órgão	ICNIRP [45]	ABNT [46]	NBR 15415 [47]	IEEE C95.6 [48]	
Densidade de Fluxo Magnético (µT)	416,6	416,6	-	2712	
Densidade de Fluxo Magnético (mG)	4166	4166	-	27120	
Densidade de Corrente (mA/m ²)	10	10	-	10	
Corrente Induzida (mA)	1,0	1,0	-	1,5	
*Obs.: 1 μT = 10 mG					

3.3 – Visão geral da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos

3.3.1 – Introdução

A interferência eletromagnética entre uma linha de transmissão é alvo de estudo de diversos autores e vários trabalhos são encontrados na literatura. Os motivos que acarretam a necessidade deste estudo já foram devidamente explicados anteriormente. A título de

exemplificação, verifica-se através da Figura 3.2 a existência de uma linha de transmissão próxima a um gasoduto.

3.3.2 – Aspectos físicos

Para avaliar os aspectos físicos fundamentais no processo de interferência eletromagnética entre linhas de transmissão de corrente alternada e dutos, é oportuno proceder-se a uma abordagem dos fenômenos básicos envolvidos. Uma linha de transmissão em operação normal (60 Hz) pode funcionar como uma fonte de distúrbios eletromagnéticos em corpos metálicos colocados em suas proximidades. A natureza dos processos que estabelecem a interferência da linha nesses corpos tem quatro mecanismos fundamentais, designados por acoplamentos, [49]:

- I. Por campo elétrico (capacitivo);
- II. Por campo elétrico (condutivo);
- III. Por campo magnético (induzido ou indutivo);
- IV. Por radiação.

As equipotenciais do campo elétrico divergente, gerado pelas distribuições de cargas elétricas ao longo dos condutores da linha de transmissão (cabos fase e para-raios), abrangem os dutos situados em suas proximidades, estabelecendo níveis de potencial. A diferença de potencial entre a linha e tais dutos pode gerar correntes de naturezas capacitivas e condutivas em percursos que contêm os isolamentos entre tais elementos (isoladores, postes e solo). Assim, é estabelecido o acoplamento elétrico entre as linhas e os dutos, [49].



Figura 3.2: Gasoduto e linha de transmissão. Fonte: [50].

As correntes nos condutores da linha de transmissão geram um campo magnético cujo fluxo abrange a região entre linha e o duto próximo, originando no duto uma tensão induzida e, portanto, uma corrente induzida. Este é o acoplamento magnético, [49].

Aos campos elétrico e magnético está associado um vetor de Poynting em cada ponto do espaço, que corresponde à densidade de potência transmitida. Esta última atinge os dutos metálicos, podendo entregar-lhes um volume de energia, caracterizando o acoplamento por radiação, [49].

Em todos estes processos físicos, se os dutos estiverem enterrados no solo, seu efeito deve ser levado em consideração, pois faz parte do percurso das respectivas correntes induzidas. Na literatura existem trabalhos que abordam esta questão, com ferramentas computacionais comerciais de análise das interferências em regime permanente.

Por outro lado, a linha pode ser submetida a fenômenos transitórios (curtos-circuitos, operações de manobra e descargas atmosféricas), cujo espectro de frequência estende-se de 100 Hz a 1 MHz. Principalmente para o espectro superior, o fenômeno da interação eletromagnética entre as linhas e dutos não pode ser tratado pela quase estática (regime permanente). Tal fenômeno deve ser caracterizado no âmbito da eletrodinâmica e, assim, o processo de propagação de ondas eletromagnéticas radiadas e conduzidas é dominante. Este fenômeno é denominado acoplamento eletromagnético.

Na realidade, os acoplamentos se processam por todos esses mecanismos simultaneamente, pois o sistema que envolve os processos (linha de transmissão e duto) constitui-se fisicamente num único sistema. Consoante às características do sistema em análise (configuração física) e do sinal eletromagnético em consideração (permanente ou transitório), um mecanismo de acoplamento pode predominar sobre os demais, [49].

Considerando apenas o acoplamento em regime permanente, se o duto é isolado do solo, o efeito capacitivo pode predominar. A influência da corrente da linha pode ser desprezada nessa situação. Por outro lado, se o condutor onde se tem uma tensão induzida é conectado ao solo, predomina o acoplamento magnético. Os níveis de tensão na linha não afetam o valor da tensão induzida. O acoplamento condutivo, em tal tipo de configuração, pode ser desprezado nas condições normais de operação da linha, visto que nas configurações em consideração tem-se um bom isolamento entre os condutores da linha de transmissão e o duto. Também é desprezível o efeito de radiação, pois esse fenômeno só é intenso quando as frequências em jogo são elevadas e, no problema em questão, as frequências são muito reduzidas (da ordem de 60 Hz). Adicionalmente, neste caso de baixas frequências, os acoplamentos elétrico e magnético podem ser analisados de forma independente, uma vez que o fenômeno de acoplamento pode ser quantificado no âmbito da

quase estática, [11] e [49]. Vale mencionar que, no caso de dutos enterrados, o acoplamento elétrico (capacitivo) é desprezível em termos práticos em relação ao magnético, [11].

Evidentemente, os efeitos de tensões e correntes induzidas nos dutos, quando a linha sofre a ação de eventos transitórios, são substancialmente maiores que os níveis correspondentes quando a linha opera em regime permanente. Por outro lado, neste segundo caso os dutos são solicitados de forma contínua.

Deve ser destacado também que, naturalmente, a existência da faixa de passagem, ou servidão, não elimina a influência eletromagnética que a linha de transmissão exerce sobre os dutos, sejam eles enterrados ou aéreos, [50].

Os efeitos indesejados descritos acima podem apresentar riscos à saúde humana, como mencionado na subseção 3.2, e também danos materiais aos dutos e outras estruturas que por ventura estejam expostas a essas interferências eletromagnéticas.

3.3.3 – Descrição

Neste momento torna-se oportuno apresentar, mesmo que de forma sucinta e objetiva, alguns dos trabalhos já realizados referentes ao estudo da interferência magnética em causa.

Existem na literatura muitos trabalhos relacionados às diversas formas de interferência (acoplamentos elétrico, capacitivo e condutivo entre linhas de transmissão e dutos metálicos aéreos e enterrados; acoplamento magnético com dutos metálicos enterrados; acoplamento eletromagnético entre linhas de transmissão sob condições transitórias, curto-circuito, manobra e descargas atmosféricas e dutos metálicos aéreos e enterrados). Todavia, a descrição de tais trabalhos está fora do escopo desta dissertação.

Portanto, nesta seção apresentam-se alguns trabalhos relevantes presentes na literatura em ordem cronológica.

Incialmente no ano de 1989, [51] apresenta um trabalho para cálculo de corrente e tensão induzida em linhas e cabos multiaterrado, o que engloba tubulações. A metodologia proposta permite o cálculo tanto do acoplamento indutivo quanto resistivo entre diversos pontos de aterramento dos circuitos. A simplicidade matemática da metodologia que os autores apresentam influi diretamente no tempo de processamento e na quantidade de memória utilizada, o que permite para a época do trabalho, a implementação por meio de microcomputadores de pequeno porte. Tal simplicidade se deve ao fato dos vãos e resistências dos pés de torre serem simulados mediante grandezas reais, permitindo assim simulação de diversos vãos diferentes bem como resistências de pés de torre e impedâncias

próprias e mútuas que variam ao longo do trecho em análise. No desenvolvimento que os autores da referência [51] apresentam, atenção especial é dada ao acoplamento resistivo, onde os mesmos detalham e analisam o circuito equivalente deste acoplamento e também destacam a importância da resistência mútua entre pés de torre e tubulação nos resultados dos cálculos. Os estudos são aplicados nas interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e distribuição e um gasoduto a ser instalado na região de Belo Horizonte. O modelo que os autores apresentam consiste em determinar as fontes de tensão induzidas em um cabo ou duto através do acoplamento indutivo ou resistivo com outros cabos ou dutos e, assim, essas fontes de tensão são transformadas então em fontes de corrente pela aplicação do Teorema de Norton. Desse trabalho é importante descrever a modelagem que os autores realizam sobre o acoplamento indutivo (objeto de estudo desta dissertação), onde os mesmos modelam um circuito equivalente referente ao acoplamento em questão. A modelagem apresenta um cabo conduzindo corrente nas proximidades de um duto e assim, via acoplamento indutivo em cada trecho do duto é induzida uma tensão longitudinal. Essas fontes de tensão induzida nos vários trechos em análise são então transformadas em fontes de corrente equivalentes. Por fim, os autores realizam as simulações em trechos de paralelismo e cruzamento entre o gasoduto em projeto pela Gasmig e linhas de transmissão da Cemig de tensões de 69 kV, 138 kV e 345 kV ao longo de suas rotas.

No ano de 1990, os autores de [52] apresentam uma metodologia de cálculo a qual é compatível com o Método Desacoplado¹ que permite o cálculo das tensões e correntes induzidas em circuitos nas proximidades de linhas de transmissão e distribuição, ou seja, no caso em dutos metálicos. A metodologia que os autores apresentam envolvem conceitos bastante simples, o que permite a implementação de tais cálculos em microcomputadores de pequeno porte. Os cálculos são realizados em uma situação real de linha de transmissão e tubulação instalada próxima à região metropolitana de Belo Horizonte. Resumidamente, a metodologia de cálculo se resume a: i) determinar as forças eletromotrizes induzidas em um dos circuitos equivalentes (dutos) pela linha de transmissão; ii) transformar estas fontes de tensão em fontes de corrente via Teorema de Norton; iii) resolver o sistema linear que se caracteriza em função das fontes de corrente e das impedâncias do circuito; iv) calcular as correntes que circulam no circuito. Os autores apresentam detalhadamente o processo de cálculo e caracterizam os acoplamentos magnético, elétrico e metálico. Entende-se por acoplamento metálico entre dois cabos, a transferência de corrente entre eles através do contato metálico. A metodologia desenvolvida é aplicada em um caso exemplo do gasoduto da Gasmig na região metropolitana de Belo Horizonte, o qual utiliza parte da faixa de passagem de uma linha de transmissão de 69 kV da Cemig além de cruzar com várias

¹ Método onde os acoplamentos magnético, elétrico e resistivo são tratados de forma independente.

outras linhas de transmissão. Os autores concluem que a metodologia apresentada, apesar de envolver conceitos bastante simples de circuitos elétricos, é fisicamente consistente e com resultados satisfatórios. A metodologia apresentada permite uma grande variedade de simulações de acordo com as características abordadas no trabalho de [52].

No mesmo ano de 1990, [53] realiza uma análise sobre os efeitos da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e gasodutos. O trabalho consiste em um programa que calcula os níveis de tensão induzida em dutos aéreos e enterrados e faz uma análise de sensibilidade relativa a técnicas de mitigação das tensões induzidas.

Também em 1990, [54] elabora um programa para cálculo do campo magnético para diversas configurações de linhas de transmissão. O programa desenvolvido permite o cálculo em duas dimensões do campo elétrico e magnético gerados pelos diversos tipos de linhas de transmissão, reais, em questão. Os resultados são apresentados em forma de gráficos e a análise dos resultados é feita baseada nos mesmos.

No ano de 1992, em [55] é apresentado o desenvolvimento de um "Pacote Computacional de Cálculo de Interferências Eletromagnéticas devido à Linhas de Transmissão", onde se justifica tal pacote pela grande complexidade de cálculo e análise de resultados dessas interferências. Tal pacote recebe o nome de PILT. O objetivo do trabalho é sistematizar a análise da interferência eletromagnética entre as linhas de transmissão e uma gama enorme de situações, as quais são constituídas em 20 capítulos e procura uma abrangência ampla de análise das interferências de natureza eletromagnética, eletrostática e resistiva. O trabalho de [55] descreve detalhadamente todas as funções e capacidades que o pacote computacional elaborado consegue desenvolver, bem como suas principais características também são comentadas. O PILT é constituído de 20 programas principais, cada um de acordo com um tipo de circuito induzido e também de 6 programas de cálculos mais complexos. Exemplos de cálculos realizados pelo pacote computacional mencionado também são apresentados com o objetivo de mostrar sua grande eficácia.

Em 1995, a referência [56], grupo Cigré, elabora um vasto guia sobre a influência dos sistemas de alta tensão em dutos metálicos. O estudo aborda todos os tipos de acoplamentos (indutivo, capacitivo e resistivo). No que diz respeito ao acoplamento indutivo (magnético), objeto de estudo desta dissertação, a abordagem é significativa e abrangente dentre os quais alguns detalhes merecem uma atenção especial; assim, citam-se:

- Definição detalhada do acoplamento magnético entre uma linha de transmissão e um duto metálico, aéreo ou enterrado;
- Mecanismos do acoplamento magnético, onde é explicado o modo permanente de acoplamento e o modo transitório de acoplamento;

- A influência da distância entre a linha de transmissão e o duto metálico é apresentada e sua importância é evidenciada;
- O comprimento do duto metálico em exposição ao acoplamento magnético é de importância significante no que diz respeito ao nível de tensão induzida;
- A geometria da linha de transmissão responsável pelo acoplamento magnético também influencia nos níveis de campo magnético e consequentemente nos níveis de tensão induzida nos dutos metálicos.

O guia [56] expõe de maneira clara e sucinta os efeitos indesejáveis do acoplamento magnético, dentre os quais pode-se citar o perigo do contato de seres humanos com os dutos metálicos ora submetidos a tensões induzidas e danos a equipamentos conectados aos dutos metálicos.

No ano de 1996, em [57] é apresentado um trabalho extremamente abrangente no que diz respeito às interferências eletromagnéticas devidas às linhas de transmissão. O trabalho inclui todos os aspectos de altas e baixas frequências. O trabalho, do ponto de vista de segurança de seres vivos na frequência de 60 Hz (escopo desta dissertação), aborda os acoplamentos magnético, resistivo e capacitivo. Do ponto de vista do acoplamento magnético, o trabalho mostra a influência de um cabo condutor percorrido por uma corrente elétrica nas proximidades de outro cabo multiaterrado sobre o qual será induzida uma tensão. Do ponto de vista prático, os autores de [57] apresentam um exemplo (situação real) onde são calculados os níveis de tensão induzida em um gasoduto em condição de paralelismo com a linha de transmissão.

Para o ano de 1997, os autores de [58] elaboram um trabalho no qual é calculado o campo magnético gerado por linhas de transmissão de alta tensão e baseado em tais valores os mesmos aplicam uma técnica de redução do campo magnético. A eficácia da técnica, mediante a utilização de uma espira condutora colocada abaixo da linha de transmissão, ilustra que os resultados de campo magnético a 1 metro do solo são reduzidos de 30% a 50%. A técnica em questão é recomendada para que seja aplicada em regiões habitadas, visto a preocupação dos autores em verificar e analisar os valores e influência dos campos magnéticos em seres vivos e seus efeitos prejudiciais aos mesmos.

No ano de 1998, os autores de [59] utilizam o método das imagens complexas para calcular os níveis de campo magnético gerados por linhas de transmissão operando na frequência de 50 Hz.

Em 1999, [60] e [61] apresentam trabalhos de grande relevância no que implica ao estudo dos campos magnéticos. Os responsáveis por [60] realizam os cálculos de campo magnético também para sistemas desbalanceados de transmissão de energia. Já [61]

calcula o campo magnético para diversos arranjos dos cabos fase, verificando os mesmos níveis de interferência do campo magnético.

No ano de 2003, a utilização dos valores de impedância mútua entre os cabos de uma linha de transmissão trifásica é um dos parâmetros que também é calculado por [62] para o cálculo do campo magnético, considerando linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão. O plano do solo foi modelado a partir do plano complexo de retorno com variação da frequência e algumas simulações do valor do campo magnético no nível do solo são apresentadas.

Também no ano de 2003, [63] apresenta um estudo muito importante, pois avalia os efeitos e cuidados que devem ser tomados em função da exposição ao campo magnético gerado por uma linha de transmissão e dutos metálicos enterrados.

O cálculo do campo magnético gerado por linhas de transmissão de circuito duplo é apresentado por [64] no ano de 2008. O efeito do arranjo entre as fases é considerado e são realizadas simulações para alguns casos específicos.

Em 2010, [65] utiliza uma técnica de mitigação dos valores de campo magnético para que seja possível diminuir os limites dentro da faixa de passagem. A linha de transmissão utilizada para o trabalho é de 500 kV com circuito simples na frequência de 50 Hz.

No trabalho [66], de 2012, é realizado o cálculo do campo elétrico utilizando o Método da Simulação de Cargas e também é calculado o campo magnético para o perfil transversal a uma altura de 1 m do solo. Nesse trabalho é desconsiderada as correntes de retorno pelo solo onde o mesmo é considerado um condutor perfeito. As simulações são realizadas em situações reais de linhas de transmissão.

Finalmente, é importante contextualizar o presente trabalho em relação aos citados anteriormente. Enquanto a maioria dos trabalhos aborda a questão dentro de uma perspectiva de teoria de circuitos, este trabalho apresenta uma visão de teoria de campo eletromagnético. A análise é feita inicialmente através do campo magnético; posteriormente, é realizado o estudo da tensão induzida (longitudinal) no duto metálico e por fim os parâmetros tensão transversal e corrente longitudinal são determinados. A série de análises de sensibilidade apresentadas nesta dissertação não é contemplada nos trabalhos previamente citados. É oportuno destacar também que a caracterização de todas as grandezas presentes nesta dissertação também não é vista nos trabalhos citados nesta subseção.

3.4 – Modelagem eletromagnética para análise da interferência magnética

3.4.1 – Introdução

A modelagem eletromagnética adotada para o cálculo da interferência magnética entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos utiliza como base as Equações de Maxwell², [67] e [68] (principalmente, a Lei Circuital de Ampère Generalizada, ou Lei de Ampère-Maxwell, e a Lei de Faraday) e alguns teoremas e métodos adicionais, [14] e [31] (raio médio geométrico, método das imagens complexas e teorema da superposição).

As Equações de Maxwell descrevem o comportamento eletromagnético de um sistema elétrico e são representadas nas Equações de (3.1) a (3.4), nas formas pontual (ou diferencial), integral, e no domínio do tempo. As formulações das Equações de Maxwell e também suas inúmeras aplicações são fortemente visualizadas na literatura da área, como por exemplo, em [67] e [68].

Forma Diferencial:		Forma Integral:	Lei de:	
$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	⇔	$\oint_{c} \vec{E} \bullet \vec{d\ell} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_{S} \vec{B} \bullet \vec{dS}$	Faraday	(3.1),
$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_{c} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	⇔	$\oint_{c} \vec{H} \bullet \vec{d\ell} = \int_{S} \left(\vec{J}_{c} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \bullet \vec{dS}$	Ampère generalizada	(3.2),
$\vec{\nabla} \bullet \vec{D} = \rho_v$	\Leftrightarrow	$\oint_{S} \vec{D} \bullet \vec{dS} = \int_{v} \rho_{v} dv$	Gauss da Eletricidade	(3.3),
$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0$	⇔	$\oint_{S} \vec{B} \cdot \vec{dS} = 0$	Gauss do Magnetismo	(3.4).

De acordo com o sistema de operação proposto nesta dissertação (acoplamento magnético e regime permanente em 60 Hz), as Equações de Maxwell são analisadas de forma simplificada e desacoplada, o qual se aplica ao estudo desta dissertação.

Assim, a Equação $(3.3)^3$, que trata da natureza divergente do campo elétrico⁴, gerado por distribuições de cargas elétricas (ρ_v), não é utilizada, pois na faixa de frequências

² James Clerk Maxwell (1831-1879), matemático e físico escocês, publicou as teorias físicas e matemáticas do campo eletromagnético.

³ S é a superfície fechada que delimita o volume v.

industriais (50 ou 60 Hz) o efeito deste campo pode ser desacoplado do efeito do campo magnético, [11] e [49].

Diante do exposto, somente as Equações (3.1), (3.2) e (3.4) são consideradas para análises de acoplamento magnético.

A Equação (3.4) informa fisicamente que o campo magnético⁵ não possui natureza divergente, o que é confirmado experimentalmente pela inexistência de monopólos magnéticos (não existe carga magnética isolada).

A Equação (3.2)⁶ informa que campos vetoriais densidades de correntes de naturezas condutiva (\vec{J}_c) e de deslocamento $(\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t})$ geram campos magnéticos de natureza rotacional (circulação). Neste ponto, cabem algumas considerações de ordens práticas. As distribuições de correntes que geram campo magnético correspondem às existentes nos condutores da linha (cabos fase e para-raios). Para este caso, bons condutores em baixa frequência (alto valor de condutividade e permissividade igual à do vácuo), observando a relação entre a densidade de corrente de condução e a densidade de corrente de deslocamento (que corresponde à grandeza física denominada "tangentes de perdas"), é possível verificar que a corrente de deslocamento é, em termos práticos,

desprezível, pois: $\frac{\left|\overline{J_{c}}\right|}{\left|\overline{J_{D}}\right|} = \frac{\sigma_{c}\left|\overline{E}\right|}{\varepsilon_{0}\left|\frac{\partial \overline{E}}{\partial t}\right|} >> 1^{7}$ na direção axial ao condutor⁸, onde o campo elétrico

corresponde ao campo ao longo do condutor. Desta forma, a Equação (3.2) pode ser

⁴ Neste caso, a equação constitutiva $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$ relaciona o campo vetorial densidade de fluxo elétrico (\vec{D}) com o campo vetorial intensidade de campo elétrico (\vec{E}) por meio da permissividade elétrica do vácuo (\approx ar) $\epsilon_0 = 8,854 \text{ x } 10^{-12} \text{ F/m}.$

⁵ Neste caso, a equação constitutiva $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ relaciona o campo vetorial densidade de fluxo magnético (\vec{B}) com o campo vetorial intensidade de campo magnético (\vec{H}) por meio da permeabilidade magnética do vácuo (\approx ar) $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m. ⁶ c é o caminho fechado que delimita a superfície aberta S.

⁷ Isto é mais facilmente verificado no domínio da frequência, onde: $\frac{\left|\overline{J_{CS}}\right|}{\left|\overline{J_{DS}}\right|} = \frac{\sigma_{C}\left|\overline{E_{S}}\right|}{\left|j\right|\omega\epsilon_{0}\left|\overline{E_{S}}\right|} = \frac{\sigma_{C}}{\omega\epsilon_{0}};$

o subscrito "S" indica grandeza fasorial. Supondo que o condutor seja de alumínio ($\sigma_{C} = \sigma_{AL} \approx 3.5 \times 10^{7}$ S/m), tem-se: $\frac{3.5 \times 10^{7}}{\omega \times 8.854 \times 10^{-12}} \approx \frac{4 \times 10^{18}}{2\pi \times 60} \approx 1.1 \times 10^{16}$. Portanto, a corrente de

condução é 1,1 x 10¹⁶ vezes a corrente de deslocamento. Logo, pode-se considerar que o efeito longitudinal é dominado pela corrente de condução. A razão $\sigma/\omega\epsilon$ é denominada "tangente de perdas" do meio material sob estudo. ⁸ Isto explica a inexistência de efeito capacitivo apreciável na direção longitudinal.

simplificada para a Equação (3.5), simplesmente denominada Lei de Ampère, onde I_c é a corrente elétrica nos condutores da linha.

Forma Diferencial:		Forma Integral:	Lei de:	
$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_{c}$	\Leftrightarrow	$\oint_{C} \vec{H} \bullet \vec{d\ell} = \int_{S} \vec{J}_{C} \bullet \vec{dS} = I_{C}$	Ampère	(3.5).

A Equação (3.1) quantifica o fenômeno de indução magnética, onde um campo magnético variável no tempo, determinado pela Equação (3.5), gera um campo elétrico de natureza rotacional, que existe ao redor da variação temporal do campo magnético que o gerou. Em decorrência, qualquer objeto metálico (um duto, por exemplo) nas proximidades da linha de transmissão terá sua superfície aberta (definida pela região entre duto e solo) atravessada por campo magnético variável no tempo. Por conseguinte, esta variação de campo magnético, distribuída na superfície aberta do sistema duto-solo, induz um campo elétrico de natureza rotacional, cuja circulação (ao longo do caminho fechado formado pelo duto e superfície do solo) corresponde à tensão induzida (ou força eletromotriz induzida) no duto. Caso este duto esteja conectado ao solo circulará pelo mesmo uma corrente induzida, quantificada pela relação entre a tensão induzida e a impedância do duto (incluindo a contribuição do solo no retorno de corrente induzida pelo mesmo).

Pelo exposto, conclui-se que o acoplamento magnético é ditado pelas Equações (3.1), (3.4) e (3.5).

3.4.2 – Premissas e limites de validade

Na subseção 3.4.1 é apresentada a metodologia que deve ser utilizada para avaliações qualitativa e quantitativa do acoplamento magnético entre linhas de transmissão operando em regime permanente (frequência industrial de 60 Hz) e dutos metálicos aéreos situados em suas proximidades. Em outras palavras, é apresentada a modelagem eletromagnética considerada para as análises em questão. Evidentemente, em toda modelagem eletromagnética estão envolvidas aproximações de ordem matemática e/ou física. Tais aproximações devem ser detalhadamente conhecidas, pois envolvem os limites de validade de aplicação da modelagem proposta o que implica na coerência dos resultados apresentados nas análises de sensbilidade. No modelo apresentado anteriormente, a situação não é diferente. Julga-se oportuno, portanto, apresentar suas premissas, que definem os limites de validade de todo equacionamento presente nas subseções 3.4.3 e 3.4.4. São elas:

1) Linha de Transmissão.

a. Características gerais \Rightarrow trifásica⁹, aérea, simétrica¹⁰, balanceada¹¹ e uniforme¹²;

b. Regime de operação \Rightarrow regime permanente senoidal na frequência de 60 Hz;

c. Tensões aplicadas aos condutores fase da linha de transmissão \Rightarrow equilibradas (mesma amplitude e defasadas de 120° no tempo, com sequência de fase ABC (fase A como referência)). Desta forma, somente existem seus componentes de sequência positiva (os de negativa e zero são nulos). Isto é evidente, pois a linha opera em regime permanente senoidal;

d. Níveis de corrente nos condutores fase \Rightarrow o conhecimento de todas as correntes nos condutores fase (módulo e ângulo/defasagem) é um pré-requisito para o cálculo do campo magnético e tensão induzida nos dutos. Esta não é, no entanto, uma tarefa simples. Enquanto a tensão da linha é conhecida com relativa precisão, sem grandes variações ao longo do tempo, a corrente varia de forma considerável. Uma das razões para que isto ocorra é a variação das exigências de energia elétrica (aproximadamente proporcionais à corrente) que descreve ciclos diários e anuais. A variação diária ocorre conforme os padrões de atividade profissional e doméstica na área geográfica alimentada pela linha de transmissão em consideração. As variações anuais seguem as alterações climáticas de que dependem as necessidades de aquecimento, ar condicionado, bem como a atividade ceráunica. Tendo em conta esta imprevisibilidade dos valores instantâneos da corrente, os valores de campo magnético e de tensão induzida também variam ao longo do tempo. Não é assim possível usar um valor rigoroso para caracterizar o campo magnético da linha e a tensão induzida no duto, com base numa determinada medição, pois esse valor será diferente pouco tempo depois. Assim, o cálculo das correntes é baseado nas "condições normais de funcionamento". Desta forma, as correntes nos cabos fase são calculadas de acordo com a potência nominal da linha de transmissão¹³;

e. Distâncias entre fontes (distribuições de corrente) e pontos de observação (do campo magnético) ⇒ da ordem de dezenas de metros (pelo menos de 10 m a

⁹ Constituída por um sistema de três tensões senoidais, distribuídas em três fases A, B e C, [1].

¹⁰ Caracterizada pelos mesmos valores máximos de tensões em cada fase e defasados entre eles por um ângulo de 120º no tempo, [1].

 ¹¹ Aquela que apresenta impedâncias próprias dos cabos fase iguais entre si e impedâncias mútuas entre os cabos fase iguais entre si, [1].
 ¹² Aquela em que a relação entre os fasores de tensão e corrente é exatamente a mesma em

¹² Aquela em que a relação entre os fasores de tensão e corrente é exatamente a mesma em qualquer ponto ao longo da linha, acarretando na independência de sua impedância característica em relação ao seu comprimento.

¹³ $I_L = \frac{S}{\sqrt{3} V_L \cos \phi}$, onde S é a potência complexa nominal da linha; $I_L \in V_L$ são as amplitudes de

corrente e tensão de linha, respectivamente, e cos ϕ é o fator de potência da linha.

20 m). Isto permite aproximar os cabos da linha (fases e para-raios) por condutores filamentares, ou seja, com raios desprezíveis¹⁴;

f. Distâncias entre todos os condutores do sistema sob estudo \Rightarrow muito maiores que seus respectivos raios. Em consequência, o efeito de proximidade entre tais condutores pode ser, em termos práticos, desprezados. Assim, neste caso, as correntes podem ser aproximadas por distribuições uniformes e lineares ao longo de tais condutores. Outra consequência desta aproximação refere-se às linhas cujas fases são compostas por feixes de condutores. Neste caso, pode ser utilizado o conceito de raio médio geométrico (ou raio equivalente), descrito no Capítulo 2 (seção 2.2, subseção 2.2.3), Equações (2.3) a (2.5);

g. Catenária dos condutores da linha (fases e para-raios) ⇒ levada em consideração por meio de sua flecha (Figura 2.5). Assim, todas as suas alturas correspondem às "alturas médias", Equação (2.1). Portanto, todos estes condutores são paralelos entre si e ao solo. Adicionalmente, os mesmos são cilíndricos e de superfície perfeitamente lisa;

h. Comprimentos dos condutores da linha de transmissão \Rightarrow da ordem de centenas de km; portanto, muito maiores que as distâncias entre as fontes e os pontos de observação do campo magnético. Consequentemente, em termos práticos, podem ser aproximados por condutores com comprimentos que tendem a infinito. Desta forma, devida à simetria na distribuição de corrente, é mais fácil a utilização da Lei de Ampère para calcular o campo magnético, quando comparada com o cálculo via Lei de Biot-Savart¹⁵;

i. Torres e cadeias de isoladores \Rightarrow não distorcem os campos magnéticos; assim sendo, os cálculos dos mesmos podem ser realizados em duas dimensões (em um plano normal ao eixo longitudinal da linha). Portanto, o campo magnético tem somente componentes neste plano, não existindo componente ao longo da linha (no eixo longitudinal);

j. Cabos para-raios ⇒ estão efetivamente conectados às torres das linhas e os aterramentos das mesmas são considerados muito bons. Tal situação, aliada à condição quase estática, garante que as tensões dos cabos para-raios são aproximadamente nulas¹⁶. Também, como é amplamente divulgado na literatura, os cabos para-raios (existentes em

¹⁴ Isto permite considerar a corrente elétrica longitudinal concentrada no centro dos condutores independentemente do valor dos raios dos mesmos.

¹⁵ Físicos franceses Jean-Baptiste Biot e Félix Savart estabeleceram que a intensidade do vetor campo magnético total pode ser calculada somando-se as contribuições dos campos magnéticos associados a vários trechos de um fio que apresente corrente elétrica.

¹⁶ Tais considerações são importantes para a determinação das correntes induzidas nos cabos pararaios pelas correntes variantes no tempo dos cabos das fases. Adicionalmente, é importante destacar que a aproximação de tensões nulas nos cabos para-raios é fisicamente consistente para vãos com comprimentos até em torno de 500 m. Para vãos maiores, esta aproximação carece de consistência física. Outro aspecto questionável é a consideração de aterramentos com baixos valores de resistência. Esta condição somente é obtida em regiões em que os solos locais possuem valores reduzidos de resistividade elétrica.

sistemas trifásicos) são constituídos por material ferromagnético. Contudo, seu efeito de histerese não é levado em conta em função das baixas frequências envolvidas;

k. Cabos compostos por fios encordoados e com alma de aço \Rightarrow representados por condutores tubulares com seção reta (transversal) com a forma de uma coroa circular, onde a corrente na alma de aço é desconsiderada.

2) Meios onde o sistema sob estudo está inserido (ar e solo).

a. Características eletromagnéticas relevantes (condutividade, permissividade e permeabilidade) ⇒ considerados homogêneos, lineares e isotrópicos. Por conseguinte, suas propriedades eletromagnéticas não variam, respectivamente, com a posição, intensidade e orientação (direção e sentido) do campo aplicado;

b. Presença de cargas elétricas livres \Rightarrow não existe carga elétrica livre nos meios que preenchem as regiões de interesse (ar-solo);

c. Interface (superfície) de separação ar-solo \Rightarrow considerada plana e paralela aos condutores da linha de transmissão;

d. Efeito do solo no cálculo do campo magnético e no retorno de corrente \Rightarrow em muitos estudos o solo é considerado um condutor elétrico perfeito ($\sigma_s \rightarrow \infty$). Assim, seu efeito pode ser contemplado pelo método de imagens ideais. Por outro lado, uma modelagem mais adequada para o solo é considerá-lo com condutividade finita ($\sigma_s \neq \infty$), permissividade diferente da do vácuo ($\epsilon_s \neq \epsilon_0$) e permeabilidade igual à do vácuo ($\mu_s = \mu_0$). Contudo, para baixas frequências, pode-se considerar $\varepsilon_s = \varepsilon_0$. A modelagem do solo utilizada nesta dissertação é aquela proposta por A. Deri [14], onde é feita a concepção de um plano complexo de retorno de corrente pelo solo, o qual é inserido no método das imagens, que passa a ser denominado "método das imagens complexas", [49]. Este plano complexo possui uma condutividade infinita e fica situado a uma profundidade "p" complexa, que depende da frequência e dos parâmetros eletromagnéticos do solo. Existem outras metodologias de inclusão do efeito do solo, como por exemplo, as desenvolvidas por J. R. Carson, M. Nakagawa, T. Noda e outros, [12]. Contudo, conforme mostrado em [12], em baixa freguência, os resultados oriundos da aplicação destas diversas metodologias geram praticamente os mesmos resultados. Por este motivo, nesta dissertação optou-se por adotar a de A. Deri [14], pois é constituída por formulações de implementação computacional mais simples;

e. Estratificação do solo \Rightarrow o solo é considerado um meio homogêneo, ou seja, a estratificação do mesmo em camadas de diferentes resistividades não é levada em

consideração. Logo, o sistema sob estudo é constituído por 2 meios semi-infinitos, o ar e o solo (além, é claro dos condutores da linha e dos dutos).

3) Dutos.

a. Condutores que representam os dutos \Rightarrow cilíndricos, perfeitamente lisos e paralelos aos cabos da linha e ao solo;

b. Material \Rightarrow aço, pois esse tipo de duto é capaz de transportar uma variedade maior de produtos; contudo, dada a operação da linha em regime permanente em baixa frequência, o efeito de histerese magnética pode ser desconsiderado;

c. Interligação entre dutos \Rightarrow realizada por meio de soldagem industrial, uma vez que assim é garantida uma maior segurança contra acidentes, [36]. Nos cálculos realizados neste estudo, desconsidera-se a existência de tais soldagens;

 d. Localização ⇒ no ar; somente são considerados dutos metálicos aéreos, excluindose os dutos enterrados e submarinos;

e. Tensões e correntes induzidas nos dutos ⇒ consideradas apenas em pontos onde existe o paralelismo dos dutos com a linha, fato que se justifica pela expansão do sistema de energia bem como da necessidade de se aproveitar tais áreas no transporte de produtos com dutos, [32];

f. Posicionamento dos dutos em relação às linhas \Rightarrow somente são considerados dutos paralelos aos condutores fase e para-raios das linhas de transmissão.

4) Propagação de ondas eletromagnéticas na linha de transmissão.

a. Efeito de energia eletromagnética radiada \Rightarrow evidentemente, todos os campos variam com o tempo. Assim, $\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}^{17}$ gera um \vec{H} variável no tempo (no ar), de acordo com a Equação (3.2). Por sua vez, este \vec{H} ($\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$) gera um \vec{E} também variável no tempo no ar, Equação (3.1), e assim por diante¹⁸. Este fenômeno corresponde à radiação de energia eletromagnética, fazendo com que a linha se comporte como uma antena. Este fato é desconsiderado na modelagem apresentada. Tal desconsideração é possível em função de

¹⁷ Neste caso, Ē no ar é gerado pela distribuição de carga volumétrica existente na linha de transmissão, de acordo com a Equação (3.3).

¹⁸ Situação semelhante ocorre no caso da aplicação da Equação (3.1), onde a variação de B no tempo, gerado pelas correntes na linha de transmissão, gera um \vec{E} de natureza rotacional no ar, que por sua vez, devido à sua variação temporal, gera um \vec{B} (no ar), Equação (3.2), que por sua vez gera um \vec{E} no ar e assim sucessivamente.

dois fatores: i) λ/4 maior que o vão da linha¹⁹ e ii) altura média dos condutores da linha (dezenas de metros) menor que λ; logo, o tempo de propagação na direção transversal (perpendicular) à linha é desprezado;

b. Modo de propagação do campo eletromagnético \Rightarrow as equações que traduzem o comportamento das ondas de tensão e de corrente em linhas de transmissão, amplamente divulgadas na literatura, [1], [24] e [31], por exemplo, podem ser deduzidas somente se for assumido o modo de propagação transverso eletromagnético (TEM) para os campos \vec{E} e \vec{H} na linha. Deste modo, estes campos devem ser mutuamente ortogonais. Portanto, não há campo na direção e sentido de propagação do vetor de Poynting (ao longo da linha de transmissão). Contudo, observa-se que, devido à $\vec{J_c} = \sigma \vec{E}$, existe componente de campo elétrico ao longo da linha. Todavia, $\vec{\mathsf{E}}$ pode ser desconsiderado na avaliação de propagação, pois, $\vec{E} = \rho_C \vec{J_C}$ é relativamente reduzido, pois ρ_C^{20} é da ordem de 10⁻⁷ a 10⁻⁸ Ω.m; seu efeito é somente levado em conta para cômputo do efeito joule longitudinal (RI²). Assim sendo, o modo de propagação considerado é o "quase-TEM";

Equações de tensão e corrente na linha de transmissão \Rightarrow como dito acima, as c. equações das ondas de tensão e de corrente em linhas são amplamente divulgadas na literatura e são expressas matematicamente por²¹:

$$\frac{\partial V(\mathbf{y}, \mathbf{t})}{\partial \mathbf{y}} = \mathsf{RI}(\mathbf{y}, \mathbf{t}) + \mathsf{L}\frac{\partial \mathsf{I}(\mathbf{y}, \mathbf{t})}{\partial \mathsf{t}}$$
(3.6a)

Domínio do tempo:

$$\left[-\frac{\partial I(y,t)}{\partial y} = GV(y,t) + C\frac{\partial V(y,t)}{\partial t} \approx C\frac{\partial V(y,t)}{\partial t} \right]$$
(3.6b)

$$\int -\frac{dV_{s}(y)}{dy} = (R + j\omega L)I_{s}(y)$$
(3.7a)

Domínio fasorial

I:
$$\int -\frac{dI_{s}(y)}{dy} = (G + j\omega C)V_{s}(y) \approx j\omega C V_{s}(y)$$
(3.7b)

Nas Equações (3.6a), (3.6b), (3.7a) e (3.7b), tem-se que: y é a posição ao longo da linha (assume-se que a linha se estende na direção do eixo y); V e I são os valores instantâneos de tensão e corrente (t é o tempo), em cada ponto (y) da linha, respectivamente; V_S e I_S são os fasores (em cada ponto da linha) de tensão e corrente, respectivamente; $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular da linha (em rad/s) e f é a frequência cíclica

¹⁹ Onde λ é o comprimento de onda em 60 Hz: $\lambda \approx \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{60} \frac{m/s}{Hz} \approx 5000 \text{ km}$, sendo c a velocidade da luz no vácuo e os vãos típicos de linha de transmissão estão entre 300 m e 500 m. 20 ρ_C = 1/σ é resistividade elétrica do condutor. ²¹ Normalmente, para linhas de transmissão aéreas, tem-se que G ≈ 0.

da linha (60 Hz); R, L, G e C são, respectivamente, a resistência (Ω /m), a indutância (H/m), a condutância (1/ Ω .m) e a capacitância (F/m) da linha (parâmetros estes distribuídos, ou seja, por unidade de comprimento); $Z_L = R + j\omega L$ é a impedância longitudinal da linha e $Y_T = G + j\omega C$ é a admitância transversal da linha²².

Nos cálculos realizados para avaliação do campo magnético, todas as correntes do sistema não dependem de y, ou seja, as correntes transversais de deslocamento entre condutores e entre condutores e solo são desconsideradas. Isto equivale a igualar a zero a Equação (3.7b). Desta forma, considera-se, assim, conforme já destacado, que os campos elétrico e magnético são transversais (modo de propagação TEM). Esta é uma condição fundamental para a definição rigorosa da tensão V e corrente I numa seção da linha. A transversalidade dos campos é inteiramente compatível com as condições de fronteira impostas por condutores perfeitos. Conclui-se, assim, que para efeitos de cálculo do campo magnético, apenas a Equação (3.7a) é relevante²³. Consequentemente, a separação entre os efeitos elétricos e magnéticos é uma aproximação adequada para regimes quase estacionários (60 Hz), onde os fenômenos de propagação de onda são insignificantes em termos práticos.

5) Domínio no qual os cálculos são realizados.

a. Domínio fasorial (ou da frequência) ⇒ devido à operação em regime permanente senoidal do sistema de transmissão, aliado ao comportamento linear do mesmo, a maior parte dos cálculos é realizada no domínio fasorial. Em função do enorme conhecimento disseminado deste domínio, e de sua relação com o domínio do tempo, nas apresentações e deduções das relações matemáticas, entre as grandezas físicas de interesse deste trabalho, apresentadas nas seções seguintes, bem como no restante desta dissertação, não é preocupação fazer distinção direta de uma determinada grandeza representada em um domínio ou outro, pois isto fica evidente em decorrência da formulação matemática apresentada. Desta forma, a partir deste ponto do trabalho, não é utilizado o subscrito "S" para distinguir grandeza fasorial de grandeza no domínio do tempo.

 $^{^{22}}$ Evidentemente, para linhas de transmissão polifásicas tem-se que R, L, G, C, Z_L e Y_T são matrizes.

²³ O contrário ocorre para o cálculo do campo elétrico, onde apenas a Equação (3.7b) é relevante.

3.4.3 – Cálculo dos campos vetoriais intensidade de campo magnético (\vec{H}) e densidade de fluxo magnético (\vec{B})

3.4.3.1 – Lei de Ampère para fenômenos quase estáticos

A formulação da Lei de Ampère é atribuída a André-Marie Ampère²⁴, a qual estabelece, em sua forma integral, Equação (3.5), que a integral de linha do componente tangencial de \vec{H} em torno de um caminho fechado é igual à corrente I_{env} envolvida pelo caminho [24], [67] e [68]. Como já destacado I_{env} possui somente natureza condutiva. Daí, a necessidade do conhecimento das correntes nos condutores fase e nos cabos para-raios.

A solução da Equação (3.5) aplicada a um condutor filamentar de comprimento infinito é ilustrada na Equação (3.8).

$$\vec{\mathsf{H}} = \frac{\mathsf{I}}{2\pi\rho} \, \hat{\mathsf{a}}_{\phi} \tag{3.8},$$

onde I é a corrente que circula pela linha de transmissão, ρ é a distância vertical entre o ponto da fonte (determinado pela projeção vertical do ponto de observação na linha) e o ponto de observação do campo magnético e \hat{a}_{ϕ} é o vetor unitário que indica a direção e sentido do campo magnético no ponto de observação, o qual é determinando de acordo com a Equação (3.9).

$$\hat{\mathbf{a}}_{\phi} = \hat{\mathbf{a}}_{\mathsf{L}} \times \hat{\mathbf{a}}_{\rho} \tag{3.9},$$

onde \hat{a}_{L} é o vetor unitário que define direção e sentido do fluxo ordenado de cargas elétricas (corrente elétrica) ao longo do condutor filamentar e \hat{a}_{ρ} é o vetor unitário que caracteriza a direção e o sentido do vetor cuja origem corresponde ao ponto do condutor filamentar determinado pela projeção ortogonal do ponto de observação do campo magnético (P) no condutor e a extremidade é o próprio ponto de observação.

A Figura 3.3 ilustra de forma generalizada um sistema físico real monofásico onde é aplicada a Lei de Ampère para determinação do campo magnético \vec{H} no ponto P²⁵.

²⁴ André-Marie Ampère (1775-1836), físico, matemático e filósofo francês, é conhecido por ter definido um modo de medir o fluxo da corrente elétrica. Ele foi chamado de o Newton da Eletricidade. ²⁵ Em toda a dissertação é utilizada a seguinte representação geométrica: linha de transmissão e dutos ao longo do eixo y; ar para z > 0 e solo para z < 0; representação do perfil transversal de campo magnético ao longo do eixo x.



Figura 3.3: Sistema físico real monofásico generalizado para cálculo do campo magnético, composto por 2 meios semi-infinitos: ar para z > 0 e solo para z < 0. A linha de transmissão se estende ao longo do eixo y. Este sistema de eixos é utilizado em todas as representações geométricas desta dissertação.

A Equação (3.8) somente é válida para o cálculo do campo magnético gerado por uma linha imersa em um único meio (infinito em todas as direções). Todavia, o sistema sob estudo (Figura 3.3) é constituído por 2 meios semi-infinitos (ar e solo). Portanto, é necessário incluir a presença destes 2 meios na expressão do campo magnético. Tal inclusão é realizada mediante a aplicação do Método das Imagens.

3.4.3.2 – Método das Imagens

O Método das Imagens é uma técnica desenvolvida por Lord Kelvin²⁶ no ano de 1848, utilizada para determinar algumas grandezas na eletrostática, tais como potencial elétrico, campo elétrico e densidade de fluxo elétrico, [67] e [68]. Na magnetostática o método das imagens é utilizado para representar as correntes que penetram o solo, as quais influenciam os valores do campo magnético no ponto de observação.

A teoria das imagens estabelece que para uma dada configuração de corrente, próxima a um plano infinito condutor perfeito aterrado, pode ser substituída pela própria configuração de corrente, por sua imagem, e por uma superfície equipotencial no lugar do plano condutor, [67], [68], [69] e [70].

A Figura 3.4 (denominado sistema físico equivalente) ilustra o resultado da aplicação do Método das Imagens no sistema esboçado na Figura 3.3 (denominado sistema físico

²⁶ Lord Kelvin (1824-1907) matemático e físico britânico. Nasceu em Belfast, Irlanda do Norte, com o nome de William Thomson. Aos 68 anos de idade receberia o título de nobreza de Primeiro Barão Kelvin de Largs, pela grande importância de seu trabalho científico.

real)²⁷. É merecedor de destaque o fato da superfície do solo corresponder a um "plano de reflexão", que permite posicionar a fonte de corrente imagem.



Figura 3.4: Método das Imagens para um sistema monofásico.

Percebe-se, assim, que por meio do Método das Imagens é possível transformar o sistema físico real (composto de dois meios semi-infinitos: ar e solo) em um sistema único e equivalente, composto por somente um meio infinito que é o ar (meio onde as fontes reais estão imersas). O sinal negativo da corrente imagem é utilizado para compatibilizar o comportamento do campo magnético na fronteira ar-solo²⁸.

Por conseguinte, aplicando o Método das Imagens e utilizando a Lei de Ampère, no sistema físico equivalente, verifica-se que o campo magnético em um determinado ponto de observação é o resultado da superposição dos campos magnéticos gerados pelas correntes reais (linha de transmissão) e pelas imagens. Assim, o campo total fica de acordo com as Equações (3.10) e (3.11), onde todas as grandezas presentes estão devidamente apresentadas na Figura 3.4.

$$\vec{H}_{\rm T} = \vec{H}_{\rm R} + \vec{H}_{\rm I} \tag{3.10},$$

$$\vec{H}_{T} = \frac{I}{2\pi\rho_{R}}\hat{a}_{\phi R} + \frac{I}{2\pi\rho_{I}}\hat{a}_{\phi I}$$
(3.11),

²⁷ Observe que no sistema físico equivalente a fonte de corrente imagem substitui o efeito do solo e, portanto, existe apenas um único meio infinito em todas as direções: o ar.

²⁸ Pode ser utilizada, também, uma corrente imagem saindo do plano do papel, pois, evidentemente, a corrente imagem deve ter mesma amplitude que a corrente real, porém sentido contrário. Esta é a representação adotada na Figura 3.4.
Com estas considerações, é possível estender a Equação (3.11) para o caso de uma linha de transmissão trifásica. A Figura 3.5 representa uma configuração desta natureza e suas respectivas imagens²⁹.

Percebe-se, assim, que o campo magnético é constituído por 6 componentes (3 devido às correntes reais nas fases A, B e C e 3 decorrentes das correntes imagens A', B' e C'). A Equação (3.12) ilustra o campo resultante.

$$\vec{H}_{T} = \sum_{i=1}^{3} \frac{l_{i}}{2\pi\rho_{R_{i}}} \hat{a}_{\phi R_{i}} + \sum_{i=1}^{3} \frac{l_{i}}{2\pi\rho_{R_{i}}} \hat{a}_{\phi A_{i}} \qquad (3.12),$$

$$\vec{H}_{T} = \sum_{i=1}^{3} \frac{l_{i}}{2\pi\rho_{R_{i}}} \hat{a}_{\phi A_{i}} + \sum_{i=1}^{3} \frac{l_{i}}{2\pi\rho_{R_{i}}} \hat{a}_{\phi A_{i}} \qquad (3.12),$$

$$\vec{H}_{A} = h_{B} = h_{C}$$

Figura 3.5: Método das Imagens para um sistema trifásico.

Nas considerações feitas nesta subseção o solo é modelado como um condutor elétrico perfeito. Assim, o campo magnético, gerado pelas correntes nos cabos fase, não penetra no solo. Tal consideração é, mesmo em baixas frequências, fisicamente inconsistente. Por conseguinte, na próxima subseção o efeito do solo com condutividade finita é incluído nas expressões de campo magnético. Tal inclusão é realizada por meio do conceito de plano de retorno complexo de A. Deri, [14]. Esta opção se deve, segundo [12], ao fato de que a modelagem desenvolvida por A. Deri e outros, [14], apresentar resultados muito semelhantes e bem simplificados se comparados a outros métodos existentes na literatura.

²⁹ A Figura 3.5 ilustra uma linha de configuração particular (horizontal, onde os condutores fase possuem a mesma altura). Contudo, isto não restringe a aplicação do Método das Imagens a linhas de configurações geométricas genéricas, como pode ser verificado pela Equação (3.12).

3.4.3.3 – Modelagem do efeito do solo: Método das Imagens complexas de A. Deri

As correntes elétricas dos condutores de uma determinada linha de transmissão geram campos magnéticos cuja distribuição espacial, além de ser modificada pela presença do solo, penetra no mesmo, [49]. Tal efeito deve ser incluído na modelagem eletromagnética, uma vez que deve ser conhecida a profundidade de penetração do campo magnético no solo. Uma das maneiras de se modelar este efeito é mediante a utilização do Método das Imagens Complexas, desenvolvido por A. Deri, [14]. Esse método consiste na concepção de um plano complexo de condutividade infinita de retorno de corrente, situado abaixo do solo, a uma distância igual à profundidade de penetração complexa "p", [49], [69] e [70].

A Equação (3.13) é a formulação proposta por A. Deri [14] para o cálculo da profundidade complexa p³⁰.

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0 (\sigma_s + j\omega\varepsilon_s)}}$$
(3.13),

onde:

• ω : Frequência angular, dada em $\left[\frac{rad}{s}\right]$.

• μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo, igual a $4\pi \times 10^{-7} \left| \frac{H}{m} \right|$.

- σ_s : Condutividade do solo, dada em $\left\lfloor \frac{S}{m} \right\rfloor$.
- ϵ_s : Permissividade elétrica do solo, dada em $\left\lfloor \frac{F}{m} \right\rfloor$.

Conforme já abordado anteriormente, uma das premissas da modelagem de cálculo do campo magnético, dada a baixa frequência de operação do sistema (60 Hz), é a desconsideração da densidade de corrente de deslocamento no solo. Assim sendo, a Equação (3.13) pode ser simplificada, sem perda de precisão, para a Equação (3.14).

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0 \sigma_s}} = \sqrt{\frac{\rho_s}{j\omega\mu_0}}$$
(3.14),

³⁰ No trabalho original de A. Deri a corrente de deslocamento no solo é desprezada. Assim sendo, a fórmula original proposta por A. Deri e outros, [14], é dada da seguinte maneira: $p = \frac{1}{\sqrt{j_{0} \mu_{0} \sigma_{s}}}$.

A Figura 3.6 mostra a aplicação do Método das Imagens Complexas de A. Deri [14] para um sistema generalizado monofásico. É importante observar que, neste caso, o plano de reflexão, que permite localizar a fonte de corrente imagem, corresponde ao plano complexo.



Figura 3.6: Método das Imagens Complexas de A. Deri para um sistema monofásico.

Com a metodologia de A. Deri verifica-se que a mudança na formulação final para o cálculo do campo magnético total se dá com a alteração somente das distâncias entre o ponto de observação e os pontos de fonte, devido à inclusão da profundidade complexa "p", [14]. Desta forma, a expressão do campo magnético é a apresentada na Equação (3.15).

$$\vec{H}_{T} = \sum_{i=1}^{3} \frac{\left|I_{i}\right| \angle \theta_{i}}{2\pi \left(\rho_{R_{i}}\right)^{2}} \left(h_{p} - h_{i}, 0, x_{i} - x_{p}\right) + \sum_{i=1}^{3} \frac{\left|I_{i}\right| \angle \theta_{i}}{2\pi \left(\rho_{I_{i}}\right)^{2}} \left(-h_{P} - h_{i} - 2p, 0, x_{p} - x_{i}\right)$$
(3.15),

onde: $|I_i| \in \theta_i$ correspondem, respectivamente, ao módulo e ângulo de fase das correntes em cada condutor do sistema sob análise; h_P é a altura (em relação ao solo) do ponto de observação (P) de campo magnético; h_i é a altura do i-ésimo condutor que transposta a i-ésima corrente; x_i e x_P são, respectivamente, as posições horizontais do i-ésimo condutor e do ponto de observação (tomadas em relação a alguma referência, onde x = 0); ρ_R , ρ_I , e ρ já foram definidos.

3.4.3.4 – Correntes nos cabos fase

Os sistemas de transmissão estudados nesta dissertação possuem configuração com sequência de fases ABC (tensão e corrente), ou seja, a fase A é a referência, enquanto as fases B e C são defasadas, respectivamente, de -120º e +120º da fase A. Evidentemente, todos os fasores possuem a mesma amplitude. A Figura 3.7 representa a sequência de fases ABC dos sistemas em questão.





A determinação das correntes nos cabos fase das linhas de transmissão é feita baseada nas informações de projeto. As referências [27], [28] e [29] apresentam, respectivamente, os detalhes de projeto dos Sistemas 1, 2 e 3 descritos no Capítulo 2. Partindo das informações de cada projeto, é obtido o valor de potência aparente máxima transmitida por cada linha de transmissão bem como sua tensão de operação. Assim, mediante a Equação (2.6), onde é calculado o valor da corrente, e posterior aplicação deste valor na Equação (2.7), ficam determinados os valores das correntes nos cabos fase da linha de transmissão.

3.4.3.5 – Inclusão das correntes induzidas nos cabos pararaios pelas correntes dos cabos fase

3.4.3.5.1 – Impedâncias próprias dos cabos fase e cabos para-raios

A impedância série de uma linha de transmissão é constituída por uma resistência e uma reatância (de natureza indutiva), a qual pode ser representada pela Equação (3.16) [1], [18], [31] e [71].

$$Z = R + jX \tag{3.16}.$$

Na Equação (3.16) R é a resistência da linha (resistência interna dos condutores, efeito pelicular, e contribuição do solo) e X é reatância indutiva $(X_L = j\omega L)$, onde a indutância L é composta pela parcela interna (efeito pelicular), pela parcela externa (determinada considerando o solo como um condutor elétrico perfeito) e pela parcela devido ao efeito do solo. Detalhes podem ser encontrados em [12]³¹.

A Equação (3.17) representa de maneira geral a impedância própria de um condutor de uma linha de transmissão.

$$Z_{ii} = R_{ii} + j\omega L_{ii}$$
(3.17),

sendo que as parcelas real e imaginária desta impedância podem ser separadas e ampliadas, para uma melhor caracterização. As Equações (3.18) e (3.19) representam, respectivamente, o detalhamento da parcela real (R_{ii}) e de parte da imaginária (L_{ii}).

$$R_{ii} = R_{int(i)} + R_{solo}$$
(3.18),

$$\mathsf{L}_{\mathsf{ii}} = \mathsf{L}_{\mathsf{int}(\mathsf{i})} + \mathsf{L}_{\mathsf{ext}(\mathsf{i})} + \mathsf{L}_{\mathsf{solo}} \tag{3.19},$$

onde, cada um dos parâmetros das Equações (3.18) e (3.19) são detalhados como a seguir:

R_{int(i)}: Resistência interna do condutor; valor de acordo com o tipo de condutor e retirado

da Tabela A.1 do Apêndice A da referência [31]. Dada em $\left\lceil \frac{\Omega}{m} \right\rceil$.

- R_{solo}: Resistência devida ao efeito do solo, cujo cálculo é detalhado em seguida, dada em [Ω/m].
- L_{int(i)}: Indutância interna do condutor; valor de acordo com o tipo de condutor e retirado da Tabela A.1 do Apêndice A da referência [31], dada em

 H
 m
- L_{ext(i)}: Indutância externa do condutor; é calculada com o auxílio da Equação (3.20), [31]

e [71], dada em $\left[\frac{H}{m}\right]$.

• L_{solo} : Indutância devida ao efeito do solo, cujo cálculo é detalhado em seguida, dada em $\left[\frac{H}{m}\right]$.

³¹ Como já comentado, a presente dissertação, por considerar apenas o acoplamento indutivo entre linha e duto, não contempla os efeitos dos parâmetros transversais da linha (efeitos condutivo e capacitivo). Uma aplicação da influência dos parâmetros transversais, por meio do acoplamento elétrico entre linhas e dutos, pode ser encontrada na referência [11].

A indutância externa total (incluindo a indutância externa $L_{ext(i)}$, a indutância do solo L_{solo} , e a resistência do solo R_{solo}) é dada pela Equação (3.20).

$$L_{extT(i)} = \frac{\mu_0}{2\pi} ln \left(\frac{2(h_i + p)}{r_i} \right)$$
(3.20)

Na Equação (3.20), que considera inclusive cabos com múltiplos condutores, tem-se:

- μ₀: Permeabilidade magnética do vácuo.
- h_i: Altura dos condutores em relação ao solo, dada em [m].
- p: Profundidade complexa de A. Deri, [14], dada em [m].
- r_i: Raio Médio Geométrico (RMG) para cabos com múltiplos condutores, dado em [m].

Portanto, unindo as Equações (3.18) e (3.19), tem-se a Equação (3.21), que representa a impedância própria de um condutor de uma linha de transmissão.

$$Z_{ii} = (R_{int(i)} + R_{solo}) + j\omega(L_{int(i)} + L_{ext(i)} + L_{solo})$$
(3.21).

É importante e oportuno ressaltar que a Equação (3.20) é composta de uma parte real e de uma parte imaginária. Assim, a Equação (3.22) traduz esta informação.

$$L_{extT(i)} = \frac{\mu_0}{2\pi} ln \left(\frac{2(h_i + p)}{r_i} \right) = Re\{L_{extT(i)}\} - j lm\{L_{extT(i)}\}$$
(3.22).

Por fim, agrupam-se as Equações (3.17), (3.21) e (3.22), o que gera as Equações (3.23) e (3.24) da seguinte maneira³²:

$$j\omega L_{extT(i)} = j\omega [Re\{L_{extT(i)}\} - jIm\{L_{extT(i)}\}]$$
(3.23),

$$j\omega L_{extT(i)} = \omega Im\{L_{extT(i)}\} + j\omega Re\{L_{extT(i)}\}$$
(3.24)

A Equação (3.24) representa a equação final, onde é considerável deixar claro que³³:

- ωlm{ L_{extT(i)}}: Resistência do solo (R_{solo}).
- Re{L_{extT(i)}}: Indutância externa somada à indutância do solo (L_{ext(i)} + L_{solo})³⁴.

³⁴ Fica evidente que $Z_{ii} = R_{ii} + j\omega L_{ii} = (R_{int(i)} + R_{solo}) + j\omega (L_{int(i)} + L_{ext(i)} + L_{solo})$ e assim pode-se determinar que: $R_{int(i)} + j\omega (L_{extT(i)} + L_{int(i)}) = [R_{int(i)} + \omega Im (L_{extT(i)})] + j\omega [L_{int(i)} + Re (L_{extT(i)})]$, onde: $Re(L_{extT(i)}) = L_{ext(i)} + L_{solo}$.

³² É interessante notar que a parte imaginária da Equação (3.23) sempre é negativa, pois a resistência é um parâmetro de valor positivo.

³³ Vale destacar que a Equação (3.20) quando simplificada com p = 0, caso de solo ideal (condutor elétrico perfeito), direciona, naturalmente, à inexistência de contribuição do solo na resistência e indutância da linha.

As equações desta seção devem ser aplicadas tanto para os cabos fase, quanto para os cabos para-raios, de uma determinada linha de transmissão, com o objetivo de se determinar os parâmetros longitudinais próprios. Como exemplos ilustrativos, considere as Figuras 3.8 e 3.9, onde a Figura 3.8 ilustra uma linha de transmissão trifásica com seus cabos fase e cabos para-raios, enquanto a Figura 3.9 o sistema trifásico modelado com o plano complexo de A. Deri, [14].



Figura 3.8: Linha de transmissão trifásica com dois cabos para-raios (D e E).



Figura 3.9: Linha de transmissão trifásica com dois cabos para-raios e suas imagens no plano complexo de A. Deri, [14].

3.4.3.5.2 – Impedâncias mútuas entre cabos fase e cabos para-raios

Linhas de transmissão operando em regime permanente apresentam, além das impedâncias próprias dos cabos fase e cabos para-raios, impedâncias mútuas entre os mesmos, à qual varia em função da geometria do circuito instalado na linha de transmissão, [1].

A impedância mútua em uma linha de transmissão se deve ao fato de existir um acoplamento magnético entre seus cabos fase e cabos para-raios. Este acoplamento magnético tem como efeito tensões que são induzidas em determinado condutor devido à corrente elétrica variável no tempo em outro condutor. A relação entre a tensão induzida e a corrente elétrica é a impedância mútua entre os condutores em questão. A Figura 3.10 representa, de forma esquemática, este processo físico, onde evidentemente há influência significativa do solo. Percebe-se, claramente, que o campo magnético (ou fluxo magnético) gerado pela corrente I_i enlaça o circuito do condutor que possui corrente I_j. Desta forma, a variação temporal deste campo magnético, ao atravessar a superfície formada pelo condutor j e o solo, induz uma tensão neste circuito. Esta tensão dividida por I_i é a impedância mútua entre os condutores i e j³⁵.



Figura 3.10: Sistema físico real para impedâncias mútuas.

Diante do exposto anteriormente, é possível aplicar estes conceitos para o cálculo das impedâncias mútuas entre cabos fase e cabos para-raios em linhas de transmissão de configurações geométricas genéricas. A Figura 3.11 ilustra dois condutores, i e j, e suas respectivas imagens complexas, que auxilia na determinação das impedâncias mútuas.

³⁵ Devido ao Teorema da Reciprocidade, a impedância mútua entre i e j é exatamente a mesma entre j e i, ou seja, $Z_{ij} = Z_{ji}$.



Figura 3.11: Sistema físico equivalente para impedâncias mútuas.

Inicialmente as Equações (3.25) e (3.26), mediante a geometria da Figura 3.11, fornecem as distâncias entre os elementos envolvidos no cálculo da impedância mútua.

$$d_{ij} = \sqrt{(\Delta x_{ij})^2 + (h_i - h_j)^2}$$
(3.25),

$$\mathsf{D}_{ij} = \sqrt{(\Delta x_{ij})^2 + (\mathsf{h}_i + \mathsf{h}_j + 2\mathsf{p})^2}$$
(3.26),

onde h_i e h_j são as alturas dos condutores, p é a profundidade complexa e Δx_{ij} é a distância horizontal entre os condutores i e j.

A impedância mútua em questão $(Z_{ij} = j\omega L_{ijT})$ é calculada com base na Equação (3.27), [12] e [72]³⁶:

$$L_{ijT} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \right) = \text{Re}\{L_{ijT}\} - j \text{Im}\{L_{ijT}\}$$
(3.27).

³⁶ Da mesma forma que no caso da indutância própria, a parte imaginária da Equação (3.29) sempre é negativa, tendo em vista que o parâmetro resistência mútua é positivo.

E finalizando, a Equação (3.28) indica os valores da impedância mútua, os quais podem ser separados em resistência mútua devido ao efeito do solo e indutância mútua entre os condutores³⁷.

$$Z_{ij} = \omega \ln\{L_{ijT}\} + j\omega \operatorname{Re}\{L_{ijT}\}$$
(3.28).

Assim, partindo da Equação (3.28) e separando a parte real e imaginária da impedância mútua tem-se, [12] e [72]:

- ωIm{ L_{iiT}} = R_{solo} : Resistência mútua entre os condutores i e j devido ao efeito do solo.
- jωRe{L_{ijT}} = j X_{ij} = jωL_{ij} : Impedância indutiva mútua entre os condutores i e j, com a inclusão do efeito do solo.

Calculados todos esses parâmetros (próprios e mútuos), calcula-se na subseção seguinte as correntes induzidas pelas correntes dos cabos fase no(s) cabo(s) para-raios.

3.4.3.5.3 – Cálculo das correntes nos cabos para-raios

O método utilizado para análise e cálculo das correntes nos cabos para-raios, induzidas pelas correntes dos cabos fase (variáveis no tempo), é por meio da Lei de Kirchhoff das tensões. A Figura 3.12 representa o sistema trifásico, com dois cabos para-raios, suas correntes, impedâncias próprias e impedância mútuas.



Figura 3.12: Impedância e correntes de uma linha de transmissão trifásica com dois cabos para-raios.

³⁷ Neste ponto, deve-se ter cuidado para não confundir j de condutor com j de unidade imaginária.

O equacionamento é feito aplicando-se a Lei de Kirchhoff das tensões para cada malha do sistema; assim, o conjunto de relações ilustrado na Equação (3.29) representa o resultado da aplicação em causa.

$$\begin{array}{rclcrcrcrcrcrc} V_{A} - V_{A}^{'} &=& Z_{AA}I_{A}^{'} &+& Z_{AB}I_{B}^{'} &+& Z_{AC}I_{C}^{'} &+& Z_{AD}I_{D}^{'} &+& Z_{AE}I_{E}^{'} \\ V_{B} - V_{B}^{'} &=& Z_{BA}I_{A}^{'} &+& Z_{BB}I_{B}^{'} &+& Z_{BC}I_{C}^{'} &+& Z_{BD}I_{D}^{'} &+& Z_{BE}I_{E}^{'} \\ V_{C} - V_{C}^{'} &=& Z_{CA}I_{A}^{'} &+& Z_{CB}I_{B}^{'} &+& Z_{CC}I_{C}^{'} &+& Z_{CD}I_{D}^{'} &+& Z_{CE}I_{E}^{'} \\ V_{D} - V_{D}^{'} &=& Z_{DA}I_{A}^{'} &+& Z_{DB}I_{B}^{'} &+& Z_{DC}I_{C}^{'} &+& Z_{DD}I_{D}^{'} &+& Z_{DE}I_{E}^{'} \\ V_{E} - V_{E}^{'} &=& Z_{EA}I_{A}^{'} &+& Z_{EB}I_{B}^{'} &+& Z_{EC}I_{C}^{'} &+& Z_{ED}I_{D}^{'} &+& Z_{EE}I_{E}^{'} \end{array}$$

$$(3.29)$$

Partindo do conjunto de Equações (3.29) é pertinente reescrevê-lo na forma matricial e posteriormente separá-lo em submatrizes, [24], [72] e [73]:

$$\begin{bmatrix} V_{A} - V'_{A} \\ V_{B} - V'_{B} \\ V_{C} - V'_{C} \end{bmatrix}_{V_{FN}} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} & Z_{AC} \\ Z_{BA} & Z_{BB} & Z_{BC} \\ Z_{CA} & Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix}_{Z_{F--F}} \begin{bmatrix} Z_{AD} & Z_{AE} \\ Z_{BD} & Z_{BE} \\ Z_{CD} & Z_{CE} \end{bmatrix}_{Z_{F--PR}} \begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{C} \end{bmatrix}_{I_{F}} \end{bmatrix}$$
(3.30).

Reduzindo o sistema matricial anterior em um sistema de submatrizes tem-se a seguinte formulação também matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{FN} \\ V_{PR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{F--F} & Z_{F--PR} \\ Z_{PR-F} & Z_{PR-PR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_F \\ I_{PR} \end{bmatrix}$$
(3.31).

Os sistemas de submatrizes de impedâncias próprias e impedâncias mútuas podem ser escritos de acordo com as Equações (3.32) e (3.33).

$$[V_{FN}] = [Z_{F--F}][I_F] + [Z_{F--PR}][I_{PR}]$$
(3.32),

$$[V_{PR}] = [Z_{PR-F}][I_F] + [Z_{PR-PR}][I_{PR}]$$
(3.33).

Admitindo um sistema em regime permanente, objeto de estudo desta dissertação, e continuamente aterrado, mencionado nas premissas desta dissertação, a tensão nos cabos para-raios é nula, ou seja, V_{PR} = 0.

Então, igualando a Equação (3.33) a zero, tem-se a Equação (3.34) e, finalmente, a Equação (3.35), que fornece o valor das correntes nos cabos para-raios.

$$\left[\mathsf{Z}_{\mathsf{P}\mathsf{R}-\mathsf{P}\mathsf{R}}\right]\left[\mathsf{I}_{\mathsf{P}\mathsf{R}}\right] = \left[-\mathsf{Z}_{\mathsf{P}\mathsf{R}-\mathsf{F}}\right]\left[\mathsf{I}_{\mathsf{F}}\right] \tag{3.34},$$

e assim:

$$[I_{PR}] = [-Z_{PR-PR}]^{-1} . [Z_{PR-F}][I_{F}]$$
(3.35).

Finalmente, calculadas todas as correntes do sistema em análise (cabos fases e para-raios), na próxima seção é realizado o cálculo dos valores totais $\vec{H} \in \vec{B}$ mediante três

métodos, a saber: "Método Aproximado", Método no Domínio do Tempo e Método das Elipses.

3.4.3.6 – Equações finais para cálculo de $(\vec{H}) e (\vec{B})$

3.4.3.6.1 – Introdução

O campo magnético \vec{H} e a densidade de fluxo magnético \vec{B} , gerados pelas correntes nos condutores de linhas de transmissão monofásicas e trifásicas, em regime permanente, podem ser expressos no domínio do tempo ou no domínio fasorial. Admitindo o sistema como linear, a frequência do campo magnético é a mesma de todas as correntes nos condutores, ou seja, 60 Hz. Para representar tal grandeza no domínio do tempo e no domínio fasorial, três parâmetros são necessários: frequência, amplitude e defasagem angular. Tais grandezas se diferenciam de maneira que no domínio do tempo, os componentes de \vec{H} são funções cossenoidais vetoriais, e no domínio fasorial, são fasoresvetores.

É oportuno determinar que a Equação (3.36) relaciona diretamente \vec{H} e \vec{B} da seguinte maneira:

$$\vec{\mathsf{B}} = \mu_0 \vec{\mathsf{H}} \tag{3.36},$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo e \vec{B} tem sua definição como sendo a força magnética por unidade de elemento de corrente, [67] e [68]³⁸.

O sistema da Figura 3.13, composto por uma linha de transmissão trifásica com configuração generalizada horizontal, constituída por dois cabos para-raios e com a influência do solo modelada pelo método das imagens complexas, é tomado como base para a formulação geral de cálculo do campo magnético. As formulações apresentadas podem ser particularizadas para configurações específicas de determinadas linhas de transmissão.

 $^{^{38}}$ Ademais, as normas técnicas estabelecem valores limites de $\vec{B}\,$ e não de $\vec{H}\,.$



Figura 3.13: Método das Imagens aplicado ao sistema trifásico com dois cabos para-raios.

Por conseguinte, a Figura 3.14 mostra a influência de cada cabo fase e para-raios para o cálculo do campo magnético em um ponto genérico P.

Aplica-se a Lei de Ampère para o cálculo do campo magnético total no ponto P. Assim, cada condutor (com sua corrente e sua respectiva imagem complexa) contribui com duas parcelas de campo magnético, como ilustrado na Equação (3.37).

$$\vec{H}_{T_{i}} = \frac{I_{i}}{2\pi\rho_{R_{i}}} \hat{a}_{\phi R_{i}} + \frac{I_{i}}{2\pi\rho_{I_{i}}} \hat{a}_{\phi I_{i}}$$
(3.37),

 $\text{onde} \ \ \hat{a}_{\phi R_i} = \hat{a}_{L_i} \times \hat{a}_{\rho R_i} \,, \ \ \hat{a}_{\phi l_i} = \hat{a}_{L_i} \times \hat{a}_{\rho l_i} \,.$

Pela Figura 3.14 definem-se os valores de ρ_{R_i} e ρ_{I_i} ; assim, consequentemente, os seus respectivos vetores unitários $\hat{a}_{\rho R_i}$ e $\hat{a}_{\rho I_i}$ conforme Equações (3.38) a (3.43).

$$\overrightarrow{\rho_{\mathsf{R}_i}} = \left\{ (\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_i), 0, (\mathbf{h}_p - \mathbf{h}_i) \right\}$$
(3.38),

$$\rho_{\mathsf{R}_{i}} = \sqrt{(\mathsf{x}_{\mathsf{p}} - \mathsf{x}_{i})^{2} + (\mathsf{h}_{\mathsf{p}} - \mathsf{h}_{i})^{2}} \tag{3.39},$$

$$\hat{a}_{\rho R_{i}} = \frac{\left\{ (x_{p} - x_{i}), 0, (h_{p} - h_{i}) \right\}}{\rho_{R_{i}}}$$
(3.40),

$$\vec{\rho}_{l_i} = \left\{ (x_p - x_i), 0, (h_p + h_i + 2p) \right\}$$
(3.41),

$$\rho_{l_i} = \sqrt{(x_p - x_i)^2 + (h_p + h_i + 2p)^2}$$
(3.42),

$$\hat{a}_{\rho l_{i}} = \frac{\left\{ (x_{p} - x_{i}), 0, (h_{p} + h_{i} + 2p) \right\}}{\rho_{l_{i}}}$$
(3.43),

onde $\overrightarrow{\rho_{R_i}}$ e $\overrightarrow{\rho_{l_i}}$ são, respectivamente, os vetores que apontam do elemento de corrente real e imagem para o ponto de observação do campo magnético; ρ_{R_i} e ρ_{l_i} são os módulos dos vetores mencionados anteriormente; $\hat{a}_{\rho R_i}$ e $\hat{a}_{\rho l_i}$ são os vetores unitários real e imagem dos elementos de corrente, respectivamente; x_p , x_i , h_p e h_i são respectivamente a posição x do ponto de observação, a posição x do elemento de corrente, altura do ponto de observação e altura do elemento de corrente.



Figura 3.14: Campo magnético no ponto P por um sistema trifásico com dois cabos para-raios.

A Equação (3.44) representa a formulação do campo magnético para um determinado ponto de observação com altura (h_p), onde a mesma é feita pela composição dos dados das Equações (3.38) a (3.43) aplicados à Equação (3.37).

$$\vec{H}_{T_{i}} = \frac{|I_{i}| \angle \theta_{i}}{2\pi} \left[\frac{(h_{p} - h_{i}, 0, x_{i} - x_{p})}{[(x_{p} - x_{i})^{2} + (h_{p} - h_{i})^{2}]} \right] + \frac{|I_{i}| \angle \theta_{i}}{2\pi} \left[\frac{(-h_{p} - h_{i} - 2p, 0, x_{p} - x_{i})}{[(x_{p} - x_{i})^{2} + (h_{p} + h_{i} + 2p)^{2}]} \right]$$
(3.44).

A formulação final completa do campo magnético corresponde à Equação (3.44) aplicada para cada condutor que compõe o sistema trifásico (correntes nos cabos fase e para-raios e respectivas imagens complexas) e, em seguida, realizando o somatório de todas as parcelas para cálculo do campo magnético no ponto P, conforme expressa na Equação (3.45).

$$\vec{H}_{T} = \sum_{i=1}^{5} \frac{|l_{i}| \angle \theta_{i}}{2\pi} \left[\frac{(h_{p} - h_{i}, 0, x_{i} - x_{p})}{[(x_{p} - x_{i})^{2} + (h_{p} - h_{i})^{2}]} \right] + \sum_{i=1}^{5} \frac{|l_{i}| \angle \theta_{i}}{2\pi} \left[\frac{(-h_{p} - h_{i} - 2p, 0, x_{p} - x_{i})}{[(x_{p} - x_{i})^{2} + (h_{p} + h_{i} + 2p)^{2}]} \right]$$
(3.45).

Para determinar o valor de B_T, aplica-se a Equação (3.36).

3.4.3.6.2 – "Método Aproximado"

A nomenclatura "Método Aproximado" deve-se ao fato de, ao calcular o campo magnético total (ou resultante) em um determinado ponto, no caso, tal método leva em consideração apenas os módulos finais dos componentes x e z de \vec{H} e \vec{B} .

A modelagem do solo pelo plano complexo de A. Deri resulta em valores adicionais de \vec{H} e \vec{B} de modo complexo (além dos associados aos fasores de corrente), possuindo, assim, uma parte real e uma parte imaginária para os componentes ao longo dos eixos x e z, representados nas Equações (3.46) e (3.47).

$$\vec{H}_{TX} = [H_{TRX} + jH_{TIX}]\hat{a}_x = H_X \angle \theta_X \hat{a}_x$$
(3.46),

$$\vec{H}_{TZ} = [H_{TRZ} + jH_{TIZ}]\hat{a}_z = H_Z \angle \theta_Z \hat{a}_z$$
(3.47),

onde:

- H_{TRX} + jH_{TIX}: Campo magnético gerado pelas correntes (reais e imagens) ao longo do eixo x.
- H_{TRZ} + jH_{TIZ} : Campo magnético gerado pelas correntes (reais e imagens) ao longo do eixo z.

•
$$H_X = \sqrt{(H_{TRX})^2 + (H_{TIX})^2}$$
.

• $H_Z = \sqrt{\left(H_{TRZ}\right)^2 + \left(H_{TIZ}\right)^2}$.

• $\theta_{X} = \tan^{-1} \left(\frac{H_{TIX}}{H_{TRX}} \right).$

•
$$\theta_{Z} = \tan^{-1} \left(\frac{H_{TIZ}}{H_{TRZ}} \right).$$

Determinam-se, então, os módulos dos componentes totais referentes aos eixos x e z, o que gera as Equações (3.48) e (3.49).

$$H_{TXMAX} = \sqrt{(H_{TRX})^2 + (H_{TIX})^2}$$
 (3.48),

$$H_{TZMAX} = \sqrt{(H_{TRZ})^2 + (H_{TIZ})^2}$$
 (3.49).

As Equações (3.50) e (3.51) permitem o cálculo dos campos \vec{H} e \vec{B} resultantes. Estas equações definem o que é denominado nesta dissertação "Método Aproximado".

$$H_{TMAX} = \sqrt{(H_{TXMAX})^2 + (H_{TZMAX})^2}$$
(3.50),

$$\mathsf{B}_{\mathsf{TMAX}} = \mu_0 \,\mathsf{H}_{\mathsf{TMAX}} \tag{3.51}$$

3.4.3.6.3 – Método no Domínio do Tempo

O método no domínio do tempo consiste em transformar as grandezas antes fasoriais para grandezas no domínio do tempo, de acordo com a Equação (3.52).

$$\vec{H} = H_x(t) \hat{a}_x + H_z(t) \hat{a}_z$$
 (3.52).

Na Equação (3.52), $\hat{a}_x e \hat{a}_z$ são os vetores unitários ao longo dos eixos x e z, respectivamente, $H_X(t) = H_X \cos(\omega t + \theta_X)$ e $H_Z(t) = H_Z \cos(\omega t + \theta_Z)$ são os componentes cossenoidais do campo magnético no tempo. As grandezas H_X , θ_X , $H_Z e \theta_Z$ são definidas nas Equações (3.46) e (3.47).

Por fim, as Equações (3.53) e (3.54) permitem o cálculo dos campos $\vec{H} \in \vec{B}$ totais por meio do "Método no Domínio do Tempo".

$$H(t)_{TMAX} = \sqrt{[H_X(t)]^2 + [H_Z(t)]^2}$$
(3.53),

 $B(t)_{TMAX} = \mu_0 H(t)_{TMAX}$

3.4.3.6.4 – Método das Elipses

Analisando a Equação (3.52) verifica-se que o vetor campo magnético possui uma polarização elíptica, [24], [68]. Desta forma, a ponta do vetor campo magnético descreve, a

(3.54).

cada ciclo da função cossenoidal³⁹, uma elipse, em cada ponto do espaço. De acordo com [11] e [24], o semieixo maior desta elipse resulta no maior valor do campo magnético resultante (H_{TMAX}). Desta maneira, é viável calcular H_{TMAX} em cada ponto de interesse no espaço. A Figura 3.15 representa uma elipse em um ponto qualquer do espaço. Esta forma de calcular H_{TMAX} é denominada "Método das Elipses", cujos detalhes são descritos a seguir.



Figura 3.15: Representação da polarização elíptica do campo magnético para um ponto no espaço.

O primeiro passo é determinar o componente do campo magnético ao longo de uma direção definida por um ângulo entre o eixo horizontal (x) e o campo magnético total. Este ângulo, conforme Figura 3.15, é denominado α e o componente de seu campo magnético é H_a.

Segundo [11], [18] e [24], o módulo do campo magnético H_{α} é determinado pela Equação (3.55).

$$(\mathsf{H}_{\alpha})^{2} = (\mathsf{H}_{\mathsf{REALZ}}\mathsf{sen}(\alpha) + \mathsf{H}_{\mathsf{REALX}}\cos(\alpha))^{2} + (\mathsf{H}_{\mathsf{IMAGZ}}\operatorname{sen}(\alpha) + \mathsf{H}_{\mathsf{IMAGX}}\cos(\alpha))^{2}$$
(3.55), onde:

- H_{REALX} : Parte real do fasor campo magnético em x, $H_X \cos(\theta_x)$.
- H_{REALZ} : Parte real do fasor campo magnético em z, $H_z \cos(\theta_z)$.
- H_{IMAGX} : Parte imaginária do fasor campo magnético em x, H_{X} sen (θ_{X}) .
- H_{IMAGZ} : Parte imaginária do fasor campo magnético em z, $H_z sen(\theta_z)$.

Para que sejam determinados os ângulos α que correspondem aos valores máximo e mínimo do campo magnético, deriva-se a Equação (3.55), em relação à α igualando o resultado a zero. A Equação (3.56) mostra este passo, [24].

³⁹ Com período igual a $T = \frac{1}{f}$.

$$\frac{\mathsf{d}(\mathsf{H}_{\alpha})^2}{\mathsf{d}\alpha} = 0 \tag{3.56}.$$

Em seguida, mediante manipulações matemáticas, resulta-se na Equação (3.57), na forma de uma equação quadrática, cuja variável desconhecida é tan(α), [11], [18] e [24].

$$\tan^{2}(\alpha)(H_{REALZ}H_{REALX} + H_{IMAGZ}H_{IMAGX}) + \tan(\alpha)((-H_{IMAGZ})^{2} + (H_{IMAGX})^{2} - (H_{REALZ})^{2} - (H_{REALZ}H_{REALX} + H_{IMAGZ}H_{IMAGX}) = 0$$
(3.57).

O resultado da Equação (3.57) corresponde aos ângulos $\alpha_1 e \alpha_2$ os quais determinam os semieixos maior e menor da elipse. Os módulos dos semi-eixos são determinados substituindo-se $\alpha_1 e \alpha_2$ na Equação (3.55) e, assim, verificam-se o maior e menor valor dos semieixos.

Para finalizar, é importante comentar que as normas técnicas indicam o cálculo do campo magnético resultante por meio do "Método Aproximado", [70]. Por este motivo, nesta dissertação, este é o método utilizado para a obtenção dos resultados ilustrados no Capítulo 4.

3.4.4 – Tensão e corrente induzidas nos dutos

3.4.4.1 – Lei da indução magnética de Faraday

A presente dissertação tem como objetivo, além de calcular valores de campos magnéticos em um perfil transversal da linha de transmissão em análise, determinar os valores de tensão e corrente induzidas nos dutos que estejam na posição de paralelismo com a linha de transmissão. Tais cálculos são realizados mediante a Lei da Indução Magnética de Faraday⁴⁰.

Inicialmente, é importante referenciar que Faraday resolve investigar a possibilidade de um campo magnético produzir eletricidade em função da descoberta experimental de Oersted⁴¹, na qual uma corrente contínua produz um campo magnético.

Por meio de seus experimentos, Faraday verifica que um campo estático não produz um fluxo de corrente, mas um campo magnético que varia no tempo gera uma tensão induzida, força eletromotriz ou fem, em um circuito fechado que causa assim um fluxo de corrente no mesmo, [67], [68] e [74].

⁴⁰ Michael Faraday (1791-1867), químico e físico inglês, conhecido por seus experimentos pioneiros em eletricidade e magnetismo. Muitos o consideram o maior cientista experimental de todos os tempos.

⁴¹ Hans Christian Oersted (1777-1851), químico e físico dinamarquês, descobriu que as correntes elétricas podem criar campos magnéticos. Conhecido como o "Pai do Eletromagnetismo".

As linhas de campo indicam a direção do campo em cada ponto do espaço e, assim, o fluxo de campo sobre uma superfície aberta é diretamente proporcional ao número de linhas que cruzam esta superfície, conforme Equação (3.58).

$$\Psi = \int_{S} \vec{B} \cdot \vec{dS}$$
(3.58).

A fem induzida, ou V_{fem} , (medida em volts [V]), em qualquer circuito fechado, é igual à taxa de variação temporal do fluxo magnético que enlaça este circuito. A Equação (3.59) representa este postulado de Faraday.

$$V_{fem} = -\frac{d\psi}{dt}$$
(3.59),

onde ψ é o fluxo magnético que enlaça o circuito (dado em weber [wb]) e o sinal de negativo representa os resultados obtidos por Lenz, correspondendo assim à Lei de Lenz⁴².

É possível reescrever a Equação (3.59) em temos de $\vec{E} e \vec{B}$, onde ψ é substituído por $\int_{\Omega} \vec{B} \cdot d\vec{S}$, o que resulta na Equação (3.60)⁴³.

$$V_{fem} = \oint_{C} \vec{E} \bullet \vec{d\ell} = -\frac{d}{dt} \int_{S} \vec{B} \bullet \vec{dS}$$
(3.60).

Os objetos de estudo desta dissertação são as linhas de transmissão operando em regime permanente; logo, as correntes variáveis no tempo são as responsáveis por produzir uma densidade de fluxo magnético \vec{B} variável no tempo. Já o duto metálico corresponde a uma espira estacionária (circuito) que fica imersa nesta densidade de fluxo magnético, caracterizando uma "fem de transformador", resultando na Equação (3.61), que corresponde a um caso particular da Equação (3.60).

$$V_{fem} = \oint_{C} \vec{E} \bullet \vec{d\ell} = -\int_{S} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \bullet \vec{dS}$$
(3.61).

Percebe-se, facilmente, que com o conhecimento do campo magnético, produzido pelas correntes do sistema de transmissão (subseções anteriores), e da geometria do duto, é possível determinar a tensão induzida no duto com o auxílio da Equação (3.61)⁴⁴.

⁴² Heinrich Friederich Emil Lenz (1804-1865), professor de física russo. A Lei de Lenz afirma que o sentido de fluxo da corrente induzida no circuito é de tal maneira que o campo magnético produzido pela corrente induzida se opõe ao campo magnético original, cuja variação no tempo gerou a corrente induzida, [67] e [68].

⁴³ O campo elétrico é induzido pela variação do campo magnético no tempo (evidentemente, este campo magnético é o gerado pelas correntes no sistema de transmissão). Naturalmente, em termos de aplicação nesta dissertação, o circuito onde o campo elétrico é induzido e, consequentemente, a tensão e corrente induzidas, corresponde ao duto metálico paralelo à linha.

3.4.4.2 – Tensão induzida no duto e tensão do duto

A tensão induzida nos dutos é calculada nos casos onde existe um paralelismo entre a linha de transmissão e o duto metálico aéreo, fato já devidamente explicitado nesta dissertação como sendo o objeto de estudo da mesma. Essas regiões onde existe o paralelismo ou cruzamento entre uma linha de transmissão e um duto metálico são chamadas de zonas de influência. A Figura 3.16 ilustra essa situação.



Figura 3.16: Zona de influência da linha de transmissão no duto. Adaptado de [56].

A expressão matemática que define a tensão induzida no duto, como comentado na subseção anterior, pode ser obtida a partir da Equação (3.61). Na referência [49] estão detalhados todos os passos matemáticos envolvidos na dedução da Equação (3.62) a qual ilustra a tensão induzida no duto.

$$V_{fem} = -j \ f \ \mu_0 \ L_D \ \sum_{i=1}^{NTC} \left| I_i \right| \angle \theta_i \ In \left[\frac{\sqrt{(h_i + h_P + 2p)^2 + (x_p - x_i)^2}}{\sqrt{(h_i - h_P)^2 + (x_p - x_i)^2}} \right]$$
(3.62),

onde: j é a unidade imaginária (j = $[-1]^{1/2}$), f é a frequência (60 Hz), L_D é o comprimento do duto e NTC é o número total de condutores (cabos fase, cabos para-raios e suas respectivas imagens)⁴⁵.

 44 A V_{fem} também pode ser calculada com o auxílio do vetor potencial magnético $\left(\overrightarrow{A} \right)$ da seguinte forma: $V_{\text{fem}} = \oint_{C} \vec{E} \cdot \vec{d\ell} = -\int_{S} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{dS} = -\oint_{C} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \cdot \vec{d\ell}$. Para linhas de correntes filamentares (I_i), com fluxo ordenado de cargas elétricas na direção e sentido definido por \hat{a}_L , com dL sendo o elemento diferencial de comprimento, tem-se: $\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_r \frac{1}{r} dL \hat{a}_L$, sendo "r" a distância entre a fonte e o ponto

onde (\vec{A}) é calculado. Para detalhes, vide referência [49]. ⁴⁵ Neste caso, h_p (altura do ponto de observação) corresponde à altura do duto (h_D) e x_p à posição horizontal do duto em relação à alguma referência.

A tensão induzida no duto corresponde a uma grandeza longitudinal, fruto da natureza física do acoplamento magnético. Contudo, em termos práticos a grandeza física que pode solicitar o duto (inclusive de forma danosa) é a tensão transversal entre duto e solo, obtida a partir da tensão induzida no duto, de sua impedância longitudinal (*Z*) e de sua admitância transversal (Y), [56] e [75]. Esta tensão transversal é denominada simplesmente como "tensão do duto" (V_D).

Inicialmente, é necessário representar o trajeto em paralelismo da linha de transmissão com o duto metálico mediante um circuito equivalente (a parâmetros distribuídos), o qual é representado pela Figura 3.17⁴⁶, [56].





As Equações (3.63) e (3.64) descrevem as relações das distribuições espaciais dos fasores de tensões e correntes ao longo do duto, [56], denominadas equações das ondas de tensão e de corrente (ou equações telegráficas)⁴⁷.

$$\frac{dV_{D}(y)}{dy} + ZI(y) - V_{fem}(y) = 0$$
(3.63),

$$\frac{\mathrm{dI}(\mathbf{y})}{\mathrm{d}\mathbf{y}} + \mathbf{Y}\mathbf{V}_{\mathrm{D}}(\mathbf{y}) = \mathbf{0}$$
(3.64),

onde, [56]:

- Z: Impedância longitudinal do duto por unidade de comprimento, dada em $\left|\frac{\Omega}{m}\right|$.
- Y: Admitância transversal do duto por unidade de comprimento, dada em $\left| \frac{1}{\Omega . m} \right|$
- V_{fem} : Tensão induzida no duto, dada em $\left|\frac{V}{m}\right|$.

 ⁴⁶ A Figura 3.17 representa apenas o circuito equivalente de um comprimento infinitesimal dy do duto.
 ⁴⁷ As deduções destas equações são amplamente divulgadas na literatura, [56], [67] e [68].

- V_D(y): Tensão transversal no duto, dada em [V].
- I(y): Corrente induzida ao longo do duto no eixo y, dada em [A].

As formulações para os cálculos de Z e Y são apresentadas na subseção a seguir.

As Equações (3.63) e (3.64) são acopladas. Para o cálculo de $V_D(y)$ e I(y) é necessário proceder ao desacoplamento entre ambas. Este processo de desacoplamento é amplamente divulgado na literatura, [12], [67], [68]. A Equação (3.65) corresponde à equação de onda de $V_D(y)$ desacoplada.

$$\frac{d^2 V_D(y)}{dy^2} - \gamma^2 V_D(y) - \frac{d}{dy} \left[V_{fem}(y) \right] = 0$$
(3.65),

onde $\gamma = \sqrt{ZY}$ é denominada constante de propagação⁴⁸.

No Capítulo 4 são apresentadas soluções da Equação (3.65) para três situações práticas de posicionamento do duto em relação à linha de transmissão.

3.4.4.3 – Impedância e admitância dos dutos

De acordo com [56] os parâmetros Z e Y do duto são determinadas pelas Equações (3.66), (3.67) e (3.68) descritas a seguir.

$$Z = Z_{int} + \frac{\omega\mu_0}{8} + j\frac{\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{3.7\sqrt{\rho_s\mu_0^{-1}\omega^{-1}}}{D}\right)$$
(3.66),
$$Z_{int} = \frac{\sqrt{\rho_p\mu_0\mu_r\omega}}{\pi D\sqrt{2}} (1+j)$$
(3.67),

onde:

- Z_{int} : Impedância interna do duto, dada em $\left|\frac{\Omega}{m}\right|$.
- ω : Frequência angular, dada em $\left| \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right|$.
- μ₀ : Permeabilidade magnética do vácuo.
- μ_r : Permeabilidade magnética relativa do duto.
- ρ_s : Resistividade do solo. Dada em [Ω m].

⁴⁸ Sua parte real corresponde à constante de atenuação, enquanto a imaginária à constante de defasamento (domínio fasorial). No domínio do tempo, a constante de defasamento tem como efeito a distorção das ondas de tensão e de corrente, ao passo que a constante de atenuação apresenta o mesmo efeito, tanto no domínio do tempo quanto no fasorial, qual seja: redução da amplitude de tensão e corrente à medida que estas ondas se propagam.

- ρ_p: Resistividade do duto. Dada em [Ωm].
- D: Diâmetro do duto. Dado em [m].

$$Y = j\omega \left(\frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \left(\frac{h_p + \sqrt{h_p^2 + a^2}}{a} \right)} \right)$$
(3.68),

onde:

- ε₀: Permissividade elétrica do vácuo.
- h_p: Altura do centro do duto em relação ao solo, dada em [m].
- a: Raio do duto, dado em [m].

3.4.4.4 – Corrente induzida nos dutos e em corpos em contato com os mesmos

O estudo do acoplamento magnético entre uma linha de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos, leva ao cálculo das tensões e correntes induzidas conforme já demonstrado nas subseções anteriores. Aspectos de segurança pessoal são de grande relevância no que tange o estudo das interferências eletromagnéticas, pois uma pessoa em contato com o duto, que está sob efeito do campo magnético, pode ser submetida a níveis de correntes que podem ser superiores aos valores máximos suportáveis pelo corpo humano. Tais valores são explicitados em [45], [46], [47] e [48] e são mostrados anteriormente nas Tabelas 3.1 e 3.2, para o público em geral e exposição ocupacional, respectivamente.

Além do contato de seres vivos com os dutos, as correntes induzidas podem danificar os dutos por meio da corrosão de sua proteção catódica, [9].

O efeito da corrente elétrica atuando no corpo humano é analisado de acordo com a sua intensidade e, também, com o tempo de atuação da mesma no corpo humano. O tempo de duração é separado em três diferentes categorias; são elas, [56]:

- Longa duração: Regime permanente da linha de transmissão;
- Curta duração: Falhas na linha de transmissão gerando um curto circuito;
- Duração muito curta: Incidência de uma descarga atmosférica na linha de transmissão.

O estudo desta dissertação é a linha de transmissão operando em regime permanente, o que caracteriza então um efeito de longa duração. Para o acoplamento magnético, considera-se que o limiar de perigo corresponde a uma circulação de corrente de 30 mA, [56]. O corpo humano tem um nível de percepção de corrente que varia de 0,5 a 1 mA, [56]⁴⁹.

3.5 – Técnicas de mitigação

Nas seções anteriores é apontado que a exposição de seres vivos e estruturas ao campo magnético são passíveis de efeitos indesejáveis. Notadamente, o acoplamento magnético tem como seu principal efeito indesejado os níveis de correntes que podem afetar um ser humano em contato com a estrutura inserida nesse campo magnético variável no tempo. Técnicas de mitigação podem ser aplicadas tanto nas linhas de transmissão, geradoras dos campos magnéticos, quanto nos dutos que sofrem a ação desse campo magnético. De acordo com [56], algumas técnicas podem ser aplicadas para mitigação dos efeitos eletromagnéticos; são elas:

- Uma transposição dos condutores das fases da linha de transmissão. Essa transposição é feita regularmente e pode reduzir os efeitos causados pela operação em regime permanente da linha de transmissão, principalmente quando os dutos estão posicionados paralelamente à linha. A análise detalhada de tais efeitos está fora do objeto de estudo desta dissertação.
- Em linhas de transmissão com circuitos duplos é possível escolher de maneira mais adequada a ordem de cada circuito na torre. A presente dissertação analisa três circuitos simples em linhas de transmissão. As referências [60], [64] e [66] analisam linhas de transmissão com circuitos duplos e a referência [61] mostra que o rearranjo de fases nos circuitos minimiza os valores de campo magnético.
- Ainda segundo [56] o aterramento dos dutos é a maneira mais simples e prática na redução das tensões induzidas pelo acoplamento magnético quando avaliado sob o regime permanente da linha. Recomenda-se aterrar os dutos em dois pontos, nas extremidades da área de ação do campo magnético e de acordo com a viabilidade do local. Não é recomendado que o aterramento dos dutos seja vinculado ao aterramento das torres da linha de transmissão.

⁴⁹ Efeitos de correntes induzidas por meio do acoplamento capacitivo são bem explicados de acordo com a referência [11].

As referências [76] e [77] apresentam uma técnica de diminuição do valor de campo magnético mediante a instalação de novos condutores na linha de transmissão. Segundo [76], a quantidade e geometria desses condutores influenciam diretamente no valor final de campo magnético e para exemplificar, quando foram instalados seis condutores como malha de mitigação do campo magnético a redução é da ordem de 40%. A referência [58] também utiliza uma espira condutora colocada abaixo da linha de transmissão para a redução do campo magnético a 1 metro do solo. Os resultados obtidos são da ordem de 30% a 50% de redução do campo magnético a essa altura.

Na literatura encontram-se outras formas de redução dos valores de campo magnético nas proximidades de uma linha de transmissão, porém as quatro citadas anteriormente são as mais utilizadas e muitas outras derivam dos mesmos princípios, com alterações de acordo com a situação prática em investigação.

3.6 – Conclusão

Neste capítulo é realizada a apresentação das metodologias utilizadas na avaliação da interferência eletromagnética entre uma linha de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. Em particular, o acoplamento magnético (indutivo) é o objeto de estudo desta dissertação.

Inicialmente, na seção 3.2 os efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos são avaliados de acordo com algumas normas referenciadas em [45], [46], [47] e [48].

Na seção 3.3 é feita uma breve amostragem dessa interferência eletromagnética e um histórico da evolução desses estudos.

Após uma descrição detalhada das premissas e, assim, das definições dos limites de validade, a partir da subseção 3.4.3 inicia-se a formulação detalhada para a modelagem eletromagnética utilizada para representar o acoplamento magnético entre linhas de transmissão, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos. Tal modelagem é feita baseada nas Equações de Maxwell e teoremas auxiliares que são detalhados ao longo do mesmo capítulo. Entende-se como teoremas auxiliares o Método das Imagens, devidamente abordado na subseção 3.4.3.2, e a modelagem do solo segundo o plano complexo de A. Deri [14], também devidamente abordado na subseção 3.4.3.3. As Equações de Maxwell utilizadas referem-se à Lei de Ampère e à Lei da Indução Magnética de Faraday, abordadas respectivamente nas subseções 3.4.3.1 e 3.4.4.1.

A modelagem final para o cálculo do campo magnético, tensões e correntes induzidas é realizada considerando as correntes induzidas nos cabos para-raios e os resultados são formulados com base em três formulações, "Método Aproximado", Método no Domínio do Tempo e Método das Elipses.

Conforme já mencionado, o cálculo das tensões e correntes induzidas nos dutos e consequentemente em possíveis seres humanos em contato com os mesmos é realizado por meio da Lei da Indução Magnética de Faraday e das equações de propagação de ondas de tensão e corrente em condutores (equações telegráficas), onde tal fato é o mais relevante visto a crescente preocupação em investigar tais efeitos.

Também é realizado um levantamento das principais modelagens eletromagnéticas presentes na literatura com a motivação de se validar os resultados obtidos e apresentados no capítulo a seguir desta dissertação.

Por fim, técnicas de mitigação (para segurança pessoal) são apresentadas, onde se destaca o aterramento dos dutos como uma técnica clássica e de grande eficiência no que tange a proteção de equipamentos e, principalmente, pessoas.

No próximo capítulo são obtidos os resultados numéricos para os três sistemas em estudo (Sistemas 1, 2 e 3 descritos no Capítulo 2 e outros apresentados no Capítulo 4).

Utiliza-se a metodologia descrita no presente capítulo e diversas análises de sensibilidade são apresentadas com a finalidade de enriquecer a compreensão da interação magnética entre linhas de transmissão e dutos.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 – Introdução

Inicialmente, nesta dissertação a definição dos sistemas sob estudo, no caso as três configurações reais de linhas de transmissão e, também, os dutos metálicos aéreos são caracterizados no Capítulo 2. Após estas definições, as metodologias utilizadas para os cálculos do campo magnético, das tensões/correntes induzidas nos dutos, bem como as técnicas de mitigação para os efeitos indesejáveis desse campo magnético, são apresentadas no Capítulo 3. Assim, elabora-se um programa computacional, desenvolvido no *Matlab*[®], que permite a realização de uma série de simulações e análises de sensibilidade de interesse prático. Os resultados das simulações são apresentados na forma de gráficos e tabelas nas seções e subseções a seguir.

Neste momento torna-se oportuno apresentar a Equação (4.1) a qual é utilizada em diversas análises a fim de se determinar a diferença percentual entre as grandezas envolvidas e particularizadas.

Diferença % =
$$\left(\frac{V_{\text{REFERÊNCIA}} - V_{\text{ANÁLISE}}}{V_{\text{ANÁLISE}}}\right) \times 100\%$$
 (4.1),

onde: V_{REFERÊNCIA} é o valor tomado como base e V_{ANÁLISE} é o valor do parâmetro em comparação.

4.2 – Resultados associados à avaliação do campo magnético

4.2.1 – Validação dos resultados

Validar os resultados obtidos em uma pesquisa de caráter computacional é de fundamental importância no que diz respeito à confiabilidade dos cálculos, premissas e simulações. Nesta dissertação, conforme já mencionado anteriormente, é desenvolvido um programa computacional em *Matlab*[®] que calcula os níveis de campos magnéticos, e tensões/correntes induzidas, baseados na metodologia de cálculo detalhada no Capítulo 3. A validação do programa é feita de duas maneiras: (i) Comparação com os resultados de medições de campo magnético divulgados na literatura; (ii) Comparação com os resultados

computacionais divulgados na literatura. Tal validação é devidamente apresentada nas subseções a seguir por meio de gráficos configurados na mesma escala da medição, bem como dos valores obtidos computacionalmente. Para uma visualização numérica dos dados, são apresentadas tabelas comparativas dos resultados, onde alguns valores importantes são apresentados como, por exemplo, o valor máximo e posição do campo magnético, valores nos limites em análise e na posição imediatamente abaixo do eixo de simetria da linha de transmissão.

4.2.1.1 – Comparação com resultados de medições divulgados na literatura

(i) Referência [13], por Gernan Edson Guimarães, 2005.

No ano de 2005, Guimarães realiza um estudo sobre o ambiente eletromagnético de uma linha de transmissão de 500 kV operando em 60 Hz. A linha por ele escolhida é uma linha de transmissão real, linha Neves 1 - Vespasiano 2 sobre a qual o mesmo realiza as medições em diversos vãos do sistema sob análise. O referido autor realiza medições de campo magnético os quais são utilizados para validação do programa desenvolvido nesta dissertação. A linha de transmissão utilizada pelo autor é do tipo horizontal, trifásica, circuito simples, tensão de 500 kV e corrente de operação de 650 A. A Figura 4.1 ilustra a configuração geométrica da referida linha⁵⁰.



Figura 4.1: Geometria da linha de transmissão. Fonte [13].

⁵⁰ Ao observar a Figura 4.1 verifica-se que, por opção do autor da referência [13], o eixo horizontal é nomeado como eixo x e o eixo vertical é nomeado como eixo y.

A linha de transmissão é composta por três subcondutores em cada fase, com diâmetro de 28,74 mm e um espaçamento entre eles de 0,457 m. A fase B é adotada como o eixo de simetria e, assim, as fases A e C estão espaçadas da fase B em 12 m. O relevo irregular onde está implantada a linha de transmissão faz com que as alturas máximas e mínimas dos condutores fase estejam a uma distância máxima de 25,26 m e mínima de 10,86 m do solo. A Figura 4.2 mostra a silhueta da linha de transmissão no vão onde são feitas as medições do campo magnético.



Para a medição do campo magnético o autor utiliza as recomendações de medição de acordo com a norma IEEE Std 644-1994 [43], pois a mesma é direcionada para procedimentos específicos de medição de campo magnético em baixa frequência para linhas aéreas de transmissão. As medições foram realizadas em um perfil de 40 m de seção transversal para cada lado da linha de transmissão, a 1 metro de altura. O campo magnético é medido utilizando um sensor com três bobinas com disposição ortogonal.

O instrumento de medição, segundo [13] possui um erro típico para a densidade de fluxo magnético menor do que $3\% \pm 1$ nT. O instrumento possui filtros seletivos onde é possível selecionar a frequência de 60 Hz para a medição do campo magnético.

Figura 4.2: Silhueta da linha de transmissão. Fonte [13].

O autor realiza algumas considerações no que diz respeito às medições do campo magnético; são elas:

- Caracterização realizada baseada na medição de densidade de fluxo magnético (B) medida em µT.
- Devido a grande variação da corrente da linha de transmissão durante o período em análise, são observadas as curvas de carga da linha onde as medições são realizadas em um período onde a variação é menor. Fato este se justifica pela dependência do campo magnético em relação à intensidade de corrente. O período onde há menor variação é entre 09h00min e 16h00min. O valor de corrente utilizado na simulação é de 650 A. A Figura 4-3 mostra a curva de carga da linha de transmissão em questão no horário da medição.



Figura 4.3: Curva de carga da linha de transmissão no horário de medição. Fonte [13].

Baseado nas informações anteriormente citadas é realizada a simulação, utilizando o programa desenvolvido nesta dissertação, com o objetivo de se comparar os resultados obtidos no mesmo com os resultados apresentados pelas medições do autor da referência [13], e assim validar tais resultados. A resistividade utilizada na simulação é de 2400 Ω .m, valor que segundo [12] é o médio do estado de Minas Gerais.

As Figuras 4.4-A e 4.4-B ilustram, respectivamente, os resultados gerados pelo programa desta dissertação e os valores de medição e cálculo divulgados em [13].



Figura 4.4-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para a linha de transmissão apresentada na Figura 4.1.



Figura 4.4-B: Perfil de campo magnético obtido por medições. Fonte [13].

As comparações dos resultados visualizados nas Figuras 4.4-A e 4.4-B são alvos de análise e, assim, alguns pontos devem receber uma atenção especial. Os valores máximos medidos por [13] e calculados pelo programa desta dissertação são bem próximos (8 μ T e 8,06 μ T, respectivamente), com uma pequena diferença no ponto medido deste valor que está em -1 m, enquanto que o valor calculado encontra-se em 0 m. Outro ponto são os valores posicionados nos extremos da faixa de passagem, ou seja em ± 40 m, onde os

valores medidos são da ordem de 1,5 μ T e os calculados em 1,59 μ T. A Tabela 4.1 apresenta o comparativo dos valores medidos e calculados.

Posição (m)	Mediça	ăo (μT)	Cálcı	ılo (μT)	Diferença %
Limite: -40	1,50		1,59		6,00%
Limite: +40	1,50		1,59		6,00%
0	7,80		8,06		3,33%
Valor máximo - Pos / Val	- 1 m	8,00	0 m	8,06	0,75%

Tabela 4.1: Comparação entre os valores medidos por [13] e os calculados nesta dissertação.

Verifica-se a grande proximidade entre os valores medidos e calculados, o que traduz informações consistentes e satisfatórias no que implica a validação dos resultados obtidos nesta dissertação.

(ii) Referência [78], por Luís Adriano Domingues e outros, 2003.

Em 2003, Domingues e outros autores, realizam o mapeamento dos campos eletromagnéticos gerados por linhas de transmissão do sistema de Furnas de tensões que variam de 138 kV até 765 kV. As linhas analisadas são de diversas configurações geométricas, bem como compostas por circuitos simples ou duplos. Os autores executam simulações computacionais para o cálculo dos níveis de campo magnético e, também, realizam medições do campo magnético. Medições cujos valores, na forma de gráficos, são utilizados para validação dos resultados obtidos pelo programa desenvolvido nesta dissertação.

Deseja-se validar os resultados com maior confiabilidade possível. Assim, com o objetivo de se obter uma maior quantidade de situações de medição, utilizam-se duas configurações das linhas de transmissão, uma com circuito simples e outra com circuito duplo. Logo, a validação dos resultados desta dissertação, baseada na referência [78] é feita em duas etapas e vale ressaltar que as medições do campo magnético são feitas a 1 metro do solo de acordo com as normas anteriormente citadas.

A primeira validação é feita por meio dos valores de medição para a linha de transmissão que interliga as cidades de Itumbiara a São Simão. Trata-se de uma linha de transmissão de circuito simples com disposição dos seus condutores em forma de delta e operação em 60 Hz. A Figura 4.5 ilustra a referida linha de transmissão.



Figura 4.5: Linha de transmissão de 500 kV com circuito simples. Fonte [78].

Os cabos fase desta linha de transmissão são do tipo *RAIL* e a mesma possui três cabos subcondutores por fase. A linha possui cabos para-raios do tipo 3/8 EHS. Durante o período de medição o valor de tensão da linha era de 531 kV e a corrente de operação estava em 305 A.

Nota-se que a avaliação é realizada partindo-se do eixo de simetria da linha (fase B), até uma distância de + 30 m, a qual é justificada, segundo os autores de [78] pelo fato dos valores até a distância de – 30 m serem exatamente iguais aos mencionados anteriormente.

Outro ponto importante a ser destacado, e de relevância na validação dos resultados, é o fato do autor não informar as configurações geométricas da linha de transmissão. Portanto, para uma maior confiabilidade dos resultados apresentados, utiliza-se nesta dissertação a configuração geométrica da linha de transmissão do Sistema 4, também em delta, utilizada por [11] e devidamente detalhada em seu trabalho. A resistividade utilizada na simulação é de 2400 Ω m.

Assim, as Figuras 4.6-A e 4.6-B representam, respectivamente, os valores obtidos através do programa elaborado nesta dissertação e os valores medidos e calculados por [78]. Neste momento são de interesse apenas os valores medidos, os quais na Figura 4.6-B são representados por pontos.



Figura 4.6-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para a linha de transmissão apresentada na Figura 4.5.



Figura 4.6-B: Perfil de campo magnético obtido por medições e cálculos. Fonte [78].

Verifica-se, pelas Figuras 4.6-A e 4.6-B, a grande semelhança entre as medições e os valores calculados nesta dissertação, o que satisfatoriamente é relevante na validação dos resultados obtidos. A Tabela 4.2 é responsável por deixar mais explícito tal semelhança na forma de números.

Posição (m)	Medição (mG)	Cálculo (mG)	Diferença %	
0	45,00	47,13	4,73%	
Central: +15	30,00	29,71	-0,97%	
Limite: +30	_imite: +30 12,00		-13,33%	

-	~ .		1-01		~
Labela 4 2. Com	naracao entre os	: valores medidos	nor 1/81 e	os calculados nesta	dissertacao
	puluçuo onnio oc			00 0010010000 110010	alooci lação.

A segunda validação, utilizando as medições da referência [78], é feita mediante a configuração de uma linha de transmissão de 500 kV com circuito duplo em 60 Hz. Este sistema refere-se à linha de transmissão Adrianópolis - Grajaú e Angra dos Reis - Grajaú. Esta linha tem seus condutores dispostos verticalmente como mostra a Figura 4.7.



Figura 4.7: Linha de transmissão de 500 kV com circuito duplo. Fonte [78].

Os cabos fase desta linha de transmissão são do tipo *RAIL* e a mesma possui quatro cabos subcondutores por fase. A linha possui cabos para-raios do tipo 3/8 EHS. Durante a medição os valores de tensão da linha eram de 540 kV e 519 kV, respectivamente, para cada circuito, e os valores de corrente eram, respectivamente, de 310 A e 867 A.

É importante ressaltar que os autores de [78] não informam as configurações geométricas da linha de transmissão. Portanto, para uma maior confiabilidade dos resultados apresentados, utiliza-se nesta dissertação a configuração geométrica da linha de transmissão do Sistema 6, em circuito duplo, utilizada por [11] e devidamente detalhada em seu trabalho. A resistividade utilizada na simulação é de 2400 Ω m.

Para esta configuração de linha as medições são realizadas variando-se o perfil transversal em 30 m para cada lado da linha de transmissão e, como já mencionado anteriormente, os valores da densidade de fluxo magnético são apresentados em mG.

As Figuras 4.8-A e 4.8-B representam, respectivamente, os valores obtidos nesta dissertação e os valores medidos e calculados por [78]. Neste momento são de interesse apenas os valores medidos, os quais na Figura 4.8-B são representados por pontos.



Figura 4.8-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para a linha de transmissão apresentada na Figura 4.7.



Figura 4.8-B: Perfil de campo magnético obtido por medições e cálculos. Fonte [78].

Ao comparar as Figuras 4.8-A e 4.8-B verifica-se a grande semelhança entre os gráficos e, principalmente, fica bem ilustrado que nos pontos mais importantes os valores
são muito próximos. Como pontos importantes considera-se o de valor máximo do campo magnético, que pelas medições está na posição - 7 m e com valor de 50 mG e, nos cálculos desta dissertação, está na posição - 6 m e valor de 51,53 mG; no ponto zero, eixo de simetria, o valor medido é de 45 mG e o calculado nesta dissertação é de 45,72 mG. A Tabela 4.3 representa tais valores e outros a fim de comparação e confirmar a validação satisfatória dos resultados. Verifica-se, contudo, uma grande diferença entre medição e cálculo nos pontos limites de avaliação do campo magnético. O autor desta dissertação credita às diferenças citadas as seguintes razões:

- Relevo acidentado nos locais de medição;
- Presença de objetos (árvores) nos locais de medição.

Todavia, vale salientar que a referência [78] é deficiente de informações dessa natureza.

Posição (m)	Mediç	ão (mG)	Cálcu	lo (mG)	Diferença %
Limite: -30	23	3,00	13	3,44	-41,57%
Limite: +30	8,00		3,18		-60,25%
0	45,00		45,72		1,60%
Valor máximo - Pos / Val	- 7 m	50,00	- 6 m	51,53	3,06%

Tabela 4.3: Comparação entre os valores medidos por [78] e os calculados nesta dissertação.

4.2.1.2 – Comparação com resultados computacionais divulgados na literatura

(i) Referência [24], por *Electric Power Research Institute*, 1987.

Em 1987, os autores da referência [24] realizam diversas simulações computacionais, baseadas nas formulações por eles apresentadas, para calcular níveis de campo magnético para várias configurações de linhas de transmissão. As variações das linhas de transmissão nas quais os cálculos são executados e simulações são feitas com mudanças na geometria, tais como, linha em delta, horizontal ou vertical. Também, variações das tensões/correntes de operação das linhas de transmissão são realizadas com a finalidade de se obter uma grande variedade de simulações práticas, e assim, vários resultados para análises e comparações.

Para validação dos cálculos apresentados nesta dissertação, utiliza-se da referência [24] uma configuração de linha de transmissão com as seguintes características:

- Tensão de operação de 800 kV.
- Operação da linha de transmissão em 60 Hz.
- Disposição horizontal dos cabos fase.
- Espaçamento entre os cabos fase em 14 m.
- Posicionamento dos cabos fase a uma altura de 18,5 m do solo.
- Cabos fase compostos de 3 subcondutores.
- Corrente de operação da linha com valor de 2000 A.
- Variação do perfil transversal de 0 m a 100 m partindo do eixo de simetria da linha de transmissão; no caso a fase B corresponde ao eixo de simetria.

É relevante destacar que o campo magnético calculado tem seus valores apresentados em A/m e o ponto de medição é feito no nível do solo. Para valores de densidade de fluxo magnético, nos quais as normas se baseiam, o cálculo é feito utilizando a Equação (3.36).

As Figuras 4.9-A e 4.9-B representam, respectivamente, os valores obtidos nesta dissertação e os valores calculados por [24], referentes à linha de transmissão descrita anteriormente. A variação do perfil de 0 m a 100 m indica que no outro eixo de simetria, que é de 0 m a – 100 m os valores do campo magnético têm os mesmos valores, ficando assim, por critério de [24] subentendidos. Evidentemente, tal comportamento é fruto da configuração geométrica simétrica da linha sob consideração.

Ao realizar a comparação entre as Figuras 4.9-A e 4.9-B fica evidenciada a grande semelhança entre os valores calculados por [24] e os calculados nesta dissertação. Vale ressaltar que não somente os valores mais importantes são extremamente semelhantes, mas todo o comportamento do sistema, para ambos os métodos de cálculo, são semelhantes. A Tabela 4.4 mostra tal semelhança em função de valores em alguns pontos importantes dos gráficos.

Posição (m)	Cálculo (A/m) [24]	Cálculo (A/m) [24] Cálculo (A/m)	
0	14,20	14,48	1,97%
Meio: +50	3,00	2,95	-1,67%
Limite: +100	0,80	0,82	2,50%

Tabela 4.4: Comparação entre os valores calculados por [24] e os calculados nesta dissertação.



Figura 4.9-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para a linha de transmissão descrita nesta subseção.





(ii) Referência [79], por Pieter Pretorius, 2006.

No ano de 2006, Pretorius, [79], apresenta um trabalho onde realiza uma grande revisão na literatura existente na busca por informações sobre cálculos de campos magnéticos a fim de estabelecer os perfis característicos para configurações de linhas de transmissão de 400 kV e 765 kV.

A validação dos resultados desta dissertação é feita com base nas três geometrias de linhas de transmissão apresentadas pelo autor. A Tabela 4.5 apresenta o tipo de geometria e características de cada uma das linhas de transmissão em análise. É importante destacar que todas as linhas operam na frequência de 50 Hz, com tensão de

⁵¹ DISTANCE FROM CENTER LINE refere-se à distância a partir do centro da linha de transmissão.

765 kV e corrente de 1000 A. O perfil transversal analisado é da ordem de 80 m, ou seja, variação de 40 m para cada lado partindo do eixo de simetria (fase B) da linha de transmissão. O autor não informa a resistividade utilizada em seus cálculos. Assim, considera-se o solo como ideal na realização das simulações, ou seja, com resistividade igual a zero (condutividade infinita). O autor também realiza simulações sobre as linhas de 400 kV, mas por opção, visto que os resultados seriam semelhantes, as comparações são feitas com base nos resultados apenas das linhas operando em 765 kV.

Tabela 4.5: Geometrias e características das linhas de transmissão em análise. Fonte [79].

Altura / Tipo da Linha	Fase A (m)	Fase B (m)	Fase C (m)	Distância entre Fases [m]
Horizontal	17,00	17,00	17,00	15,80
Cross Rope	20,00	17,00	20,00	14,00
Delta	29,00	17,00	29,00	7,00

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 ilustram as geometrias das linhas de transmissão em análise.





Figura 4.10: Linha de transmissão de 765 kV com circuito Horizontal. Fonte [79].



Figura 4.11: Linha de transmissão de 765 kV com circuito em Cross Rope. Fonte [79].



Figura 4.12: Linha de transmissão de 765 kV com circuito em Delta. Fonte [79].

As Figuras 4.13-A e 4.13-B representam, respectivamente, os valores obtidos nesta dissertação e os valores calculados por [79] para todas as geometrias.



Figura 4.13-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para as linhas de transmissão apresentadas nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12.



Figura 4.13-B: Perfil de campo magnético obtido por cálculos. Fonte [79]⁵².

⁵² Por Horizontal Distance entende-se como distância horizontal.

Verifica-se pelas Figuras 4.13-A e 4.13-B que existe grande similaridade no comportamento das curvas apresentadas por [79] e nas curvas simuladas por esta dissertação. A Tabela 4.6 apresenta uma comparação dos valores de todas as geometrias apresentadas e os valores simulados pelo programa elaborado nesta dissertação os quais retratam a grande proximidade entre os valores.

Configuração Horizontal								
Posição (m)	Cálculo (µT) [73]		Cálculo (µT)		Diferença %			
Limite: -80	1,0)4	1,05		0,96%			
Limite: +80	1,0)4	1,	05	0,96%			
0	11,	50	11	,52	0,17%			
Valor máximo - Pos / Val	- 9 m	11,80	- 9 m	11,57	-1,95%			
Valor máximo - Pos / Val	+ 9 m	11,80	+9 m	11,57	-1,95%			
Configuração Cross Rope								
Posição (m)	Cálculo (µT) [73]		Cálculo (µT)		Diferença %			
Limite: -80	1,0)7	1,14		6,54%			
Limite: +80	1,0)7	1,14		6,54%			
0	9,0	00	9,16		1,78%			
Valor máximo - Pos / Val	- 8 m	9,00	- 8 m	9,12	1,33%			
Valor máximo - Pos / Val	+ 8 m	9,00	+ 8 m	9,12	1,33%			
	Configura	ição Delt	a					
Posição (m)	Cálculo (µT) [73]		Cálculo (µT)		Diferença %			
Limite: -80	0,5	50	0,	51	2,00%			
Limite: +80	0,5	50	0,	51	2,00%			
0	6,1	0	6,	05	-0,82%			
Valor máximo - Pos / Val	0 m	6,10	0 m	6,05	-0,82%			

Tabela 4.6: Comparação entre os valores calculados por [79] e os calculados nesta dissertação.

(iii) Referência [80], por Pedro Gonzaga Paulino Mendes, 2010.

Em 2010, Mendes através de seu trabalho [80] apresenta formulações relevantes para o cálculo dos campos elétricos e magnéticos oriundos de linhas de transmissão de alta tensão com a intenção de analisar os efeitos eletromagnéticos na saúde das pessoas. Para realização dos cálculos o autor desenvolve um programa em *Matlab*[®] sobre o qual o mesmo aplica suas formulações. A análise dos valores de campo elétrico e magnético apresentada

é feita separadamente para uma melhor avaliação dos fatores que influenciam o cálculo de cada um dos campos. O autor adota um caso base e, posteriormente, realiza uma série de análises com diferentes geometrias e configurações de linhas de transmissão, com a intenção de procurar soluções que permitam reduzir os valores de campo elétrico e magnético gerados, respectivamente, pelas distribuições de carga e corrente elétricas de linhas de transmissão. Para as simulações, o autor utiliza a linha de transmissão com circuito horizontal cuja geometria é apresentada na Figura 4.14⁵³.



Figura 4.14: Geometria da linha de transmissão em análise. Fonte [80].

A linha de transmissão em questão é de 400 kV com uma potência máxima transmitida em 1400 MVA, o que produz uma corrente da ordem de 2020 A. A altura considerada dos cabos fase é de 26 m em relação ao solo, os cabos para-raios estão a uma altura de 36 m do solo, o ponto de cálculo possui uma altura de 1,75 m e o perfil transversal analisado varia de – 50 m a + 50 m. O espaçamento entre os cabos fase é de 12 m e a linha opera em uma frequência de 60 Hz. O vão entre as torres desta configuração possui 300 m de extensão. A linha é composta por um feixe de dois subcondutores por fase.

Para os cálculos foram desconsiderados os cabos para-raios e as correntes induzidas nos mesmos, visto que, segundo [80], estas correntes nos cabos para-raios não têm influência significativa no campo magnético originado nas proximidades do solo. O solo é modelado segundo o plano complexo de A. Deri, [14]. Assim, correntes imagens de retorno por esse plano complexo são consideradas na formulação.

Portanto, as Figuras 4.15-A e 4.15-B representam, respectivamente, os valores obtidos nesta dissertação e os valores calculados por [80] referentes à linha de transmissão

⁵³ Por opção do autor da referência [80] o eixo x é o horizontal, o eixo y é o vertical e o eixo z, de acordo com a representação, está ortogonal (saindo) do plano formado por x e y.

descrita anteriormente. Nota-se inicialmente que os valores máximos de campo magnético estão em – 15 m e + 15 m.



Figura 4.15-A: Perfil de campo magnético obtido pelo programa desenvolvido nesta dissertação para a linha de transmissão descrita nesta subseção.



Figura 4.15-B: Perfil de campo magnético obtido por cálculos. Fonte [80].

Ao comparar as Figuras 4.15-A e 4.15-B nota-se uma grande semelhança na variação do perfil transversal em análise e nos valores do campo magnético. É importante explicitar que os valores máximos ocorrem em \pm 15 m para a referência [80] e \pm 14 m para os cálculos realizados nesta dissertação. Fica evidenciado também que para o ponto zero,

logo abaixo do eixo de simetria da linha de transmissão, os valores de campo magnético são bem próximos (18,5 μT e 19,8 μT, respectivamente). Tais análises satisfazem as premissas para validação dos resultados obtidos nesta dissertação. A Tabela 4.7 mostra mais alguns valores relevantes para análise e comparação.

Posição (m)	Cálculo	(µT) [74]	Cálculo	Diferença %	
Limite: -50	5,5	50	3,9	-28,91%	
Limite: +50	5,5	50	3,9)1	-28,91%
0	18,50		19,80		7,03%
Valor máximo - Pos / Val	- 15 m	33,06	- 14 m	31,85	-3,66%
Valor máximo - Pos / Val	+ 15 m	33,06	+ 14 m	31,85	-3,66%

Tabela 4.7: Comparação entre os valores calculados por [80] e os calculados nesta dissertação.

4.2.2 – Análise do perfil transversal do campo magnético a 1 metro do solo

Para a avaliação da interferência magnética, gerada pelas correntes de linhas de transmissão, operando em regime permanente, conforme as normas descritas por [45], [46], [47] e [48], é necessário que o campo magnético seja medido/calculado a uma altura de 1 m acima do nível do solo, o qual é base para comparação com os níveis de segurança recomendados. Tal premissa das normas justifica a opção pela análise do perfil transversal do campo magnético a esta altura.

Nas subseções seguintes, 4.2.2.1, 4.2.2.2 e 4.2.2.3 são realizadas análises de sensibilidade em relação ao perfil transversal do campo magnético. As análises realizadas são de acordo com a geometria da linha de transmissão, quanto às correntes induzidas nos cabos para-raios e quanto à resistividade elétrica do solo. Os resultados das análises são apresentados mediante gráficos e tabelas numéricas.

4.2.2.1 – Sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão

A implantação de uma linha de transmissão é realizada em várias etapas. Uma delas é a avaliação dos campos magnéticos gerados a 1 metro do solo, conforme as normas mencionadas anteriormente, para, assim, auxiliar na determinação dos limites da faixa de passagem a fim de garantir a segurança de pessoas e animais que estejam localizados próximos à linha de transmissão, [11]. A presente subseção apresenta os valores de campo magnético a 1 metro do solo, dos três sistemas propostos no Capítulo 2 desta dissertação; resumidamente algumas informações dos mesmos são as seguintes:

- Sistema 1: Circuito simples, triangular, tensão de 138 kV e corrente 146,43 A.
- Sistema 2: Circuito simples, horizontal, tensão de 345 kV e corrente 418,3 A.
- Sistema 3: Circuito simples, horizontal, tensão de 500 kV e corrente 837,15 A.

As demais informações de relevância para os três sistemas citados anteriormente estão no Capítulo 2 desta dissertação, referências [27], [28] e [29] respectivamente.

Realiza-se, então, a simulação do programa elaborado nesta dissertação e, desta forma, a Figura 4.16 mostra o perfil do campo magnético gerado pelas distribuições de correntes elétricas dos três sistemas simultaneamente. É válido destacar que a corrente induzida nos cabos para-raios, pelas correntes dos cabos fase, não foram avaliadas nesta etapa; as mesmas são analisadas nas seções e subseções seguintes desta dissertação. A variação do perfil transversal é de - 30 m até + 30 m. O solo considerado para os resultados é o ideal, ou seja, possui uma resistividade elétrica de valor igual a zero.



Figura 4.16: Análise de sensibilidade do campo magnético a 1 metro do solo, sem os cabos pararaios, para os Sistemas 1,2 e 3, e considerando o solo como um condutor elétrico perfeito.

Baseado na Figura 4.16, as seguintes e pertinentes observações são realizadas:

 Os níveis de campo magnético não excedem os valores estabelecidos pelas normas [45], [46], [47] e [48] em todo o perfil transversal da linha de transmissão que é, naturalmente, a sua faixa de passagem. Os valores máximos alcançados para as configurações dos Sistemas 1, 2 e 3 são de 1,40 μ T, 7,04 μ T e 11,27 μ T, respectivamente.

- Os Sistemas 2 e 3 apresentam os maiores valores de campo magnético, visto que seus valores de corrente de operação, que são dados em função da potência transmitida pela linha de transmissão, são maiores que o valor de corrente do Sistema 1, o que comprova a direta relação do campo magnético com a intensidade da corrente.
- Nota-se que o Sistema 1 não é simétrico e, assim, também não o será em relação ao perfil do campo magnético, visto que o mesmo possui uma configuração geométrica diferente dos Sistemas 2 e 3. Fica evidente uma assimetria no lado esquerdo do eixo de simetria da linha de transmissão, pois, conforme é visto no Capítulo 2, as fases A e C da referida linha estão dispostas verticalmente, o que representa valores de 1,40 µT e 1,16 µT, respectivamente, como pontos de primeiro máximo e segundo máximo desta linha.
- Os circuitos em análise nesta dissertação apresentam um perfil de campo magnético em forma de "M" e fica claro que a geometria da linha de transmissão influencia diretamente o perfil e valor do campo magnético em toda a faixa de passagem.
- As normas de avaliação da exposição a campos magnéticos não verificam a tensão e geometria da linha de transmissão, verificando apenas os valores do próprio campo magnético. As tensões influenciam visto que, para maiores potências a serem transmitidas, é necessária uma elevação da tensão a fim de garantir critérios físicos - econômicos no que diz respeito ao projeto da linha de transmissão, [31].
- Verifica-se que a partir do ponto máximo do campo magnético, para todos os sistemas, o campo decresce rapidamente até valores relativamente baixos.

A Tabela 4.8 traduz informações relevantes no que diz respeito aos valores que podem ser visualizados pela Figura 4.16.

Tabela 4.8: Informações numéricas da Figura 4.16 referentes ao campo magnético dos três sistemas em análise nesta dissertação.

Campo Magnético (µT)	Sistema 1		Sistem	a 2	Sistema 3	
Posição - Valor Máximo	- 6 m	1,40	- 12 m	7,04	- 13,5 m	11,27
Posição - Valor Máximo	+ 8 m	1,16	+ 12 m	7,04	+13,5 m	11,27
0	0,89		3,95		5,86	
Limite: -30	0,26		2,17		4,78	
Limite: +30	0,27		2,17		4,78	

A sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão não fica totalmente caracterizada, uma vez que os sistemas de transmissão sob análise possuem correntes de operação diferentes. Portanto, para apresentar, com maior clareza, a influência da geometria da linha no campo magnético, são acrescentados mais três sistemas com configurações geométricas distintas e um mesmo valor de corrente é aplicado a todas as configurações; por opção do autor, o valor de corrente é de 1000 A. As demais configurações utilizadas na análise da sensibilidade relacionada à geometria da linha de transmissão são mostradas a seguir de acordo com a Tabela 4.9, Tabela 4.10 e Tabela 4.11.

Características geométricas e elétricas do Sistema 4						
Tensão de operação	500 kV	PR 1 PR 2				
Altura média fase A	17,50 m	A B A				
Altura média fase B	25,00 m	A° C				
Altura média fase C	17,50 m					
Altura média cabos para-raios	30,70 m					
Vão Médio	450 m					
Espaçamento entre as fases (referência fase B)	7,50 m					

Tabela 4.9: Características geométricas e elétricas do Sistema 4. Fonte: Adaptado de [11].

Tabela 4.10: Características geométricas e elétricas do Sistema 5. Fonte: Adaptado de [11].

Características geométricas e elétricas do Sistema 5						
Tensão de operação	138 kV	PR 1 PR 2				
Altura média fase A	22,40 m					
Altura média fase B	18,72 m	A 0 0 A'				
Altura média fase C	15,00 m	B				
Altura média fase A'	22,40 m	B.				
Altura média fase B'	18,72 m	c c'				
Altura média fase C'	15,00 m					
Altura média cabos para-raios	24,40 m					
Vão Médio	450 m					
Espaçamento entre as fases (A-A', B-B' e C-C')	15,00 m					

Características geométricas e elétricas do Sistema 6							
Tensão de operação	765 kV	PR 1					
Altura média fase A	29,00 m	ACC					
Altura média fase B	17,00 m						
Altura média fase C	29,00 m	в					
Altura média cabos para-raios	34,80 m						
Vão Médio	390 m						
Espaçamento entre as fases (referência fase B)	7,00 m						

Tabela 4.11: Características geométricas e elétricas do Sistema 6. Fonte: Adaptado de [79].

É importante deixar claro que os Sistemas nomeados por 4, 5 e 6 são utilizados apenas para análise de sensibilidade quanto à configuração geométrica da linha de transmissão.

Sendo assim, a Figura 4.17 apresenta a variação do campo magnético para os seis sistemas citados anteriormente, considerando um mesmo valor de corrente (1000 A). Como informações adicionais inerentes à análise o solo é considerado um condutor elétrico perfeito (resistividade = 0) e o efeito dos cabos para-raios não é considerado.

Observações importantes podem ser realizadas ao se analisar a Figura 4.17, onde estão apresentados os campos magnéticos para os seis sistemas propostos, com variação de geometrias e valor de corrente constante; assim, a sensibilidade quanto à configuração geométrica da linha de transmissão fica explicitada.

- Os valores de campo magnético para os sistemas acrescentados nesta simulação (Sistema 4, Sistema 5 e Sistema 6) também estão dentro dos limites de exposição de seres humanos de acordo com as normas [45], [46], [47] e [48].
- O Sistema 4, configuração em delta, com as fases A e C mais baixas do que a fase B, apresenta um perfil de campo magnético no formato de um "M"; já o Sistema 6, que utiliza uma configuração em delta também, porém com as fases A e C mais altas do que a fase B, já apresenta um perfil de campo magnético no formato de um "A".
- Para o Sistema 5, que é um circuito duplo, o valor máximo de campo magnético é abaixo dos demais sistemas, pois os efeitos dos campos de cada circuito são opostos, minimizando assim o valor máximo, que é de 3,15 µT.



Figura 4.17: Análise de sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão para os seis sistemas com a mesma corrente de operação (1000 A).

Fica evidenciada, assim, a significativa influência da configuração geométrica da linha de transmissão no comportamento do campo magnético ao longo de seu perfil transversal. Este fato é de fundamental importância, pois um possível critério no projeto de linhas de transmissão pode ser o associado à sua configuração, tendo em vista a redução dos campos magnéticos nas proximidades, impactando de forma decisiva sua interação com o meio ambiente e seres humanos. A Tabela 4.12 traduz informações relevantes no que diz respeito aos valores que podem ser visualizados pela Figura 4.17.

Campo Magnético (µT)	Sistema 1		Sistema 2		Sistema 3	
Posição - Valor Máximo	- 6 m	9,62	- 12 m	16,83	- 13,5 m	13,45
Posição - Valor Máximo	+ 8 m	7,91	+12 m	16,83	+ 13,5 m	13,45
0	6,13		9,44		7,01	
Limite: -30	1,83	1,83		5,20		
Limite: +30	1,85		5,20		5,71	
Campo Magnético (µT)	Sistem	a 4	Sistema 5		Sistema 6	
Posição - Valor Máximo	- 11,5 m	10,22	- 12,5 m	3,15	0 m	12,30
Posição - Valor Máximo	+ 11,5 m	10,22	+12,5 m	3,15	0 m	12,43
0	3,58		2,76		12,43	
Limite: -30	3,92		1,01		5,79	
Limite: +30	3,92		1,01		5,79	

Tabela 4.12: Informações numéricas da Figura 4.17 referentes ao campo magnético dos seis sistemas simulados para avaliação da sensibilidade quanto à geometria da linha de transmissão.

4.2.2.2 – Sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios

Nesta subseção é apresentada a análise do campo magnético, para os três sistemas reais propostos nesta dissertação, com a inclusão das correntes induzidas nos cabos pararaios pelas correntes dos cabos fase. A metodologia de cálculo dessas correntes é apresentada no Capítulo 3, subseção 3.4.3.5.3. Segundo [11], [24] e [80] os cabos pararaios não influenciam significativamente no valor do campo magnético gerado por uma linha de transmissão na altura de medição de um metro acima do solo. Tal justificativa é feita pelo fato desses condutores estarem posicionados acima dos condutores fase, o que implica em uma pequena variação dos valores do campo magnético.

A análise deste comportamento é feita apresentando o campo magnético sem a presença dos cabos para-raios e com a presença dos cabos para-raios em uma mesma figura. Todos os três sistemas de transmissão são analisados e tabelas com os valores numéricos de cada um são apresentadas para a visualização dos resultados ilustrados nas figuras. Para todas as simulações o solo é considerado ideal, ou seja, com resistividade elétrica igual a zero. Inicialmente, a Figura 4.18 mostra a simulação feita para o Sistema 1 desta dissertação.



Figura 4.18: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presença dos cabos pararaios para o Sistema 1.

Analisando-se a Figura 4.18 verifica-se que na maior parte do perfil transversal em análise a influência do cabo para-raios é muito pequena e as curvas caminham praticamente sobrepostas. Existe uma maior diferença no ponto de valor máximo do campo magnético pelo fato da configuração geométrica da linha de transmissão ser assimétrica, onde as fases A e C posicionam-se em um mesmo lado da torre. A Tabela 4.13 apresenta estas informações.

Tabela 4.13: Informações numéricas da Figura 4.18 referente ao campo magnético gerado pelo Sistema 1 com e sem a presença dos cabos para-raios.

Campo Magnático (uT)		;	Sistema 1 - Para-Raios			
	Sem		Com		Variação %	
Posição - Valor Máximo	- 6 m	1,40	- 6 m	1,49	6,43%	
Posição - Valor Máximo	+ 8 m	1,16	+ 8 m	1,15	-0,86%	
0	0,89		1,01		13,48%	
Limite: -30	0,26		0,24		-7,69%	
Limite: +30	0,2	7	0,26		-3,70%	

A Figura 4.19 mostra a análise de sensibilidade em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 2 em análise neste trabalho.



Figura 4.19: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presença dos cabos pararaios para o Sistema 2.

Analisando-se a Figura 4.19 verifica-se que as curvas são simétricas ao longo do perfil transversal, fato este que se deve à simetria das distâncias dos cabos fase e também

dos cabos para-raios. Nota-se uma redução do campo magnético ao longo de todo o perfil, em torno de 9%, uma vez que a altura dos cabos para-raios é pouco superior à dos cabos fase. Assim, a influência é maximizada com níveis de correntes induzidas mais altos e, consequentemente, um campo reduzido maior. A Tabela 4.14 apresenta estas informações numericamente.

Tabela 4.14: Informações numéricas da Figura 4.19 referente ao campo magnético gerado pelo Sistema 2 com e sem a presença dos cabos para-raios.

Campo Magnático (uT)		S	istema 2 - Para-Raios			
	Sem		Com		Variação %	
Posição - Valor Máximo	- 12 m	7,04	- 12 m	6,40	-9,09%	
Posição - Valor Máximo	+ 12 m	7,04	+ 12 m	6,48	-7,95%	
0	3,95		3,70		-6,33%	
Limite: -30	2,17		1,90		-12,44%	
Limite: +30	2,17	,	1,95		-10,14%	

Continuando com a análise de sensibilidade em relação aos cabos para-raios, a Figura 4.20 é relativa ao Sistema 3.



Figura 4.20: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presença dos cabos pararaios para o Sistema 3.

Novamente, as curvas da Figura 4.20 são simétricas, em decorrência da simetria da configuração geométrica dos cabos fase e para-raios. Nota-se uma redução do campo magnético ao longo de todo o perfil com um valor inferior a 2%, valor exatamente de acordo

com as referências [24] e [80]. Notadamente, esta redução se deve ao fato dos cabos pararaios estarem posicionados a uma altura bem maior do que os cabos fase. A Tabela 4.15 apresenta estas informações numericamente.

Campo Magnótico (uT)	Sistema 3 - Para-Raios							
	Sem		Com		Variação %			
Posição - Valor Máximo	- 13,5 m	11,27	- 13,5 m	11,09	-1,60%			
Posição - Valor Máximo	+13,5 m	11,27	+13,5 m	11,14	-1,15%			
0	5,86		5,60		-4,44%			
Limite: -30	4,78		4,63		-3,14%			
Limite: +30	4,78	;	4,67		-2,30%			

Tabela 4.15: Informações numéricas da Figura 4.20 referente ao campo magnético gerado pelo Sistema 3 com e sem a presença dos cabos para-raios.

Alguns comentários adicionais, relativos à influência dos cabos para-raios, são merecedores de destaque. Para linhas de transmissão nas configurações geométricas simétricas a presença dos cabos para-raios acarreta uma diminuição dos níveis de campo magnético (ao longo de todo o perfil transversal). Por outro lado, para linhas assimétricas, principalmente na região onde dois dos cabos fase são instalados, ocorre um aumento dos níveis em questão. Naturalmente, estes comportamentos são decorrentes dos processos físicos envolvidos no fenômeno de indução magnética (traduzido pelas Leis de Lenz e de Faraday).

4.2.2.3 – Sensibilidade em relação à resistividade elétrica do solo

O estudo da modelagem correta do solo para as interferências magnéticas geradas por uma linha de transmissão é de fundamental importância para que as grandezas fiquem definidas de maneira fisicamente consistente e mais próximas da realidade. O comportamento eletromagnético do solo é caracteristicamente linear e cuja grandeza depende de sua resistividade elétrica (ρ), ou condutividade elétrica $\left(\sigma = \frac{1}{\rho}\right)$, e permissividade elétrica (ε).

Segundo [12] e [81], a grande maioria dos procedimentos e metodologias não inclui a variação dos parâmetros elétricos ρ e ε com a frequência, o que faz com que os referidos parâmetros acabem por ser mensurados de uma maneira não condizente com a realidade na qual eles se encontram. Contudo, para a situação em análise nesta dissertação,

frequência industrial de 60 Hz (linha operando em regime permanente senoidal), a variação em causa não é significativa em termos práticos.

De acordo com as premissas apresentadas no Capítulo 3, a modelagem do solo adotada nesta dissertação corresponde à consideração do plano complexo de A. Deri, [14], onde segundo seus trabalhos, a formulação do valor da profundidade complexa "p" é dada pela Equação (4.2).

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_s + j\omega\varepsilon_s)}}$$
(4.2),

onde:

- μ₀: Permeabilidade magnética do vácuo.
- σ_s : Condutividade elétrica do solo, dada em $\left|\frac{1}{\Omega m}\right|$;
- ε_s : Permissividade elétrica do solo, dada em $\left|\frac{F}{m}\right|$.

Conforme já citado anteriormente, a análise da interferência magnética é feita em regime permanente (60 Hz). Assim, a formulação apresentada na Equação (4.2) pode ser reduzida e aproximada de acordo com a Equação (4.3). A justificativa para o uso desta aproximação é realizada mediante algumas análises gráficas.

$$p = \sqrt{\frac{\rho_s}{j\omega\mu_0}}$$
(4.3).

A Equação (4.3) é a utilizada nos cálculos do campo magnético desta dissertação, conforme Capítulo 3, e seu uso se justifica com base nas Figuras 4.21-A, 4.21-B, 4.22-A e 4.22-B apresentadas em seguida e devidamente comentadas.



Figura 4.21-A: Gráfico do módulo de "p" com várias resistividades e variação da permissividade elétrica relativa.



Figura 4.21-B: Gráfico do ângulo de fase de "p" com várias resistividades e variação da permissividade elétrica.

Verifica-se pela Figura 4.21-A que, em uma frequência notadamente baixa (60 Hz), o módulo da profundidade complexa "p" não se altera com a permissividade elétrica relativa do meio, seja qual for o valor da resistividade. Entende-se por não alterar quando o mesmo permanece constante, para uma variação da permissividade relativa de 0,01 até 1000. O valor de "p" se torna maior quanto maior é a resistividade do solo. A Figura 4.21-B mostra que o ângulo de fase permanece praticamente inalterado com a variação do valor da permissividade elétrica do meio e verifica-se que tal variação, mesmo muito pequena, somente ocorre para os valores de resistividade de 5000 e 10000 e tal variação é inferior a 1 grau. Desta forma, em termos práticos, pode se considerar a fase de "p" praticamente igual a - 45 graus.



Figura 4.22-A: Gráfico do módulo de "p" com várias permissividades elétricas relativas e variação da resistividade elétrica do solo.



Figura 4.22-B: Gráfico do ângulo de fase de "p" com várias permissividades elétricas relativas e variação da resistividade elétrica do solo.

Notadamente, a Figura 4.22-A traduz a informação de que a significativa variação na permissividade relativa não influencia o comportamento do módulo de "p" em função da resistividade elétrica. Também a Figura 4.22-B mostra que para várias permissividades relativas o ângulo de fase da profundidade complexa "p" pouco se altera, havendo uma pequena alteração, inferior a 1 grau, para os valores altos de permissividade elétrica (500 e 1000 respectivamente). Mais uma vez, o ângulo pode ser aproximado para - 45 graus.

Os trabalhos de [82] e [83] mostram, além da análise de outros métodos de modelagem do solo, a dependência da frequência em sua mensuração e que, para baixas frequências, a redução da Equação (4.2) para a Equação (4.3) é fisicamente consistente e praticamente não influencia no cálculo dos parâmetros longitudinais de linhas de transmissão. Ademais, a referência [12] mostra que o método de A. Deri [14], principalmente para baixas frequências e independente dos valores de resistividade e permissividade relativa elétricas, conduz aos mesmos resultados, quando comparados com métodos matemática e numericamente mais complexos. Vale citar que estas análises, evidentemente, são válidas para solos com altos valores de resistividade, como é o caso do território de Minas Gerais, em torno 2400 Ω m, que é amplamente utilizado nas análises que se seguem.

Devidamente justificada a opção pela aproximação de A. Deri [14] aplica-se a mesma na análise do campo magnético gerado pelas correntes dos três sistemas propostos nesta dissertação, tendo em vista a verificação quanto à variação da resistividade do solo no comportamento do campo magnético. As análises e comentários são realizados para cada um dos sistemas em separado e vale ressaltar que, inicialmente, tal análise é feita sem a presença dos cabos para-raios (dada a influência relativamente reduzida de suas correntes induzidas nos valores de campo magnético). Portanto, a Figura 4.23 apresenta o campo magnético para o Sistema 1 em função de vários valores de resistividade do solo.

Nota-se que para os valores de resistividade superiores a 0,1 Ω .m as curvas do campo magnético se sobrepõem e fornecem um valor máximo no ponto transversal em -1 m e com valor de 1,15 µT. Considerando o solo ideal ou praticamente ideal, resistividades de 0 e 0,01 Ω .m, o campo magnético tem seu valor máximo (resistividade = 0), no ponto transversal de -6 m, igual a 1,40 µT. Assim, verifica-se que, para uma resistividade média de 2400 Ω .m de Minas Gerais, o perfil do campo magnético está devidamente caracterizado para o Sistema 1.



Figura 4.23: Análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 1 para várias resistividades do solo.

A variação do campo magnético para o Sistema 2 em função de vários valores de resistividade é apresentada na Figura 4.24. Novamente, verifica-se que para os valores de resistividade superiores a 0,1 Ω .m as curvas do campo magnético se sobrepõem e fornecem um valor máximo, posicionado logo abaixo do eixo de simetria da linha de transmissão, de 5,76 µT. Considerando o solo ideal ou praticamente ideal, resistividades de 0 e 0,01 Ω .m, o campo magnético tem seu valor máximo (resistividade = 0), no ponto transversal de ±12 m, de 7,04 µT.



Figura 4.24: Análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 2 para várias resistividades do solo.

Uma última análise é feita para o Sistema 3, cujos resultados estão ilustrados na Figura 4.25. Destaca-se a importância de se demonstrar tais análises de variação de resistividade do solo para os três sistemas sob estudo nesta dissertação, visto que configurações geométricas diferentes e característica elétricas particulares de cada sistema podem ser explicitadas por meio desta análise de sensibilidade.



Figura 4.25: Análise de sensibilidade do campo magnético do Sistema 3 para várias resistividades do solo.

Nota-se, novamente, que para os valores de resistividade superiores a 0,1 Ω m as curvas do campo magnético se sobrepõem. O valor máximo do campo, posicionado logo abaixo do eixo de simetria da linha de transmissão, é de 9,18 µT. Considerando o solo ideal ou praticamente ideal, resistividades de 0 e 0,01 Ω m, o campo magnético tem seu valor máximo (resistividade = 0), no ponto transversal de ± 13,5 m, igual a 11,27 µT.

Verificam-se pelas Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 que todos os valores apresentados de campo magnético estão dentro dos valores de limite de exposição a seres vivos, conforme as normas já devidamente mencionadas nesta dissertação.

É relevante ilustrar o perfil do campo magnético, para os três sistemas de transmissão sob análise, considerando o valor de resistividade média de Minas Gerais (2400 Ωm), Figura 4.26.



Figura 4.26: Análise de sensibilidade do campo magnético para os Sistemas 1, 2 e 3 com resistividade do solo de 2400 Ω .m.

A Tabela 4.16 traduz informações relevantes no que diz respeito aos valores que podem ser visualizados pela Figura 4-26.

Tabela 4.16: Informações numéricas da Figura 4.26 referentes ao campo magnético dos três sistemas em análise nesta dissertação para uma resistividade de 2400 Ω .m.

Campo Magnético (µT)	Siste	Sistema 1		ema 2	Sistema 3		
Posição - Valor Máximo	-1 m	1,15	0 m	5,76	0 m	9,18	
0	1,14		5,76		9,18		
Limite: -30	0,19		1,38		2,78		
Limite: +30	0,1	18	1,38		2,78		

É importante destacar, com base nos resultados das simulações apresentados nas Figuras 4.23 a 4.26, as seguintes questões relevantes na consideração do efeito do solo (valores de resistividades acima de 1 Ω .m) nos perfis transversais de campo magnético:

- Determinam o mesmo perfil de campo magnético. Por este motivo, a partir da próxima seção, em todas as simulações é considerado um solo típico do ambiente mineiro (2400 Ωm).
- Promovem uma alteração no formato do perfil transversal do campo magnético. Tal perfil, independentemente de seu formato com o solo modelado como condutor elétrico perfeito, tende para a letra "A". Esta alteração modifica os pontos onde o campo magnético atinge seus valores máximos.
- Tendem a reduzir os valores máximos de campo magnético quando comparados com os associados a solo modelado como condutor elétrico perfeito. Tal comportamento é em função do posicionamento das imagens complexas de corrente, que ficam posicionadas a distâncias bem superiores em relação às correntes nos condutores reais, quando comparadas com as respectivas distâncias envolvidas na modelagem de solo com condutividade infinita.

A influência dos cabos para-raios é apresentada na subseção 4.2.2.2 e verificou-se que sua baixa influência no valor final do campo magnético. Neste momento utiliza-se o Sistema 3 com uma resistividade de 2400 Ω .m para tal análise. A Figura 4.27 retrata os resultados com a presença dos cabos para-raios e sem os mesmos.



Figura 4.27: Análise de sensibilidade do campo magnético em relação à presença dos cabos pararaios para o Sistema 3 com resistividade do solo de 2400 Ω.m.

Analisando-se a Figura 4.27 verifica-se uma redução na ordem de 2% do campo magnético em todo o perfil transversal analisado. A ação da resistividade considerada faz com que o ponto máximo do campo magnético esteja posicionado exatamente abaixo do eixo de simetria da linha de transmissão, ou seja, na posição zero. A Tabela 4.17 apresenta estas informações numericamente.

Tabela 4.17: Informações numéricas da Figura 4.27 referentes ao campo magnético gerado pelo Sistema 3 com e sem os cabos para-raios para uma resistividade de 2400 Ω.m.

Campo Magnótico (uT)	Sistema 3 - Resistividade 2400 ohms.m - Para-Raios						
	Sem	Com	Variação %				
0	9,18	8,98	-2,18%				
Limite: -30	2,78	2,70	-2,88%				
Limite: +30	2,78	2,72	-2,16%				

4.2.3 – Polarização do campo magnético

A polarização de campos, para ser bem definida, necessita ser embasada na teoria eletromagnética. A Figura 4.28 mostra uma onda eletromagnética, transverso-eletromagnética⁵⁴, que se propaga na direção positiva do eixo y, e os campos elétrico (\vec{E}) e magnético (\vec{H}) possuem componentes apenas no plano x - z e podem ser analisados separadamente (desacoplados). Isto significa que, em termos práticos, tais efeitos podem ser modelados e, assim, estudados de forma independente. Contudo, para o estudo e entendimento de polarização é necessário se reportar a alguns conceitos de onda eletromagnética⁵⁵.



Figura 4.28: Onda plana com direção de propagação no eixo y. Fonte: Adaptado de [24].

⁵⁴ Modo de propagação TEM.

⁵⁵ Variação temporal do campo magnético gerando campo elétrico e vice-versa.

De acordo com [84] para uma descrição completa de uma onda eletromagnética necessita-se, também, conhecer sua orientação instantânea dos campos vetoriais elétricos e magnéticos. Define-se polarização da onda como a orientação do seu campo vetorial magnético (ou elétrico) como uma função do tempo, em uma posição determinada no espaço.

O campo eletromagnético, associado às distribuições de cargas e correntes de uma linha de transmissão, corresponde a onda eletromagnética TEM, plana e uniforme⁵⁶. Assim sendo, a onda propaga na direção y e o campo eletromagnético, apesar de pertencer ao plano x - z varia, (em módulo e fase) somente segundo y. Portanto, a Equação (4.4) mostra o fasor do campo magnético, propagando-se ao longo do eixo y⁵⁷.

 $\vec{H} = \left[H_{x0}\,\hat{a}_x + H_{z0}\,\hat{a}_z\right]e^{-\alpha y}e^{-i\beta y}$ (4.4).

Nota-se que a onda eletromagnética, para o campo magnético, pode ser considerada como duas ondas planas e distintas, tendo polarizações em x e z e seus campos magnéticos se somam em fase produzindo, assim, um campo \vec{H} total. Ainda, segundo [84], qualquer estado de polarização pode ser descrito em termos de componentes mutuamente perpendiculares do campo magnético e de suas fases relativas.

No objeto de estudo deste trabalho, linhas de transmissão trifásicas, as correntes estão defasadas entre si de 120 graus, o que implica em um campo magnético, polarizado nas direções x e z, também defasado, fato este que faz com que a onda em questão seja polarizada elipticamente, [58]. A Figura 4.29 representa o comportamento dos componentes do campo magnético, direções x e z, ao longo do tempo (em uma escala de zero segundo a 3 períodos, 3T⁵⁸), na posição 0 m (exatamente abaixo do eixo de simetria da linha de transmissão), a 1 m do solo e a resistividade utilizada tem o valor de 2400 Ω.m. A linha de transmissão corresponde ao Sistema 3. Percebe-se claramente a polarização elíptica do campo magnético. Destaca-se, adicionalmente, que para tal análise a altura observada do campo magnético é de 1 m do solo e os cabos para-raios não são considerados.

Para uma melhor caracterização da polarização elíptica do campo magnético várias elipses são traçadas. A Figura 4.30 ilustra os correspondentes valores dos componentes de campo magnético, nas direções x e z, para cinco posições diferentes ao longo de seu perfil

⁵⁶ Em conceitos físicos mais rigorosos, quase-TEM. A onda é plana, pois a superfície que corresponde à fase constante é um plano. É uniforme porque o campo eletromagnético não varia segundo as variáveis deste plano.

 $[\]frac{57}{\alpha}$ é constante de atenuação [Np/m] e β é a de defasagem [rad/m]. H_{x0} e H_{z0} são, respectivamente, os valores de campo magnético, em x e z, definidos de acordo com a condição de contorno do problema. Uma descrição detalhada do fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas e seu respectivo equacionamento estão fora do escopo desta dissertação. Para detalhes, a referência [84] pode, por exemplo, ser consultada. 58 T = 1/f = 1/60 \approx 17 ms.

transversal (0 m; 6 m; 12 m; 18 m; e 24 m). Percebe-se, naturalmente, mais uma vez, a polarização elíptica do campo magnético⁵⁹.



Figura 4.29: Evolução dos componentes de \vec{B} ao longo do tempo para o Sistema 3.



Figura 4.30: Variação de B_z versus B_x , a cada ciclo, para cinco posições (0, 6, 12, 18 e 24 m), Sistema 3, sem cabos para-raios, resistividade do solo igual a 2400 Ω .m e a 1 metro do solo.

Conforme apresentado no Capítulo 3, o valor do campo magnético para uma análise por meio do "Método das Elipses" é dado pelo valor de amplitude do semieixo maior da elipse. Assim sendo, verifica-se que para a posição 0 m, o valor do campo magnético é de 8,58 µT, muito próximo ao apresentado na Figura 4.26 (9,18 µT), calculado mediante o "Método Aproximado".

⁵⁹ É importante enfatizar que a ponta do campo magnético, em cada ponto do espaço, descreve, a cada ciclo (intervalo de tempo corresponde a um período), uma elipse.

4.3 – Resultados associados à tensão induzida no duto metálico aéreo

4.3.1 – Análise do perfil transversal da tensão induzida no duto metálico aéreo

O objetivo desta subseção é apresentar várias análises de sensibilidade em relação ao que se refere à tensão induzida (V_{fem}) em um duto metálico aéreo posicionado na condição de paralelismo com uma linha de transmissão. Análises de sensibilidade relativas à geometria da linha de transmissão, com a presença dos cabos para-raios, com a variação da resistividade do solo e, também, à altura relativa dos dutos em relação ao solo são feitas nas subseções 4.3.1.1, 4.3.1.2, 4.3.1.3 e 4.3.1.4, respectivamente, e seus resultados são apresentados por meio de gráficos e tabelas numéricas. Os valores de tensão induzida são

fornecidos em $\left[\frac{V}{kA \ x \ km}\right]^{60}$ e, com exceção da análise de sensibilidade em relação à altura

do duto, todas as outras são realizadas considerando uma altura de 1 metro do duto em relação ao solo, [85].

Os resultados associados à avaliação da tensão induzida no duto permitem, posteriormente, avaliar os valores de correntes induzidas em corpos em contato eventual com o duto.

4.3.1.1 – Sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão

A sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão, no que se refere à tensão induzida em um duto posicionado a 1 metro de altura e na condição de paralelismo em relação à linha, é feita de duas maneiras.

Inicialmente, a avaliação da tensão induzida nos dutos é realizada tendo com base os três sistemas reais considerados nesta dissertação, os quais estão devidamente detalhados no Capítulo 2 e resumidamente descritos na seção anterior do atual capítulo.

A Figura 4.31 ilustra o gráfico da tensão induzida em um duto metálico, nas condições citadas acima. Considera-se, hipoteticamente, que o duto está situado em cada

⁶⁰ Tensão induzida em volts por kA de intensidade de corrente na linha de transmissão e por km de comprimento do duto.

posição ao longo do perfil transversal. Os cabos para-raios não são considerados e o solo é modelado como ideal (resistividade = 0).



Figura 4.31: Análise de sensibilidade da tensão induzida nos dutos a 1 metro do solo, sem os cabos para-raios, para os Sistemas 1,2 e 3.

Analisando o gráfico da Figura 4.31 verifica-se que o perfil da tensão induzida é semelhante ao perfil de campo magnético, que é representado na Figura 4.16. Este fato se justifica pela da Lei da indução magnética de Faraday, que de acordo com a Equação 3.1 desta dissertação nota-se que a superfície enlaçada pelos três sistemas é a mesma, o que sofre alteração é o valor do campo magnético. Portanto, a tensão induzida é afetada diretamente pelo aumento desse valor de campo magnético. A Tabela 4.18 traduz informações numéricas sobre o gráfico da Figura 4.31.

Tabela 4.18: Informações numéricas da Figura 4.31 referentes à tensão induzida nos dutos dos Sistemas 1,2 e 3 sob estudo nesta dissertação.

Tensão Induzida [V/(kA x km)]	Sistema 1		Siste	ma 2	Sistema 3		
Posição - Valor Máximo	- 6 m	0,52	- 12 m	2,63	- 13,5 m	4,23	
Posição - Valor Máximo	+ 8 m	0,43	+ 12 m	2,63	+13,5 m	4,23	
0	0,3	32	1,42		2,13		
Limite: -30	0,10		0,82		1,80		
Limite: +30	0,1	1	0,82		1,80		

Assim como na análise do perfil do campo magnético, para uma caracterização completa sobre a influência da geometria da linha de transmissão em relação à tensão induzida nos dutos, são acrescentados os Sistemas 4, 5 e 6, devidamente descritos

geométrica e eletricamente na subseção 4.2.2.1 desta dissertação. Por opção do autor uma mesma corrente no valor de 1000 A é aplicada a todas às configurações (6 Sistemas). Os cabos para-raios não são incluídos e o solo é considerado ideal.

Sendo assim, a Figura 4.32 mostra o perfil transversal da tensão induzida nos dutos para os seis sistemas mencionados anteriormente.



Figura 4.32: Análise de sensibilidade da tensão induzida nos dutos a 1 metro do solo, sem os cabos para-raios, para os seis sistemas.

A análise da Figura 4.32 permite visualizar que, para todos os sistemas, a tensão induzida acompanha o perfil do campo magnético, conforme destacado acima. Para o Sistema 5, verifica-se o menor valor de tensão induzida, fato este que se justifica pelo sistema estar configurado em duplo vertical com simetria de fases, o que resulta na diminuição do campo magnético e, consequentemente, em uma tensão induzida menor. Verifica-se, também, para o Sistema 5 que seu valor é praticamente constante para todo o perfil. Já o Sistema 6, configurado em delta invertido, possui um perfil diferente dos outros sistemas, (em forma de "A"; os outros são em forma de "M"), evidenciando a influência da geometria da linha de transmissão nos valores de tensão induzida.

Conclui-se que pela Figura 4.32 que a geometria da linha, como esperado, influencia diretamente os valores da tensão induzida em dutos posicionados na faixa de passagem da linha de transmissão e na condição de paralelismo com a mesma.

A Tabela 4.19 traduz informações numéricas sobre o gráfico da Figura 4.32 para os seis sistemas em questão.

Tensão Induzida [V/(kA x km)]	Sistema 1		Sistema 2		Sistema 3	
Posição - Valor Máximo	- 6 m	3,58	- 12 m	6,30	- 13,5 m	5,05
Posição - Valor Máximo	+ 8 m	2,96	+12 m	6,30	+ 13,5 m	5,05
0	2,19		3,41		2,54	
Limite: -30	0,69		1,96		2,15	
Limite: +30	0,70		1,96		2,15	
	Sistema 4					
Tensão Induzida [V/(kA x km)]	Sistem	a 4	Sisten	na 5	Sister	ma 6
Tensão Induzida [V/(kA x km)] Posição - Valor Máximo	Sistem - 11,5 m	a 4 3,83	Sisten - 12,5 m	n a 5 1,18	Sister 0 m	m a 6 4,66
Tensão Induzida [V/(kA x km)] Posição - Valor Máximo Posição - Valor Máximo	Sistem - 11,5 m + 11,5 m	a 4 3,83 3,83	Sisten - 12,5 m +12,5 m	n a 5 1,18 1,18	Sister 0 m 0 m	ma 6 4,66 4,66
Tensão Induzida [V/(kA x km)]Posição - Valor MáximoPosição - Valor Máximo0	Sistem - 11,5 m + 11,5 m 1,24	a 4 3,83 3,83	Sisten - 12,5 m +12,5 m 1,04	n a 5 1,18 1,18 4	Sister 0 m 0 m 4,6	ma 6 4,66 4,66
Tensão Induzida [V/(kA x km)]Posição - Valor MáximoPosição - Valor Máximo0Limite: -30	Sistem - 11,5 m + 11,5 m 1,24 1,47	a 4 3,83 3,83	Sisten - 12,5 m +12,5 m 1,04 0,3	na 5 1,18 1,18 4 7	Sister 0 m 0 m 4,6 2,1	ma 6 4,66 4,66 66 8

Tabela 4.19: Informações numéricas da Figura 4.32 referentes à tensão induzida nos dutos dos seis sistemas em análise nesta dissertação para avaliação da sensibilidade quanto à geometria da linha de transmissão.

De forma similar à análise da influência da geometria da linha no perfil de campo magnético, é importante verificar que uma determinada escolha da configuração geométrica de linha pode impactar positivamente (menor tensão induzida) em um duto metálico paralelo à linha em questão.

4.3.1.2 – Sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios

Nesta subseção o objetivo é mostrar a influência dos cabos para-raios e suas correntes induzidas no valor final da tensão induzida nos dutos posicionados a 1 metro de altura e em paralelismo com a linha de transmissão. Como visto na subseção 4.2.2.2, os cabos para-raios não têm influência significativa no valor do campo magnético final. Observa-se que, naturalmente, a tensão induzida também deve seguir a mesma tendência qualitativa de variação do campo magnético com a inclusão dos cabos para-raios.

As análises de sensibilidade quanto à presença dos cabos para-raios são realizadas para os Sistemas 1, 2 e 3 e são ilustradas nas Figuras 4.33, 4.34 e 4.35, respectivamente, e seus resultados numéricos são mostrados nas Tabelas 4.17, 4.18 e 4.19. Percebe-se que, de um modo geral, as mesmas interpretações físicas realizadas para a explicação do comportamento de campo magnético são válidas para o comportamento da tensão induzida. Na obtenção destes resultados o solo é modelado como um condutor elétrico perfeito (resistividade = 0).



Figura 4.33: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 1.

Tabela 4.20: Informações numéricas	da Figura 4.33	referentes	à tensão	induzida	nos (dutos d	ot
	Sistema 1						

	Sistema 1 - Para-Raios						
	Sem		Com		Variação %		
Posição - Valor Máximo	- 6 m	0,52	- 6 m	0,55	5,77%		
Posição - Valor Máximo	+ 8 m	0,433	+ 8 m	0,430	-0,69%		
0	0,32		0,36		12,50%		
Limite: -30	0,101		0,099		-1,98%		
Limite: +30	0,102		0,093		-8,82%		



Figura 4.34: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 2.

	Sistema 2 - Para-Raios						
	Sem		Com		Variação %		
Posição - Valor Máximo	- 12 m	2,63	- 12 m	2,40	-8,75%		
Posição - Valor Máximo	+ 12 m	2,63	+ 12 m	2,43	-7,60%		
0	1,42		1,34		-5,63%		
Limite: -30	0,82		0,71		-13,41%		
Limite: +30	0,82		0,73		-10,98%		

Tabela 4.21: Informações numéricas da Figura 4.34 referentes à tensão induzida nos dutos do Sistema 2.

Sistema 3 - Tensão Induzida nos Dutos 4.5 Com Para Raios Tensão Induzida Vfem - [V/(kA x km)] Sem Para Raios 3.5 3 2.5 2 1.5 L -30 -20 20 -10 0 10 30 Perfil Transversal [m]

Figura 4.35: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 3.

	Sistema 3 - Para-Raios						
	Sem		Com		Variação %		
Posição - Valor Máximo	- 13,5 m	4,23	- 13,5 m	4,16	-1,65%		
Posição - Valor Máximo	+13,5 m	4,23	+13,5 m	4,18	-1,18%		
0	2,13		2,03		-4,69%		
Limite: -30	1,80		1,74		-3,33%		
Limite: +30	1,80		1,76		-2,22%		

Tabela 4.22: Informações numéricas da Figura 4.35 referentes à tensão induzida nos dutos do Sistema 3.

Uma última análise é feita para o Sistema 3 com a inclusão do solo com uma resistividade de 2400 Ω.m e seus resultados são apresentados graficamente na Figura 4.36 e numericamente na Tabela 4.23.



Figura 4.36: Análise de sensibilidade da tensão induzida em relação à presença dos cabos para-raios para o Sistema 3 com resistividade do solo de 2400 Ω.m.

Ao analisar o perfil da tensão induzida para o Sistema 3 (Figura 4.36) nota-se um aumento significativo no valor de tensão induzida nos dutos ao longo do perfil transversal, quando comparado com os resultados expressos na Figura 4.35 e na Tabela 4.22 (solo modelado como um condutor elétrico perfeito). Tal fato se justifica pelo seguinte: a modelagem do solo como ideal faz com que a distância entre o condutor imagem e o real seja igual ao dobro da altura deste último (2 h); por outro lado, a consideração do solo mediante a profundidade complexa "p" (A. Deri) faz com que a distância entre o condutor imagem, que tende a diminuir os níveis de tensão induzida no duto, é sensivelmente menor no caso das imagens complexas. Análises detalhadas desta interessante questão podem ser encontradas em [49]. A Tabela 4.23 traduz informações numéricas sobre o gráfico da Figura 4.36.

Tabela 4.23: Informações numéricas da Figura 4.36 referentes à tensão induzida nos dutos do Sistema 3 para uma resistividade do solo igual a 2400 Ω.m.

	Sistema 3 - Resistividade 2400 ohms.m - Para-Raios						
	Sem		Com		Variação %		
Posição - Valor Máximo	- 18,5 m	33,87	- 18,5 m	33,38	-1,45%		
Posição - Valor Máximo	+18,5 m	33,87	+18,5 m	33,23	-1,89%		
0	11,41		6,64		-41,81%		
Limite: -30	29,60		29,20		-1,35%		
Limite: +30	29,60		29,03		-1,93%		

Pelos valores da Tabela 4.23 verifica-se que o posicionamento dos valores máximos também é alterado (comparar com os valores da Tabela 4.22). Mas, a variação em relação à presença e não presença dos cabos para-raios permanece baixa.

Uma última análise, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.24, é elaborada para mostrar numericamente que a inclusão do efeito do solo, comparativamente com a não inclusão do mesmo, afeta de maneira incisiva nos valores máximos de tensão induzida. Esta tabela simplesmente reúne os resultados mostrados na Tabela 4.22 e Tabela 4.23. Conforme já destacado anteriormente, verifica-se um aumento significativo nos valores da tensão induzida nos dutos no perfil transversal em análise.

	Sistema 3 - Com Para-Raios							
Tensão Induzida [V/(kA x km)]	Solo Ideal		Resistividade 2400 ohms.m		Variação %			
Posição - Valor Máximo	- 13,5 m	4,16	- 18,5 m	33,38	702,40%			
Posição - Valor Máximo	+13,5 m	4,18	+18,5 m	33,23	694,98%			
0	2,03		6,64		227,09%			
Limite: -30	1,74		29,20		1578,16%			
Limite: +30	1,76		29,0	3	1549,43%			

Tabela 4.24: Informações numéricas da comparação dos valores máximos do Sistema 3 com e sem a inclusão do efeito do solo na tensão induzida.

Ao analisar os dados da Tabela 4.24 é nítida a percepção de que, ao incluir o efeito do solo, o valor da tensão induzida aumenta significativamente, fato este devido a profundidade complexa acrescentada à consideração da área enlaçada pelo fluxo magnético variável no tempo (somada às interpretações apresentadas anteriormente).

4.3.1.3 – Sensibilidade em relação à resistividade elétrica do

solo

Nesta subseção a análise de sensibilidade é feita de acordo com a variação da resistividade elétrica do solo. A mesma aproximação utilizada para "p", da subseção 4.2.2.3, é adotada para os cálculos de tensão induzida.

A análise de sensibilidade do perfil transversal de tensão induzida é feita, inicialmente, para os três sistemas sob estudo nesta dissertação e considerando a ausência de cabos para-raios e vários valores de resistividade. Por fim, uma análise é feita para o Sistema 1, com a inclusão dos cabos para-raios e valor de resistividade 2400 Ω.m.
A Figura 4.37 ilustra os resultados considerando o Sistema 1, para diversos valores de resistividade elétrica do solo.





Nota-se que para as resistividades acima de 1 Ω.m todas as curvas ficam sobrepostas. O Sistema 1 possui uma configuração assimétrica de fases o que reporta a assimetria que se verifica no gráfico.

A Figura 4.38 apresenta os resultados para o Sistema 2, em função resistividade elétrica do solo.



Figura 4.38: Perfil da tensão induzida nos dutos para do Sistema 2 com várias resistividades do solo.

Percebe-se que, para valores de resistividade acima de 1 Ω .m, todas as curvas ficam sobrepostas.

Por fim, a análise para várias resistividades é feita para o Sistema 3, conforme ilustrado na Figura 4.39.





Figura 4.39: Perfil da tensão induzida nos dutos para do Sistema 3 com várias resistividades do solo.

O Sistema 3 acompanha a conclusão realizada para o Sistema 2, visto que para resistividades acima de 1 Ω .m todas as curvas ficam sobrepostas.

Neste ponto, é importante tecer os seguintes comentários em relação ao perfil de tensão induzida:

- Diferentemente dos perfis de campo magnético, percebe-se que a consideração de resistividades diferentes de zero, na modelagem do solo, acarreta aumentos nos níveis de tensão induzida, cuja explicação física está antecipada na subseção anterior.
- Da mesma forma que ocorre com os perfis de campo magnético, a influência da resistividade do solo não promove aumento constante nos níveis de tensão induzida; a tendência é que ocorra uma "saturação". Fato este se deve por ao considerar o método das imagens complexas, o valor de "p" fica extremamente distante do ponto de observação e assim pouco influenciam no valor da tensão induzida.
- A resistividade do solo promove uma mudança no formato do perfil transversal da tensão induzida, qual seja: de "M" (solo ideal) para próximo de "V".

A título de comparação, na Figura 4.40 são mostrados os perfis de tensão induzida para os três sistemas e solo com resistividade de 2400 Ωm, sem a presença dos cabos para-raios.



Figura 4.40: Perfil da tensão induzida nos dutos para os Sistemas 1, 2 e 3 com resistividade do solo de 2400 Ω.m.

Uma última análise é realizada para o Sistema 1, qual seja: inclusão dos cabos pararaios e mantida resistividade de 2400 Ω.m. Os resultados são exibidos na Figura 4.41. Percebe-se, em função da assimetria geométrica do sistema, uma significativa influência das correntes induzidas nos cabos para-raios nos níveis de tensão induzida.

É oportuno, neste momento, tecer o seguinte comentário em relação à presença dos cabos para-raios (nos perfis de tensão induzida e de campo magnético):

Nas deduções apresentadas no Capítulo 3, norteadas pelas premissas e limites de validade estabelecidos no mesmo capítulo, desconsidera-se os valores de resistência de aterramento, tipicamente compreendidos na faixa de 20 a 100 Ω⁶¹. Caso um valor mínimo seja incorporado nos cálculos, a influência dos cabos para-raios alcança limites máximos de 2%. Desta forma, todas as análises de sensibilidade apresentadas nesta dissertação, relativas à possível influência dos cabos para-raios, corresponde às máximas diferenças (postura conservadora).

⁶¹ Evidentemente, os valores de resistência de aterramento dependem da resistividade do solo local e da configuração geométrica do sistema de aterramento das torres do sistema de transmissão.



Figura 4.41: Perfil da tensão induzida nos dutos para o Sistema 1 com resistividade do solo de $2400 \ \Omega$.m e inclusão dos cabos para-raios.

4.3.1.4 – Sensibilidade em relação à altura do duto metálico em relação ao solo

A presente subseção busca realizar a análise de sensibilidade do perfil de tensão induzida em função da variação da altura dos dutos em relação ao solo. As alturas consideradas são 1, 3 e 5 metros. Evidentemente, em termos práticos, altura dos dutos acima de 2 metros é inviável. Contudo, a consideração de alturas maiores é somente para fins ilustrativos. O Sistema 3 é utilizado para tal análise. As correntes nos cabos para-raios são consideradas, bem como a resistividade do solo no valor de 2400 Ω .m é utilizada.

Diante do exposto, a Figura 4.42 mostra o perfil transversal de tensão induzida com as alturas informadas anteriormente.



Figura 4.42: Perfil da tensão induzida nos dutos para o Sistema 3 com resistividade do solo de 2400 Ω.m, com inclusão dos cabos para-raios e variação da altura dos dutos.

A Tabela 4.25 mostra numericamente os valores de tensão induzida no duto para determinadas posições ao longo do perfil transversal.

Tensão Induzida [V/(kA x km)]	Sistema 3 - Resistividade 2400 ohms.m – Com Para-Raios - Variação da Altura dos Dutos					
	1 metro		3 metros		5 metros	
Posição - Valor Máximo	- 18,5 m	33,38	- 17 m	37,68	- 15,5 m	43,18
Posição - Valor Máximo	+18,5 m	33,23	+17 m	37,55	+15,5 m	43,07
0	6,64		9,48		13,49	
Limite: -30	29,20		30,94		32,63	
Limite: +30	29,03		30,78		32,49	

Tabela 4.25: Informações numéricas da tensão induzida com a variação da altura dos dutos para o Sistema 3.

Os resultados apresentados na Figura 4.42 e Tabela 4.25 possuem, naturalmente, consistência física, pois à medida que a altura do duto aumenta o mesmo fica mais próximo da fonte e, assim, os níveis de campo magnético e tensão induzida tendem a aumentar.

4.4 – Resultados associados à avaliação da tensão transversal e corrente longitudinal no duto

4.4.1 – Análise da tensão transversal e corrente longitudinal no duto

As subseções seguintes têm como objetivo realizar várias análises de sensibilidade no que diz respeito à tensão transversal sobre o duto metálico (ou simplesmente "tensão do duto") e, também, a corrente longitudinal induzida no mesmo (ou, meramente, "corrente no duto"). As análises são realizadas em função da geometria da linha de transmissão, da presença ou não dos cabos para-raios, da resistividade elétrica do solo e em relação ao posicionamento e configuração geométrica do duto metálico. Tais análises são apresentadas, respectivamente, nas subseções 4.4.1.1, 4.4.1.2, 4.4.1.3 e 4.4.1.4. Os resultados associados à referida avaliação são apresentados na forma de gráficos e tabelas numéricas. Os valores de tensão do duto são apresentados em volts [V] e os de corrente no duto em [mA]⁶².

As análises de sensibilidade são processadas levando em conta três situações práticas referentes aos dutos metálicos, envolvendo seu aterramento e percurso paralelo à linha de transmissão. As três situações, denominadas casos A, B e C, são descritas a seguir e determinam as soluções das Equações (3.65)⁶³ e, em seguida, da Equação (3.64).

(i) Caso A

O duto se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão e não é aterrado em nenhum ponto. Ademais, em seus extremos, segue um percurso transversal à linha. A Figura 4.43 ilustra esta situação.



Figura 4.43: Duto metálico se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão sem que o mesmo possua algum aterramento. Fonte: Adaptado de [56].

⁶² Os valores de corrente no duto são expressos em mA para facilidade de comparações numéricas com os estabelecidos pelas normas técnicas.

 $^{^{63}}$ Vale frisar que a Equação (3.65) terá solução única somente se forem impostas as devidas condições de contorno ou de interface (Teorema da Unicidade). São justamente estas condições de contorno que são "impostas" pelos casos A, B e C. Após a determinação de V_D(y), basta substituí-lo na Equação (3.64) para cálculo de I(y).

Ao aplicar as condições de contorno⁶⁴ na situação física descrita na Figura 4.43, obtêm-se as expressões de $V_D(y)$ e I(y), conforme Equações (4.5) e (4.6), [56]⁶⁵.

$$V_{\rm D}(\mathbf{y}) = \frac{V_{\rm fem}}{2\gamma} \left(\mathbf{e}^{-\gamma(L_{\rm D}-\mathbf{y})} - \mathbf{e}^{-\gamma\mathbf{y}} \right)$$
(4.5),

$$I(y) = \frac{V_{fem}}{2Z} \left(2 - e^{-\gamma(L_D - y)} - e^{-\gamma y} \right)$$
(4.6).

É importante conhecer o valor máximo da tensão do duto (determinada nos extremos do duto com y = 0 e y = L). Tal valor é expresso pela Equação (4.7).

$$V_{\text{DMAX}} = \frac{V_{\text{fem}}}{2\gamma} \left(1 - e^{-\gamma L_{\text{D}}} \right)$$
(4.7).

(ii) Caso B

O duto se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão, sendo que em uma extremidade o mesmo segue um caminho transversal à linha e, em outra, é simplesmente interrompido. Na extremidade em que o duto é interrompido não existe aterramento. A Figura 4.44 ilustra esta situação.



Figura 4.44: Duto metálico se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão e é finalizado em uma das extremidades. Fonte: Adaptado de [56].

A situação apresentada no Caso B também é alvo da análise das condições de contorno⁶⁶ descritas anteriormente e, assim, é possível obter as Equações (4.8) e (4.9) às quais retratam a formulação matemática que traduz a informação relativa à tensão do duto $V_D(y)$ e à corrente no mesmo, I(y), [56].

$$V_{\rm D}(y) = \frac{V_{\rm fem}}{2\gamma} \left[e^{\gamma y} \left(2e^{-\gamma L_{\rm D}} - e^{-2\gamma L_{\rm D}} \right) - e^{-\gamma y} \right]$$
(4.8),

$$I(y) = \frac{V_{fem}}{2Z} \Big[2 + e^{\gamma(y - 2L_D)} - 2e^{\gamma(y - L_D)} - e^{-\gamma y} \Big]$$
(4.9).

⁶⁴ Caso A: A impedância do início do duto (y = 0) e do final do duto (y = L_D) são iguais a impedância característica do mesmo. ⁶⁵ As expressões que quantificam os valores de Z e Y correspondem, respectivamente, às

⁵⁵ As expressões que quantificam os valores de Z e Y correspondem, respectivamente, às Equações (3.66) e (3.68). Assim, $\gamma = \sqrt{ZY}$ e L_D é o comprimento do duto.

⁶⁶ Caso B: A impedância do início do duto (y = 0) é igual à impedância característica do duto e a impedância do final do duto (y = L_D) tem um valor extremamente superior aos outros, tendendo a infinito, pois o duto é interrompido e não aterrado.

Assim como no Caso A, é possível calcular, para o Caso B, mediante Equação (4.10) o valor da tensão máxima no duto (localizada no ponto de interrupção do duto, ou seja, com y = L).

$$V_{\text{DMAX}} = \frac{V_{\text{fem}}}{\gamma} \left(1 - e^{-\gamma L_{\text{D}}} \right)$$
(4.10).

(iii) Caso C

Este caso é similar ao Caso B. Contudo, o terminal que está aberto no Caso B passa, neste caso, a estar aterrado. A Figura 4-45 ilustra esta situação.



Figura 4.45: Duto metálico se estende por alguns quilômetros em paralelo com a linha de transmissão e é aterrado em uma das extremidades. Fonte: Adaptado de [56].

Por fim, é oportuno retratar, para o Caso C, que as equações que determinam a tensão do duto, $V_D(y)$, e a corrente no mesmo, I(y), correspondem às Equações (4.11) e (4.12), [56] às quais são determinadas também aplicando-se determinadas condições de contorno⁶⁷.

$$V_{\rm D}(y) = \frac{V_{\rm fem}}{2\gamma} \left(e^{\gamma(L_{\rm D}-y)} - e^{-\gamma(L_{\rm D}-y)} \right) e^{-\gamma L_{\rm D}}$$
(4.11),

$$I(y) = \frac{V_{fem}}{2Z} \left[2 - \left(e^{\gamma(L_D - y)} + e^{-\gamma(L_D - y)} \right) e^{-\gamma L_D} \right]$$
(4.12).

Notadamente, o Caso C é passivo de cálculo também do valor máximo da tensão do duto (posicionada no início do duto, notadamente com y = 0), onde a mesma é retratada pela Equação (4.13).

$$V_{\text{DMAX}} = \frac{V_{\text{fem}}}{2\gamma} \left(1 - e^{-\gamma L_{\text{D}}} \right)$$
(4.13).

⁶⁷ Caso C: A impedância do início do duto (y = 0) é igual à impedância característica do duto e a impedância do final do duto (y = L_D) é igual a zero pois o duto está aterrado nesse ponto.

4.4.1.1 – Sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão

A análise de sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão é feita utilizando os seis sistemas devidamente caracterizados na subseção 4.2.2.1.

Para realizar a referida análise é necessário definir algumas características tais como a seguir:

- Distância horizontal do duto em relação ao centro da linha de transmissão é de 20 metros;
- Altura do duto é de 1 metro do seu centro até o solo;
- Resistividade do solo é de 2400 Ω.m. (valor médio do estado de Minas Gerais)
- Diâmetro do duto é de 50 cm;
- Resistividade do duto de aço é de 0,17x10⁻⁶ Ω.m;
- Permeabilidade magnética relativa do duto de aço é de 300;
- Duto se estende por 10 km paralelo à linha de transmissão;
- Correntes induzidas nos cabos para-raios não são consideradas;
- Corrente de operação utilizada é de 1000 A⁶⁸.

Assim, as Figuras 4.46 a 4.51 ilustram, respectivamente, os pares "tensão e corrente no duto" para os casos A, B e C.



Figura 4.46: Caso A, tensão do duto para os seis sistemas.



⁶⁸ A corrente nos condutores da linha de transmissão é fixada em 1000 A porque o objetivo desta subseção é a análise de sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha.





Figura 4.48: Caso B, tensão do duto para os seis sistemas.



Figura 4.50: Caso C, tensão do duto para os seis sistemas.





Figura 4.51: Caso C, corrente no duto para os seis sistemas.

Conclui-se, naturalmente, que a geometria da linha de transmissão influi diretamente no valor da tensão do duto e, consequentemente, na corrente no duto. O Sistema 2 apresenta os maiores valores de tensão e de corrente; tal fato está associado com a menor distância entre a fonte e o ponto de observação. Para todos os gráficos, os perfis longitudinais de tensão e corrente no duto seguem a mesma tendência qualitativa, pois são parâmetros influenciados diretamente pela geometria bem como pelos efeitos da mesma. Vale frisar que o comportamento das tensões e correntes no duto seguem, evidentemente, as condições de contorno impostas em cada caso analisado.

4.4.1.2 – Sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios

A análise de sensibilidade em relação às correntes induzidas nos cabos para-raios é feita utilizando os mesmos parâmetros descritos anteriormente, com o acréscimo das correntes induzidas nos cabos para-raios. Os sistemas em análise são os três devidamente descritos no Capítulo 2 desta dissertação, cada um deles com sua corrente normal de operação.

Portanto, as Figuras 4.52 a 4.63 ilustram, respectivamente, para cada sistema, a tensão e corrente no duto para os casos A, B e C.



Figura 4.52: Casos A, B e C tensão do duto para o Sistema 1.





Figura 4.53: Caso A, corrente no duto para o Sistema 1.





Figura 4.56: Casos A, B e C tensão do duto para o Sistema 2.



Figura 4.58: Caso B, corrente no duto para o Sistema 2.



Figura 4.60: Casos A, B e C tensão do duto para o Sistema 3.



Figura 4.57: Caso A, corrente no duto para o Sistema 2.



Figura 4.59: Caso C, corrente no duto para o Sistema 2.



Figura 4.61: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3.



As análises de sensibilidade exibidas anteriormente permitem verificar que a consideração dos cabos para-raios, para sistemas simétricos, promove uma redução da tensão do duto e sua corrente, como nota-se nos Sistemas 2 e 3. O Sistema 1, por ser assimétrico, o aumento ou diminuição das grandezas em questão irá dependendo da posição em análise do duto visto que a mesma depende dos valores de tensão induzida.

4.4.1.3 – Sensibilidade em relação à resistividade elétrica do

solo

A presente subseção realiza a análise de sensibilidade da tensão do duto e sua corrente em função da resistividade elétrica do solo. A análise é realizada utilizando os mesmos parâmetros da subseção 4.4.1.1 com a variação da resistividade elétrica do solo.

Assim, as Figuras 4.64 a 4.81 ilustram, respectivamente, a tensão do duto e corrente no duto para os três sistemas sob estudo desta dissertação, nos casos A, B e C.



Figura 4.64: Caso A, tensão do duto para o Sistema 1.











Figura 4.68: Caso B, corrente no duto para o Sistema 1.



Figura 4.70: Caso A, tensão do duto para o Sistema 2.

Sistema 1 - I com Variação da Resistividade do Solo - Caso A 0.1 0.18 0.16 0.1 Resistividade = 0 Resistividade = 0.01 0 [mA] Resistividade = 0.1 Ο. Resistividade = 1 <u>ک</u> ۵.08 Resistividade = 50 Resistividade = 100 Resistividade = 1000 0.06 Resistividade = 5000 Resistividade = 10000 0.04 0.02 0 L 0 8000 9000 10000 1000 5000 7000 2000 3000 4000 6000 Perfil Longitudinal [m]

Figura 4.67: Caso A, corrente no duto para o Sistema 1.



Figura 4.69: Caso C, corrente no duto para o Sistema 1.



Figura 4.71: Caso B, tensão do duto para o Sistema 2.







Figura 4.74: Caso B, corrente no duto para o Sistema 2.



Figura 4.76: Caso A, tensão do duto para o Sistema 3.







Figura 4.75: Caso C, corrente no duto para o Sistema 2.



Figura 4.77: Caso B, tensão do duto para o Sistema 3.



20

l(y) - [mA]



Figura 4.80: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3.

0 0 1000 2000 3000 4000 5000 6000 7000 8000 9000 10000 Perfil Longitudinal [m]

Resistividade = 0.1

Resistividade = 1

Resistividade = 50 Resistividade = 100 Resistividade = 1000

Resistividade = 5000 Resistividade = 10000

Figura 4.81: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3.

Verifica-se que, para todas as situações acima ilustradas, tanto a tensão quanto a corrente no duto apresentam os mesmos comportamentos (qualitativos e quantitativos) para valores de resistividade acima de 1 Ω .m, pois para todos os outros valores de resistividade as curvas estão sobrepostas ou com valor muito próximo umas das outras. É importante mencionar uma diferença dos comportamentos de V_D(y), I(y) e V_{fem}, em relação à resistividade do solo, quando comparados com o do campo magnético. Enquanto o campo diminui com o aumento da resistividade (fato já explicado), V_D(y), I(y) e V_{fem} (devidamente analisado) aumentam.

4.4.1.4 – Sensibilidade em relação ao posicionamento e a configuração geométrica do duto

As análises de sensibilidade em relação ao posicionamento e configuração geométrica do duto são feitas utilizando-se os seguintes parâmetros:

- Sistema 3 sob estudo desta dissertação devidamente descrito no Capítulo 2;
- Resistividade do solo de 2400 Ω.m;
- Resistividade do duto de aço de $0,17 \times 10^{-6} \Omega.m$;
- Permeabilidade magnética relativa do duto de aço de 300;
- Duto se estende por 10 km paralelo à linha de transmissão;
- Correntes induzidas nos cabos para-raios são consideradas.

(i) Sensibilidade em relação à distância do centro da linha de transmissão ao duto

Para realizar a referida análise, as distâncias em questão são 10 metros, 15 metros e 20 metros em relação ao centro da linha de transmissão. Neste caso a altura do duto em relação ao solo é de 1 metro e o diâmetro do duto é de 50 cm.

Assim, as Figuras 4.82 a 4.85 ilustram, respectivamente, a tensão do duto para os casos A, B e C bem como a corrente no duto para os casos A, B e C para o Sistema 3.



Figura 4.82: Casos A, B e C, tensão do duto para o Sistema 3.



Figura 4.83: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3.



Figura 4.84: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3.



Via influência do posicionamento do duto em relação à linha de transmissão, mostrada nas figuras anteriores, é possível notar que a posição do duto afeta diretamente o valor da tensão do mesmo, bem como a corrente. O fato de o duto estar mais longe ou mais perto não significa uma maior ou menor tensão/corrente, pois tais valores são em função do campo magnético e tensão induzida presentes no duto, os quais variam com a geometria, resistividade do solo e correntes induzidas nos cabos para-raios (vide, por exemplo, a Figura 4.40). Destaca-se, ainda, a dependência da tensão e corrente no duto em relação aos parâmetros eletromagnéticos do duto (Z, Y e γ).

(ii) Sensibilidade em relação à altura do centro do duto em relação ao solo

A análise de sensibilidade em relação à altura dos dutos é feita utilizando-se alturas de 1 metro, 3 metros e 5 metros do centro do duto até o solo. O posicionamento horizontal do duto considerado é de 20 metros do centro da linha de transmissão e seu diâmetro é de 50 cm.

Assim, as Figuras 4.86 a 4.89 ilustram, respectivamente, a tensão do duto, bem como a corrente no duto, para os casos A, B e C.







Figura 4.88: Caso B, corrente no duto para o Sistema 3.

Figura 4.87: Caso A, corrente no duto para o Sistema 3.



Figura 4.89: Caso C, corrente no duto para o Sistema 3.

Assim como na análise em relação ao posicionamento do duto, a altura também influencia diretamente nos valores de tensão no duto. Vale frisar que a tensão no duto aumenta com a altura do duto, enquanto a corrente diminui. Este comportamento está, novamente, relacionado com a dependência de ambas em relação à V_{fem} e aos parâmetros eletromagnéticos do duto.

(iii) Sensibilidade em relação ao diâmetro do duto

A análise de sensibilidade em relação ao diâmetro dos dutos é feita utilizando-se diâmetros de 30 cm e 50 cm, a uma altura de 1 metro em relação ao solo e na posição horizontal de 20 metros em relação ao centro da linha de transmissão. Diâmetros fora deste padrão implicam em valores em não conformidade com a realidade.

Portanto, as Figuras 4.90 a 4.93 ilustram, respectivamente, a tensão no duto para os casos A, B e C e também a corrente no duto para os mesmos casos.

10000

0.1

0.05

0

2000



Nota-se a influência pouco significativa do diâmetro do duto no que diz respeito à tensão no mesmo. Contudo, a corrente no duto varia de forma expressiva com o diâmetro do duto. Tal comportamento é fruto da dependência dos parâmetros eletromagnéticos do duto em relação ao seu diâmetro.

24

23

22 L 0

1000

2000 3000 4000 5000 6000

7000 8000 9000 10000

Perfil Longitudinal [m]

Figura 4.93: Caso C, corrente no duto para o

Sistema 3.

4.4.2 – Aspectos de Segurança Pessoal

8000 9000

7000

3000 4000 5000 5000 Perfil Longitudinal [m]

Figura 4.92: Caso B, corrente no duto para o

Sistema 3.

No estudo da susceptibilidade de seres humanos em relação aos níveis de tensão e corrente no duto, oriundos do acoplamento magnético entre linhas de transmissão e dutos metálicos, as normas técnicas apresentam, via de regra, limites de suportabilidade aos valores de tensão e não aos de corrente, [56]⁶⁹. Assim, em condições de regime

⁶⁹ Por outro lado, para acoplamento elétrico os limites são estabelecidos em função dos níveis de corrente, [11], [56].

permanente, as normas estabelecem que medidas de segurança devam ser tomadas quando os níveis de tensão no duto exceder valores eficazes entre 50 e 65 V, [56]. Pelos resultados apresentados nesta seção (4.4), verifica-se que, em diversas situações, estes níveis foram atingidos e mesmo superados. Umas das técnicas utilizadas para mitigação dos valores de tensão no duto correspondem ao aterramento do duto em diversos pontos ao longo do mesmo. Estes diversos pontos de aterramento impedem o crescimento das tensões ao longo do duto. O projeto dos sistemas de aterramento em questão, associado ao seu impacto no sistema em geral (transmissão e duto) está fora do escopo desta dissertação.

4.5 – Conclusão

O presente capítulo apresenta várias análises de sensibilidade de interesse prático, às quais são aplicadas na avaliação da interação magnética entre uma linha de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos.

Inicialmente, é feita a validação dos resultados obtidos em relação ao campo magnético a qual é realizada por meio de comparações com resultados de medições divulgados na literatura e, também, via resultados computacionais presentes na literatura, onde se percebe, mediante gráficos e tabelas numéricas, uma consistência relevante nos resultados obtidos nesta dissertação, principalmente se comparados com as medições da referência [13], (Guimarães, 2005) e com os resultados computacionais obtidos pela referência [79], (Pretorius, 2006).

A análise de sensibilidade em relação à configuração geométrica da linha de transmissão é realizada com a inclusão de três novas geometrias de linhas de transmissão, onde, através de gráficos, claramente nota-se que nenhum dos perfis se sobrepõe, o que mostra um comportamento do campo magnético, tensão induzida, tensão do duto e corrente no duto, dependentes da geometria da linha de transmissão. Detalhes como proximidade dos cabos fase da linha de transmissão em relação ao ponto de observação do campo bem como assimetrias no posicionamento dos mesmos ficam explicitados nesta análise de sensibilidade.

Outra análise de sensibilidade é realizada, agora em relação à sensibilidade dos parâmetros citados anteriormente, porém de acordo com a inclusão das correntes induzidas nos cabos para-raios pelas correntes dos cabos fase. Para o Sistema 2, existe uma redução mais significativa (9%) se comparada ao Sistema 3 (2%). O Sistema 1, por ser assimétrico em seu posicionamento de cabos fase, em alguns pontos apresenta uma pequena redução

e outros um pequeno aumento. As tabelas numéricas apresentadas mostram esta característica assimétrica das correntes induzidas nos cabos para-raios.

A modelagem do solo via plano complexo de A. Deri é realizada mediante simplificação da formulação inicial determinada pela mesma. Esta conclusão e justificativa é feita de forma consistente através de gráficos de sensibilidade apresentados na subseção 4.2.2.3 e detalhados nesta mesma subseção.

Análises de sensibilidade, para todos os parâmetros já citados, são realizadas para os Sistemas 1, 2 e 3, e em todos nota-se que para valores de resistividade do solo acima de 1 Ω .m, o valor da grandeza em análise torna-se constante. É importante destacar que a resistividade média do estado de Minas Gerais é da ordem de 2400 Ω .m, logo a consistência das análises de sensibilidade baseadas neste valor é demonstrada.

Pode-se concluir também que a altura do duto influencia diretamente nas grandezas associadas, visto que, uma maior proximidade do ponto de observação em relação a fonte geradora aumenta o campo magnético e, consequentemente, os outros parâmetros que dependem do mesmo para serem caracterizados.

Neste Capítulo 4 apresenta-se também, via gráficos, a polarização elíptica do campo magnético.

Por fim, as análises de sensibilidade em função do parâmetro tensão do duto e corrente no duto são realizadas em função do posicionamento do duto e sua configuração geométrica e as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- A posição do duto influencia diretamente na tensão do duto e corrente no duto visto que a tensão induzida também varia em função da posição do mesmo;
- A altura do duto proporciona um aumento da tensão do duto e uma diminuição da corrente no duto;
- O diâmetro do duto não influencia na tensão transversal do mesmo e a corrente no duto aumenta de acordo com o aumento do diâmetro do duto.

Assim, verifica-se a relevância do presente capítulo por apresentar várias análises de sensibilidade as quais mostram a variação do campo magnético, tensão induzida, tensão do duto e corrente no duto em função de diversos parâmetros tais como elétricos, magnéticos, geométricos, dentre outros, presentes na avaliação da interferência magnética entre linhas de transmissão operando em regime permanente e duto metálicos aéreos.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

5.1 – Introdução

Esta dissertação tem como objetivo apresentar um estudo sobre a interferência eletromagnética entre uma linha de transmissão operando em regime permanente (60 Hz) e dutos metálicos aéreos. Esta interferência pode ser analisada separadamente por meio dos acoplamentos: elétrico (também denominado acoplamento capacitivo e devidamente abordado em [11]); resistivo e magnético (também denominado indutivo) entre as linhas de transmissão e os dutos. O objeto de estudo desta dissertação, como visto nos capítulos anteriores, é o acoplamento magnético. Os efeitos mais significativos do acoplamento magnético são em função dos níveis de campo magnético, gerados pelas correntes variáveis no tempo nos cabos fase e para-raios, e que podem causar prejuízos à saúde de seres vivos, em exposição aos mesmos, quando ultrapassam os valores limites estabelecidos pelas normas e, também, por tensões/correntes induzidas nos dutos.

Uma das maiores aplicações do estudo realizado nesta dissertação é subsidiar pesquisas relativas a aspectos de segurança pessoal, visto que é possível que níveis de correntes/tensões induzidas nos dutos ultrapassem os limites impostos pelas normas regulamentadoras e, assim, estratégias de mitigação desses efeitos indesejáveis são necessárias.

Para uma avaliação concisa dos níveis de interferência magnética, inicialmente, é necessário calcular os perfis transversais de campo magnético (trajetória imaginária perpendicular ao eixo longitudinal da linha de transmissão). Os valores de campo magnético são sensíveis às características geométricas da linha de transmissão, à inclusão das correntes induzidas nos cabos para-raios, bem como à inclusão do efeito do solo, visto que em baixas frequências, o campo magnético penetra o solo de forma significativa.

Com o campo magnético devidamente calculado, faz-se o cálculo das tensões induzidas nos dutos que por ventura estejam na faixa de passagem da linha de transmissão e na condição de paralelismo com a mesma. Continuando a avaliação da interferência eletromagnética, após o cálculo da tensão induzida no duto, é possível proceder-se ao cálculo da tensão transversal no duto (tensão do duto) e, em seguida, da corrente longitudinal induzida no duto (corrente no duto). A análise em relação a corrente no duto e tensão no duto é feita utilizando três situações práticas devidamente explicadas e analisadas no Capítulo 4.

Por fim, no caso de valores de tensão do duto superiores aos limites estabelecidos pelas normas, devidamente referenciadas, torna-se necessário o estabelecimento de algumas técnicas de mitigação de tais efeitos visto que os mesmos são nocivos à saúde de seres vivos. As técnicas de mitigação tanto podem ser aplicadas às linhas de transmissão quanto aos dutos metálicos. O presente trabalho aborda de maneira imperativa o uso do aterramento dos dutos como uma estratégia de mitigação recorrente e eficaz, apesar de não ser escopo do mesmo a determinação das práticas de projeto de sistemas de aterramentos aplicados em tais situações.

5.2 – Principais conclusões

As grandezas físicas necessárias para caracterização do acoplamento magnético entre a linha de transmissão e o duto metálico aéreo são calculadas mediante um programa computacional desenvolvido no *Matlab*[®]. Este programa computacional possibilita uma grande quantidade de análises de sensibilidade devidamente apresentadas nos capítulos anteriores. As análises de sensibilidade possibilitam várias conclusões, dentre as quais, destacam-se e se enquadram dentro de uma expectativa geral:

1) Campo magnético e tensão induzida:

a. A validação dos resultados obtidos através de simulações realizadas no programa desenvolvido neste trabalho é feita mediante comparação com perfis de campo magnético obtidos por meio de medições, bem como oriundos de outras simulações computacionais existentes na literatura. Apesar da carência de algumas informações por parte dos trabalhos pesquisados na literatura, existe uma ótima concordância entre os valores obtidos nesta dissertação com os valores medidos e calculados na literatura. Este fato comprova a consistência física da metodologia aplicada nos cálculos realizados nesta dissertação;

 b. Seus perfis transversais são, de um modo geral, proporcionais aos níveis de corrente das linhas de transmissão;

c. Seus perfis transversais, naturalmente, diminuem à medida que o ponto em análise se afasta da linha de transmissão (exceção ocorre para os perfis de tensão induzida, em

determinada faixa de distância horizontal da linha de transmissão, quando o efeito do solo é considerado via método das imagens complexas);

d. Seus perfis transversais são claramente sensíveis à configuração geométrica da linha de transmissão. Ao avaliar tal sensibilidade verifica-se que para um mesmo valor de corrente, para diversas configurações geométricas de linha de transmissão, os perfis de campo magnético e tensão induzida variam em relação aos valores (máximo e mínimo) e, também, em relação ao formato do perfil do gráfico. Pode-se verificar tal fato ao analisar uma linha com circuito duplo e outra na configuração em delta invertido;

e. A inclusão das correntes induzidas nos cabos para-raios na análise do perfil transversal do campo magnético e tensão induzida promovem uma pequena redução nos valores finais para sistemas de transmissão simétricos; para sistemas assimétricos, na faixa onde há maior concentração de condutores fase, há um aumento no perfil de tensão induzida;

f. A inclusão do efeito do solo muda o perfil do gráfico de análise em relação ao campo magnético e tensão induzida. O efeito do solo é analisado por meio de vários valores e notadamente verifica-se, para todos os casos, que a partir da resistividade de 1 Ω .m todas as curvas de sensibilidade ficam sobrepostas e assim para valores reais de resistividade a alteração nos perfis gráficos será desprezível;

g. O posicionamento do duto em relação a sua altura do solo é alvo de análise em relação ao campo magnético e tensão induzida. Como de se esperar quanto maior a altura do duto, maiores são os valores de campo magnético e tensão induzida que incidem sobre o mesmo, fato este verificado pelos perfis de análise gráfica bem como visualizado nas tabelas numéricas;

 Para todos os sistemas reais abordados nesta dissertação e devidamente caracterizados, os valores de campo magnético estão dentro das normas regulamentadoras de exposição de seres vivos.

2) Tensão do duto e corrente no duto:

Três casos práticos e muito relevantes são analisados e nota-se pelas análises a variação do perfil tanto da tensão quanto da corrente no duto para cada caso. Tal ocorrência se deve ao fato do modo no qual o duto é tratado, na condição de paralelismo, em relação à linha de transmissão;

 Assim como analisado nas grandezas anteriores, a configuração geométrica da linha de transmissão influencia diretamente nos valores de tensão e corrente no duto, visto que para uma mesma corrente de operação, os níveis e perfis de tensão e corrente no duto variam claramente. Verifica-se também a variação destas grandezas para todos os casos práticos em análise;

c. A inclusão dos cabos para-raios nas análises dos valores de tensão e corrente no duto acompanham as análises anteriores, ou seja, reduzem tais valores. A redução é válida para todos os casos práticos em questão (sistemas simétricos);

d. A resistividade elétrica do solo ao ser considerada na análise da tensão e corrente no duto faz com que os gráficos dos perfis em questão fiquem sobrepostos para valores de resistividade acima de 1 Ω .m;

e. O posicionamento do duto em relação ao centro da linha de transmissão influencia diretamente no valor da tensão e corrente no mesmo. Esta ocorrência se deve pelo motivo de todas as grandezas em análise se alterarem, tanto em valor quanto em perfil, à medida que o duto se posiciona mais distante do centro da linha de transmissão. Por coerência com valores realísticos, as distâncias analisadas foram de 10 m, 15 m e 20 m em relação à linha de transmissão e os resultados coincidem com os perfis de campo magnético e tensão induzida (em termos qualitativos);

f. A configuração geométrica do duto em relação a sua altura e seu diâmetro também influenciam os valores de tensão e corrente no mesmo para os perfis abordados;

g. Em diversas situações, os níveis de tensão do duto ultrapassam os limites máximos estabelecidos pelas normas regulamentadoras e, assim, técnicas de mitigação são necessárias.

3) Técnicas de mitigação (aplicada ao duto):

a. Uma prática comum e eficiente refere-se ao aterramento do duto em vários pontos. Verifica-se uma maior necessidade de aterramento quanto maior for o comprimento do duto em paralelo com a linha de transmissão, mas esta análise está fora do escopo desta dissertação.

5.3 – Propostas de continuidade

O trabalho de pesquisa realizado nesta dissertação possibilita que uma série de implementações de continuidade em trabalhos futuros possa ser desenvolvida, dentre as quais podem ser citadas:

1) Regime permanente.

a. Avaliação, via propriedades físico-química do duto metálico, dos efeitos da exposição dos mesmos às tensões/correntes induzidas a longo prazo.

 Análise econômica da implantação de dutos metálicos dentro da faixa de passagem de uma linha de transmissão.

c. Melhoramento na determinação de alguns parâmetros também importantes tais como: projetos de aterramento, outras técnicas de mitigação do campo magnético e determinação do melhor posicionamento do duto dentro da faixa de passagem da linha de transmissão.

d. Avaliação dos níveis de interferência eletromagnética para trechos de não paralelismo entre a linha de transmissão e o duto metálico.

 e. Avaliação da interferência eletromagnética para dutos enterrados instalados dentro da faixa de passagem da linha de transmissão via acoplamentos elétrico, magnético e condutivo, bem como análises de corrosão.

f. Construção de uma ferramenta computacional com interface gráfica amigável, onde o usuário pode inserir todos os parâmetros do sistema físico real em análise para que o mesmo realize todas as análises de sensibilidade pré-determinadas pelo usuário.

 g. Análise dos acoplamentos elétrico, magnético e condutivo juntos para uma avaliação final da somatória da parcela de influência de cada um deles.

 h. Consideração da influência da estratificação do solo nas análises dos acoplamentos elétrico, magnético e condutivo.

i. Avaliação de aspectos de segurança pessoal.

j. Medições em experimentos de escala reduzida para validação dos cálculos via ferramentas computacionais.

2) Regime transitório.

 Abordagem integrada dos acoplamentos elétrico e magnético (campo eletromagnético), tendo como fontes distúrbios internos (operações de manobra e curto circuito) e externos (descargas atmosféricas) com dutos aéreos e enterrados.

 b. Consideração do efeito do solo em relação à ionização do solo e variação de seus parâmetros (resistividade e permissividade elétricas) com a frequência.

c. Aspectos de segurança pessoal e técnicas de mitigação.

d. Medições em experimentos de escala reduzida para validação dos cálculos via ferramentas computacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- E. J. Robba, C. C. B. d. Oliveira, H. P. Schmidt e N. Kagan, Introdução a Sistemas Elétricos de Potência, São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1972.
- [2] Assessments of health efect from exposure to power line frequency eletric and magnetic fields, Minnesota: NIEHS Working Group Report, 1998.
- [3] M. G. Morgan, P. Slovic, I. Nair, D. Geisler, D. MacGregor, B. Fischhoff, D. Lincoln e K. Florig, *Powerline Frequency Eletric and Magnetic Fields - A Pilot Study of Risk Perception*, vol. 5, Society for Risk Analysis, 1985.
- [4] R. F. Moreno, "Possíveis efeitos sobre a saúde humana decorrentes da exposição a campos elétricos e magnéticos de baixa frequência," *Revisão comentada da literatura* XVI SNPTEE - Campinas, 2001.
- [5] "NBR 5422." Projetos de linhas de transmissão de energia elétrica". Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - 1985".
- [6] CPFL, Orientação técnica. Linhas de Transmissão Ocupação de Faixa de Passagem, 2007.
- [7] ANEEL, "Energia elétrica chega a 97,8% dos domicílios brasileiros, mostra censo demográfico," Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/11/energia-eletrica-chega-a-97-8-dosdomicilios-brasileiros-mostra-censo-demografico. [Acesso em 27 novembro 2013].
- [8] F. A. Gonçalves e J. C. R. Lopes, "Instalação de subestações pré-fabricadas na faixa de passagem de linhas de transmissão," *Eletricidade Moderna*, vol. Ano XXXVII, 2008.
- [9] J. C. Albertini, "Estudo da influência da corrente alternada na corrosão em dutos metálicos enterrados," Dissertação de Mestrado - Centro Universitário do Instituto Mauá de tecnologia, 2008.
- [10] J. P. Almeida, "Análise de falhas e riscos associados aos dutos de gás natural à alta pressão," Projeto de Graduação - Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

- [11] M. G. d. Santos, Acoplamento elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos, São João del-Rei - MG: Dissertação de Mestrado, 2011.
- [12] S. M. Mendes Lúcio, Parâmetros longitudinais de linhas de transmissão: Análise dos efeitos do solo e da frequência para a aplicação em estudos de transitórios eletromagnéticos, São João del-Rei - MG: Dissertação de Mestrado, 2012.
- [13] G. E. Guimarães, Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV, Belo Horizonte - MG: Dissertação de Mestrado, 2005.
- [14] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen e A. Castanheira, "The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100,* pp. 3686-3694, August 1981.
- [15] GASMIG, "Gás Natural Expansão," Companhia de Gás de Minas Gerais. Disponível em: http://www.gasmig.com.br/Gas/Expansao.aspx. [Acesso em 26 Junho 2013].
- [16] GASNET, "Gasodutos em Operação," O site do Gás Natural. Disponível em: http://www.gasnet.com.br/gasodutos/operacao.asp. [Acesso em 26 Junho 2013].
- [17] AngloAmerican, "Onde Operamos Brasil". Disponível em: http://www.angloamerican.com.br/our-operations/imap.aspx?sc_lang=pt-PT. [Acesso em 28 Junho 2013].
- [18] R. D. Fuchs, Transmissão de Energia Elétrica, LTC/EFEI, 1977.
- [19] M. G. B. C. Camargo, "O setor elétrico brasileiro e sua normatização comtemporânea," Dissertação de Mestrado - UNISANTOS, 2005.
- [20] ANEEL, "Acesso à Informação Protocolo Geral," Agência Nacional de Energia Elétrica, Disponível em: http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=687&idPerfil=3-.
 [Acesso em 08 Julho 2013].
- [21] ANEEL, "Banco de Informações de Geração," Agência Nacinal de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicac/ResumoEstadual/ResumoEstadual.asp. [Acesso em 08 Julho 2013].

- [22] ANEEL, "Matriz de Energia Elétrica," Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicac/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp.
 [Acesso em 08 Julho 2013].
- [23] ABRATE, "Associados ABRATE," Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica. Disponível em: http://www.abrate.com.br/associados.asp. [Acesso em 08 Julho 2013].
- [24] Eletric Power Resarch Institute, Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, USA: United States General Electric Company, 1987.
- [25] A. M. Neto, C. R. N. Barbosa, L. A. d. M. C. Domingues, J. I. d. Silva Filho, V. H. G. d. Andrade, H. d. P. A. Júnior e P. R. G. d. Oliveira, "Desenvolvimento e aplicação de metodologias para análise do desempenho de linhas de transmissão," *SNPTEE -Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica,* Outubro 2007.
- [26] L. F. A. Pires, "Gestão ambiental da implantação de sistemas de transmissão de energia elétrica," Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Fluminense, 2005.
- [27] CEMIG, Características da Linha LT Janaúba Salinas, 138 kV, 1996.
- [28] CEMIG, Características da Linha LT Pimenta Barbacena, 345 kV, 1988.
- [29] CEMIG, Características da Linha LT São Gonçalo do Pará Ouro Preto "2", 500 kV, 1988.
- [30] R. S. Cavassini, Uma abordagem multicritérios para recapacitação de linhas de transmissão, Curitiba - PR: Dissertação de Mestrado, 2011.
- [31] W. D. Stevenson Jr, Elementos de Análise de Sistemas de Potência, São Paulo SP: McGraw-Hill, 1974.
- [32] P. C. C. Ribeiro e K. A. Ferreira, "Logística e transportes: Uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro," XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002.

- [33] A. T. Zimmermann, Análise de riscos de um vazamento de gás natural em um gasoduto, Florianópolis - SC: Dissertação de Mestrado, 2009.
- [34] TRANSPETRO, Petrobras Transporte S.A. Disponível em: http://www.transpetro.com.br/TranspetroSite/appmanager/transpPortal/transpInternet. [Acesso em 27 Novembro 2013].
- [35] FERROUS, "Mineroduto Licenciamento," Ferrous Resources do Brasil. Disponível em: https://www.ferrous.com.br/index.php/projetos/view/14/14. [Acesso em 27 Novembro 2013].
- [36] J. F. Ellenberger, Piping Systems & Pipeline Asne Code Simplified Mechanical Engineering, MCGraw-Hill, 2006.
- [37] R. M. Acebrón, "Impactos sócio-ambientais gerados pela construção de gasodutos de transporte em áreas tropicais sensíveis - Proposta visando uma integração energética Sul-Americana menos impactante," *Dissertação de Mestrado - universidade de São Paulo*, 2006.
- [38] M. Ferreira, S. sérgi, J. Camargo, R. V. B. Gomes e M. G. Lachtermarcher, "Propriedades mecânicas e epóxis utilizadas no recobrimento interno de oleodutos e gasodutos," *Polímeros:Ciência e Tecnologia - Artigo técnico,* vol. 12, n. p.p. 180-187, 2002.
- [39] M. Havas, "Biological effects of low frequency electromagnetic fields," em *Environmental* & *Resource Studies*, London, Spon Press, 2004, pp. 207-232.
- [40] R. F. Moreno, "Campos eletromagnéticos e saúde humana: O fato e o mito," XVIII SNPTEE, 18 Outubro 2005.
- [41] S. Koifman, M. G. P. Land, R. F. Moreno, R. J. Koifman e I. E. Mattos, "Avaliação dos efeitos biológicos em populações expostas a campos magnéticos de baixa frequência," *Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento ANEEL/CTEEP/FDTE,* n. Ciclo 2002/2003, 2003.

- [42] R. M. d. C. Silva, Estudo da exposição humana a campos elétricos e magnéticos na frequência industrial utilizando métodos numéricos, Rio de Janeiro - RJ: Trabalho Final de Curso, 2009.
- [43] IEEE, "644-1994. IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Eletric and Magnetic Fields From AC Power Lines, New York: IEEE, 1994 (R2008), (IEEE Std. 644-1994).".
- [44] D. Hafemeister, "Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields," *Physics and Society*, p. 314, 1996.
- [45] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and eletromagnetic fields (up to 300 GHz)," *International Commission on Non-ionizing Radiation Protection Technical Report,* 2001.
- [46] ABNT, "Limites para a Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Variáveis no Tempo (até 300 GHz)," Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- [47] "NBR 15145. " Métodos de medições de níveis de referência para exposição a campos elétricos e magnéticos na frequência de 50 a 60 Hz". Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - 2006".
- [48] IEEE-C95.6, "Standart of Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3Khz," *Piscataway, N. J.:Subcommittee 3 of Standards Coordinating Subcommittee 28,* 2002.
- [49] M. A. Schroeder, "Concepção de um sistema para extração de energia elétrica de Linhas de Transmissão através de acoplamento magnético," Dissertação de Mestrado -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) - Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG), 1996.
- [50] D. M. Baraúna, "Análise da influência de linhas de transmissão aéreas em regime permanente em tubulações metálicas enterradas. Projeto Final de Curso. Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2007".

- [51] J. A. Martins, P. S. A. Rocha, S. R. d. Oliveira, M. F. Alves, M. L. Y. Gonzalez e E. E. Ribeiro, "Análise dos acoplamentos resistivo e magnético entre um gasoduto e linhas de transmissão na região metropolitana de Belo Horizonte," *SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica,* 1989.
- [52] E. E. Ribeiro, M. L. Y. Gonzalez e M. F. Alves, "Um modelo eficiente para cálculo de interferências eletromagnéticas devidas às linhas de transmissão e distribuição," SIDEE, IEEE, 1990.
- [53] F. P. Dawalibi e R. D. Southey, "Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines II - Parametric analysis," *IEEE- Transaction on Power Delivery*, vol. 5, pp. 415-421, 1990.
- [54] G. B. Iyyuni e S. A. Sebo, "Study of transmission line magnetic fields," *IEEE*, pp. 222-231, 1990.
- [55] E. E. Ribeiro, M. L. Y. Gonzalez, P. C. d. O. Teixeira, L. S. Amaral e M. F. Alves, "Um pacote computacional para o cálculo de interferências eletromagnéticas devido às linhas de transmissão," *Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo Aplicado,* pp. 253-264, 1992.
- [56] Cigré, "Guide on the influence of high voltage AC power systems on metalic pipelines," Working Group, 1995.
- [57] M. F. Alves e E. E. Ribeiro, "Interferências eletromagnéticas devidas às linhas de transmissão," SALTEE - Seminário Avançado em Linhas de Transmissão de Energia, 1996.
- [58] S. Visacro Filho, M. A. d. O. Schroeder, V. H. d. Souza, A. C. Pernambuco e A. C. Penido, "Desenvolvimento de uma técnica para aplicação da redução do campo magnético nas proximidades de linhas de transmissão de alta tensão," *Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão*, 1997.
- [59] G. Yougang e L. Li, "Analysis of magnetic field environment near high voltage transmission lines," *International Conference on Communication Technology*, pp. 26-05-1 - 26-05-5, 1998.

- [60] M. Shimizu, K. Kato e H. Okubo, "Magnetic field distribution around power transmission line viewed from actual line current condition," *High Voltage Engineering Symposium*, pp. 2.15.S2 - 2.18.S2, 1999.
- [61] S. A. Mahmound, M. A. Abdallah e H. I. Anis, "Magnetic fields around a 220-66 kV transmission line," *High Voltage Engineering Symphosium*, pp. S.55.S4 - S.58.S4, 1999.
- [62] V. Phan Tu e J. Tlusty, "The induced maghetic field calculation of three phase overhead transmission lines above a lossy ground as a frequency-dependent complex function," *IEEE*, pp. 154-156, 2003.
- [63] M. H. Shwehdi e U. M. Johar, "Transmission Line EMF Interference with Buried Pipeline: Essential & Cautions". Proceedings of the International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR 2003) - Electromagnetic Fields and Our Health.
- [64] H. M. Ismail, "Effect of tower displacement of parallel transmission lines on the magnetic field distribution," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1705-1712, 2008.
- [65] A. Z. E. Dein, "Mitigation of magnetic field under egyptian 500 kV overhead transmission line," PEOCO - The 4th International Power Engineering and Optimization Conference, pp. 215-220, 2010.
- [66] R. M. Sarmento, "Electric and magnetic fields in overhead power transmission lines," *IEEE Latin America Transactions*, pp. 1909-1915, 2012.
- [67] M. N. O. Sadiku, Elementos do Eletromagnetismo, 3ª ed., Bookman, 2004.
- [68] P. R. Clayton, W. W. Keith e N. A. Syed, Introduction to Eletromagnectic Fields, WCB/MCGraw-Hill, 1997.
- [69] D. M. C. Santiago e R. C. d. Cunha, "Ferramenta computacional para cálculos de impedâncias características, funções de propagação e impedâncias de sequências de linhas de transmissão aéreas trifásicas, considerando os efeitos dos cabos pára-raios do solo," SME - Sociedade Mineira de Engenheiros, 2009.
- [70] J. F. G. Casaca, Cálculo do campo electromagnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia, Lisboa: Dissertação de Mestrado, 2007.

- [71] H. Umarji, Cálculo de parâmetros de linhas aéreas para redes de distribuição, Lisboa: Dissertação de Mestrado.
- [72] M. B. d. Silva, Modelagem de linhas de transmissão trifásica no domínio dos modos, Viçosa - MG: Trabalho Final de Curso, 2012.
- [73] J. S. Monteiro, D. Fernandes Jr., W. L. A. Neves, B. A. Souza e A. B. Fernandes, "Linhas de transmissão acopladas: Cálculo de parâmetros para estudos de fluxo de potência," SBSE - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2006.
- [74] H. S. d. Moura e L. H. P. Scime, Estudo das interações eletromagnéticas entre linha de transmissão de alta tensão e dutos de transporte de hidrocarbonetos enterrados, Curitiba - PR: Trabalho Final de Curso, 2012.
- [75] L. Bortels, J. Deconinck, C. Munteanu e V. Topa, "A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines," *IEEE - Transactions on Power Delivery*, pp. 210 - 217, 2006.
- [76] C. B. C. W. Cruz, Estratégias de mitigação do campo magnético originado por linhas aéreas de transmissão de energia, Lisboa: Dissertação de Mestrado, 2009.
- [77] A. R. Memari e w. Janischewskyj, "Mitigation of magnetic field near power lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1577-1586, 1996.
- [78] L. A. d. M. C. Domingues, A. M. Neto, C. R. N. Barbosa, V. H. G. d. Andrad, F. C. Dart,
 M. A. M. V. Sondermman, J. A. Filho e P. C. V. Esmeraldo, "Mapeamento de Campos
 Eletromagnéticos em Linhas do Sistema de Transmissão de Furnas (138kV-765kV),"
 XVII SNPTEE, 19 a 24 Outubro 2003.
- [79] E. Holdings LTD, Electric and magnetic fields from overhead power lines A summary of technical and biological aspets, Empetus Close Corporation, 2006.
- [80] P. G. P. Mendes, As linhas de alta tensão e a saúde pública, Dissertação de Mestrado, 2010.

- [81] S. M. Mendes Lúcio, R. A. R. Moura e M. A. O. Schroeder, "Estudo comparativo entre metodologias de cálculo dos parâmetros elétricos do solo variando com a frequência," *ERMAC: I Encontro de Matemática Aplicada e Computacional*, pp. 297-298, 2010.
- [82] J. B. Gertrudes, Influência da condutividade e permissividade do solo em função da frequência no cálculo da impedância longitudinal e admitância transversal de linhas aéreas de transmissão, Campinas - SP: Tese de Doutorado, 2010.
- [83] J. B. Gertrudes, Comportamento eletromagnético do solo no domínio da frequência: Tratamento de dados de campo e influência no desempenho de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, Campinas - SP: Dissertação de Mestrado, 2005.
- [84] W. H. Hayt Jr e J. A. Buck, Eletromagnetismo, 8ª ed., 2013.
- [85] H. R. Vieira, M. A. d. O. Schroeder e W. d. S. Sales, "Acoplamento magnético entre linhas de transmissão e dutos metálicos," XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - SEPOPE, Foz do Iguaçu, Maio 2014.