

UNIVER SIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

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

Aluna: Mariana Guimarães dos Santos
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder
Co-Orientadores: Prof. Dr. Erivelton Geraldo Nepomuceno
Profa. Dra. Tereza Cristina Bessa Nogueira Assunção

SÃO JOÃO DEL-REI, 02 SETEMBRO DE 2011



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

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

por

## Mariana Guimarães dos Santos

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-orientadores: Prof. Dr. Erivelton Geraldo Nepomuceno Profa. Dra. Teresa Cristina Bessa Nogueira Assunção

## SÃO JOÃO DEL-REI, 02 SETEMBRO DE 2011



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA





UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Mariana Guimarães dos Santos

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

SÃO JOÃO DEL-REI,02 SETEMBRO DE 2011

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

## Mariana Guimarães dos Santos

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação 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 02 de Setembro de 2011.

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

Prof. Erivelton Geraldo Nepomuceno – Doutor UFSJ – Co-orientador

Profa. Teresa Cristina Bessa Nogueira Assunção – Doutora UFSJ – Co-orientadora

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

> Prof. Delfim Soares Júnior – Doutor UFJF – Membro externo

"Dedico essa conquista ao meu pai, Antônio Marcos José dos Santos, por me deixar como herança: a lembrança dos ensinamentos de vida, muito amor e a capacidade de superar obstáculos sem perder o sorriso no rosto".

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador e amigo, professor Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, pelo apoio, pelos ensinamentos e conselhos, pelas conversas e broncas, pela tranquilidade e confiança epelo exemplo de profissional que eu gostaria de me tornar.....enfim por tudo!!

Aos meus co-orientadores, em especial, ao professor Erivelton Geraldo Nepomuceno, pelos conselhos, ensinamentos e pelo apoio em todas as etapas da minha formação.

Gostaria de agradecer a minha mamãe, pela dedicação incondicional, pelo apoio em todas as fases da minha vida, pelos abraços apertados nos momentos difíceis, pelos mimos, pelo amor.

Ao meu papai, Antônio Marcos, pelos ensinamentos, amor e pelas lembranças lindas que carrego comigo.

À minha irmã super especial, Marina, pelos ensinamentos diários de amor, paciência, carinho e simplicidade.

Aos meus colegas de Mestrado, pela ajuda nos momentos de dificuldades e por dividirem comigo conhecimentos, anseios, dúvidas etc. Ao André Tiso Lobato pela parceria no desenvolvimento do trabalho.

Ao meu namorado, Bruno, pelo amor, carinho, tranquilidade, apoio, por me entender nos momentos de inquietação e por me ajudar nos momentos de decisões importantes.

A todos meus familiares, especialmente, à minha Vó, tia Bahia, tia Wanda, tia Lídia, minha Dinha, e as minhas primas por todo tipo de apoio, companheirismo e carinho.

À minha cunhada e ao meu sogro pelo carinho e parceria.

As minhas amigas, Tatti, Bruna, Daiane, Mayana, Rafa e Carla pela amizade, pelas conversas, risos e choros e por tornarem meu dia a dia muito mais divertido. A Si por compartilhar comigo as eternas dúvidas eletromagnéticas e pela parceria.

À minha amiga Aline, pela companhia e amizade sincera, pelas caronas, pelo exemplo de vida e por acreditar e torcer por mim sempre.

Finalmente, à Universidade Federal de São João Del-Rei e à CAPES, pelo apoio financeiro indispensável para a concretização desse trabalho.

# SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES	viii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 – Contextualização da dissertação	1
1.2 – Relevância do tema sob investigação	3
1.3 – Objetivos geral e específicos	4
1.4 – Metodologia	5
1.5 – Organização do texto	5
CAPÍTULO 2 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOB ESTUDO	7
2.1 – Introdução	7
2.2 – Linhas de transmissão	7
2.2.1 – Visão geral	7
2.2.2 – Características de linhas de transmissão aéreas	9
2.2.3 – Descrição das linhas de transmissão sob estudo	11
2.3 – Dutos	18
2.3.1 – Visão geral	18

2.3.2 – Características físicas dos dutos	21
2.4 – Linhas de transmissão e dutos	23
2.5 – Conclusão	24
CAPÍTULO 3 - ESTUDO DO ESTADO DA ARTE	26
3.1 – Introdução	26
3.2 – Avaliação dos efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos	26
3.3 – Aspectos básicos envolvidos no cálculo de campo elétrico	29
3.3.1 – Introdução	29
3.3.2 – Distribuições de cargas nos condutores ( <b>ρL</b> )	32
3.3.3 – Módulo do campo elétrico	33
3.3.4 – Medição de níveis de campos elétricos	37
3.4 – Cálculo do potencial elétrico	38
3.5 – Interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos	40
3.6 – Conclusão	42
CAPÍTULO 4 - INTERFERÊNCIA ELÉTRICA ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO E DUTOS	44
4.1 – Introdução	44
4.2 – Visão geral da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos	44
4.3 – Modelagem eletromagnética para análise da interferência elétrica	46
4.3.1 – Introdução	46
4.3.2 – Campo elétrico	49
4.3.3 – Potencial elétrico nos dutos	55

4.3.4 – Correntes em corpos em contato com os dutos	58
4.3.5 – Técnicas de mitigação	60
4.4 – Conclusão	62
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS	64
5.1 – Introdução	64
5.2 – Resultados associados á avaliação do campo elétrico	64
5.2.1 –Validação dos resultados	74
Comparação com resultados de medições	64
Comparação com resultados da literatura	71
5.2.2 – Análise do perfil transversal de campo elétrico no nível do solo e a 1m do solo	73
5.2.3 – Análise do perfil transversal de campo elétrico a 1m do solo considerando a influência dos cabos para-raios	76
5.2.4 –Perfis de campos elétricos a 1m do solo com e sem a presença de dutos na faixa de passagem	658
Variação do raio dos dutos	79
Variação do posicionamento dos dutos	80
5.2.5 – Comparação dos resultados dos módulos de campo elétrico obtidos	82
5.3 – Resultados associados à avaliação do potencial elétrico	83
5.3.1 – Comparação dos resultados de campo e potencial elétrico	84
5.3.2 – Resultados de potencial com formulações práticas	87
Comparação dos resultados das formulações de potencial elétrico	88
5.4 – Resultados de correntes induzidas em corpos em eventual contato com os dutos	89
CAPÍTULO 6 - Conclusões e Propostas de Continuidade	98

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS103		
6.4 –	Propostas de continuidade	101
6.3 –	Publicações originadas da Dissertação	101
6.2 –	Principais conclusões	99
6.1 –	Introdução	98

### RESUMO

Este trabalho apresenta, interpreta e discute o acoplamento elétrico estabelecido entre linhas de transmissão, operando em regime permanente senoidal, na frequência industrial de 60Hz, e dutos metálicos aéreos. As grandezas físicas envolvidas neste acoplamento correspondem aos campos e potenciais elétricos, especificamente no que se refere aos seus perfis transversais, em relação ao eixo longitudinal das linhas de transmissão. Tais grandezas permitem que sejam determinados os níveis de correntes em seres humanos em eventual contato com os dutos. A avaliação dos níveis em causa é de fundamental importância, uma vez que está diretamente associada a questões de segurança pessoal. Caso os níveis de correntes sejam superiores aos máximos admissíveis pelo corpo humano (5 a 15 mA), técnicas de mitigação são necessárias para redução dos mesmos e, consequente, garantia de segurança pessoal. Nessa dissertação, foi elaborada uma ferramenta computacional que permite todos os cálculos e avaliações citadas. Ademais, permite a realização de diversas análises de sensibilidade de caráter prático. Os resultados ilustram que a metodologia eletromagnética utilizada é fisicamente consistente, pois foi validada mediante comparação com resultados experimentais amplamente divulgados na literatura. Adicionalmente, curvas práticas são apresentadas com os seguintes objetivos: determinação do máximo comprimento do duto e máxima resistência de aterramento do mesmo (em função de sistemas diversos de transmissão e posicionamento horizontal do duto) de tal forma que os limites toleráveis para o ser humano não sejam atingidos.

## ABSTRACT

This paper presents, interprets and discusses the established electrical coupling between transmission lines, operating in sinusoidal steady state, the power frequency of 60Hz, and metal air ducts. The physical quantities involved in this engagement are the fields and electrical potentials, specifically with regard to their cross-sections in the longitudinal axis of the transmission lines. These quantities allow determining certain current levels in humans in possible contact with the pipeline. The assessment of the levels in question is of fundamental importance, since it is directly related to issues of personal safety. If current levels are higher than the maximum permitted by the human body (5 to 15 mA), mitigation techniques are needed to reduce them and, consequently, guarantee of personal safety. In this dissertation, we created a computational tool that allows all the calculations and evaluations cited. Moreover, allowing the realization of various sensitivity analysis of a practical nature. The results illustrate that the methodology used is electromagnetic physically consistent, it was validated by comparison with experimental results widely reported in the literature. Additionally, curves practices are presented with the following objectives: determining the maximum length of the duct and maximum ground resistance of the same (in terms of different transmission systems and horizontal positioning of the product) so that the tolerable limits for humans is not be achieved.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Capacidade de geração de energia por estado em MW. Fonte [27]8
Figura 2-2: Silhueta da torre do sistema 1 - Linha de Transmissão de 138 kV11
Figura 2-3: Silhueta da torre do sistema 2 – Linha de Transmissão de 345 kV12
Figura 2-4: Silhueta da torre do sistema 3 - Linha de Transmissão de 345 kV13
Figura 2-5: Silhueta da torre do Sistema 4 – Linha de Transmissão de 500 kV14
Figura 2-6: Silhueta da torre do sistema 5 – Linha de Transmissão de 138 kV15
Figura 2-7: Silhueta da torre do sistema 6 – Linha de Transmissão de 138 kV16
Figura 2-8: Representação da altura média dos condutores de uma linha de transmissão18
Figura 2-9: Mapa dos principais gasodutos do Brasil. Fonte: [42]
Figura 3-1: Esquema de representação de uma LT monofásica
Figura 3-2: Aplicação do MI31
Figura 3-3: Linha de transmissão trifásica de configuração horizontal
Figura 3-4: Representação do Campo Elétrico Elipse para um ponto no espaço36
Figura 3-5: Ilustração da aplicação do método das imagens para o cálculo do potencial
elétrico
Figura 3-6: Descrição das variáveis utilizadas para o cálculo dos níveis de potencial induzido
nos duto
Figura 3-7: Gasodutos localizados na faixa de passagem de linhas de transmissão, [98] 41
Figura 4-1: Representação de uma linha de transmissão trifásica, circuito simples,
configuração horizontal, dois cabos para-raios e um duto50
Figura 4-2: Método das imagens aplicado ao sistema representado na Figura 4-151
Figura 4-3: Representação da aplicação do MII para um condutor
Figura 4-4: Circuito equivalente para cômputo das correntes em corpos em eventual contato
com dutos
Figura 4-5: Técnica de mitigação: aterramento do duto para segurança pessoal - circuito
equivalente61
Figura 5-1: Linha de transmissão de circuito duplo de 400 kV, adaptado de [90]64
Figura 5-2: Perfil de campo elétrico no nível do solo para o sistema apresentado por [90]65
Figura 5-3: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação
para uma linha de transmissão de circuito simples (sistema 4), descrito no capítulo 2 67
Figura 5-4: Perfis de campo elétrico apresentados por[112], para uma linha de transmissão
de circuito simples, semelhante a do sistema 4, descrito no Capítulo 268
Figura 5-5: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação
para uma linha de transmissão de circuito duplo (sistema 6), descrito no capítulo 268

Figura 5-6: Perfil de campo elétrico apresentados por [112], para uma linha de transmissão
de circuito duplo semelhante a do sistema 6, descrito no Capítulo 268
Figura 5-7: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada por [73].
Figura 5-8: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa dissertação
para a linha de transmissão descrita na Figura 5-1469
Figura 5-9: Perfil de campo elétrico obtido por medições e simulações apresentadas por[73].
Figura 5-10: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação
para linhas de transmissão descritas em [30]
Figura 5-11: Perfil de campo elétrico obtido por simulações computacionais apresentados
por[30]
Figura 5-12: Ilustração do sistema utilizado por [88]
Figura 5-13: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação
para linhas de transmissão descritas em [88]72
Figura 5-14: Perfil de campo elétrico obtido por simulações computacionais apresentados por[88]
Figura 5-15: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação
para linhas de transmissão considerando a presença de dutos em suas faixas de passagem
descritas em [88]
Figura 5-16: Perfil de campo elétrico obtido por simulações computacionais apresentados por[88]73
Figura 5-17: Perfil transversal das intensidades de campo elétrico no nível do solo e a 1m do
solo, sem a presença do duto, para os sistemas 5 e 6 (descritos no Capítulo 2)
Figura 5-19: Perfil de campo elétrico com e sem a presenca dos cabos para-raios para uma
linha de transmissão de 345 kV, circuito simples e configuração horizontal (sistema 2)77
Figura 5-20: Diferença percentual dos níveis de campo elétrico com a sem a presença de
cabos para-raios para uma linha de transmissão de 345 kV, circuito simples e configuração
horizontal (sistema 2)
Figura 5-21: Perfis de campo elétrico com e sem a presença do duto na faixa de passagem
de uma linha de transmissão de 345 kV, circuito simples, configuração horizontal (sistema 2).
Figura 5-22: Perfis de campo elétrico considerando a variação dos raios dos dutos
rigura 5-23: Perris de campo eletrico considerando a variação do posicionamento dos dutos
Figura 5-24: Comparação das metodologias para cálculo do módulo do campo elétrico 83

Figura 5-25: Perfis de campo e potencial elétricos a 1 m do solo para todos os sistemas sob
estudo, descritos no Capítulo 2, seção 2.284
Figura 5-26: Perfis de campo e potencial elétrico, no nível do solo, para o sistema85
Figura 5-27: Perfis de campo e potencial para o sistema 2 calculados em três pontos de
observação distintos (0,5 m, 1 m e 5 m)85
Figura 5-28: Perfil de campo elétrico para três pontos de observação diferentes: no nível do
solo, a 1 m do solo e a 2 m do solo (sistema 2)87
Figura 5-29: Potencial elétrico a 1 m do solo para o sistema 2 (descrito no capítulo 2) 88
Figura 5-30: Corrente induzida por km de duto para todos os sistemas de transmissão
(sistemas 1 a 6)90
Figura 5-31: Perfil de corrente induzidas obtido nessa Dissertação para uma linha de circuito
simples
Figura 5-32: Perfil de corrente induzida obtido por [97] para uma linha de circuito simples 91
Figura 5-33: Perfil de corrente induzidas obtido nessa Dissertação para uma linha de circuito
duplo91
Figura 5-34: Perfil de corrente induzida obtido por [97] para uma linha de circuito duplo91
Figura 5-35: Avaliação do comprimento máximo do duto de acordo com o seu
posicionamento horizontal considerando três valores de correntes máximas admissíveis
(I <sub>ADM</sub> ): 5 mA, 10 mA e 15mA92
Figura 5-36:Perfis de comprimentos máximos dos dutos pelo posicionamento dos mesmos,
considerando I <sub>ADM</sub> =5 mA, para todos os sistemas sob-estudo (sistemas 1 a 6)93
Figura 5-37: Perfil de máxima resistência de aterramento do duto em função de seu
posicionamento horizontal95
Figura 5-39: Avaliação da resistência de aterramento para diversos comprimentos de dutos
em função do posicionamento horizontal dos mesmos96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resumo das características físicas do sistema 1 – Linha de Transmissão
trifásica circuito simples de 138kV. Fonte, [34]12
Tabela 2.2 - Resumo das características físicas do sistema 2 - Linha de Transmissão
trifásica circuito simples de 345 kV. Fonte [35],13
Tabela 2.3 - Resumo das características físicas do sistema 3 - Linha de Transmissão
Trifásica Circuito Simples de 500 kV. Fonte, [36]14
Tabela 2.4 - Resumo das características físicas do Sistema 4 - Linha de Transmissão
trifásica circuito simples de 500 kV. Fonte, [37]15
Tabela 2.5 - Resumo das características físicas do sistema 5 - Linha de Transmissão
trifásica circuito duplo de 138 kV – Configuração de Alta Reatância. Fonte, [38]16
Tabela 2.6 - Resumo das características físicas do sistema 6 - Linha de Transmissão
trifásica de 138 kV – Configuração de Baixa Reatância. Fonte, [38]17
Tabela 2.7 - Resumo da evolução do sistema dutoviário brasileiro. Fonte: [43]20
Tabela 2.8 - Principais características dos sistemas dutoviários sob estudo. Fonte [17]22
Tabela 3.1 - Valores limite de campos elétricos, densidades de correntes e correntes
induzidas29
Tabela 4.1 - Tempos de relaxação para valores de permissividade relativa e resistividade de
solos típicos
Tabela 5.1: Alturas em relação ao solo (eixo z) e distâncias horizontais (eixo x) das fases em
relação ao centro da linha da linha de circuito duplo utilizada nas medições65
Tabela 5.2: Alturas em relação ao solo (eixo z) e distâncias horizontais (eixo y) das fases e
do duto em relação ao centro da linha da linha de circuito duplo utilizada em [88]71
Tabela 5.3: Resultados de potenciais elétricos para as três metodologias descritas acima 88
Tabela 5.4: Configuração geométrica das linhas utilizadas na validação dos resultados91

vii

# LISTA DE SIGLAS E ABREVIAÇÕES

LISTA DE 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	
CEP	Condutor Elétrico Perfeito	
CESP	Companhia Energética de São Paulo	
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco	
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico	
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética	
CPFL	Companhia paulista Força e Luz	
ELETRONORTE	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A	
ELETROSUL	Centrais Elétricas do Sul do Brasil S/A	
EPE	Empresa de Pesquisa Energética	
ERIAC	Encontro Regional Iberoamericano do Cigré	
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 Paulínea - Jacutinga	
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	
IEM	Interferência eletromagnética	
ICNIRP	International Commission on non-Ionizing Radiation Protection Technical Report	
ITAIPU	Itaipu Binacional	
МІ	Método das Imagens	
MII	Método das Imagens Ideais	
MME	Ministério de Minas e Energia	
MSC	Método de Simulação de Cargas	
NIH	NIH NationalInstituteof Health	
OMS	Organização Mundial de Saúde	
PETROBRÁS	Empresa brasileira responsável pela extração e transporte de petróleo	
SEP	Sistema Elétrico de Potência	
SNPTEE	Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica	
TRANSPETRO	Transportadora de Petróleo e derivados da PETROBRÀS	

# **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

#### 1.1 – Contextualização da dissertação

A energia elétrica é fator essencial para alavancar o crescimento econômico necessário à melhoria da qualidade de vida de grande parte da população mundial. Essa energia é transmitida aos consumidores por meio das linhas de transmissão, que são componentes fundamentais do Sistema Elétrico de Potência (SEP),[1].

Como o Brasil é um país com dimensões continentais, muitas vezes a energia elétrica deve ser transmitida a longas distâncias, o que exige o aumento da tensão de transmissão e, consequentemente, a elevação dos níveis de campos eletromagnéticos gerados pelas distribuições de cargas e correntes elétricas nos condutores que compõem as linhas de transmissão.

Níveis elevados de campos eletromagnéticos podem provocar danos a seres humanos, animais ou objetos localizados nas proximidades das linhas de transmissão,[2,3,4,5,6,7,8]. Assim, torna-se necessário o estabelecimento de distâncias limites de segurança para exposição de campos eletromagnéticos sobre ambos os lados das linhas ao longo de suas rotas, denominadas faixas de passagem (ou de servidão), [9].

Atualmente, apesar de existir um grande número de linhas de transmissão tradicionais (extensas), surge também a necessidade de instalação de linhas de transmissão compactas próximas aos grandes centros urbanos, tornando cada vez mais comum a presença de estruturas pré-fabricadas na faixa de passagem dessas. Essa instalação de estruturas próximas às linhas de transmissão é cada vez mais utilizada devido à escassez de terrenos adequados e à busca por redução de custos. A construção de novas subestações em áreas urbanas é um exemplo dessa prática, que tem motivado estudos sobre a avaliação de interferências entre linhas de transmissão e diversas estruturas, [10].

Além disso, existe um aumento substancial da demanda mundial por fontes energéticas econômicas e de menor agressividade ao meio ambiente. Assim, existe a preocupação com o transporte dessas fontes de energia (óleos, gases, minérios e outros) e é nesse contexto que os dutos metálicos surgem como uma ferramenta eficiente para transporte dessas substâncias.

Com o aumento de instalações de dutos (aéreos ou enterrados) e Linhas de transmissão, buscando-se um baixo impacto ambiental, percebe-se, claramente, a possibilidade da construção de dutos dentro dos limites de faixa de passagem das mesmas,

uma vez que ambas as estruturas de transporte necessitam de lugares isolados estratégicos para o desempenho de suas funções, [9]. Sendo assim, faz-se necessário um estudo sobre os níveis de interferência entre as linhas de transmissão e dutos metálicos localizados dentro da faixa de passagem. Tais níveis são avaliados normalmente pelos acoplamentos eletromagnéticos entre as linhas e os dutos. Esses acoplamentos, por sua vez, provocam o aparecimento de tensões induzidas nos dutos.

A preocupação com o aumento das tensões induzidas em dutos é relevante, pois: (i) qualquer ser humano em contato com um duto sujeito à influência de uma linha de alta tensão pode estar exposto ao risco de choque elétrico; (ii) se os dutos apresentarem uma tensão elevada se comparada ao solo, qualquer equipamento conectado a essa estrutura estará sujeito a danos e (iii) a ação prolongada das tensões induzidas sobre os dutos pode causar danos na estrutura metálica dos mesmos, provocando, por exemplo, corrosão da proteção catódica, [11,12,13].

De um modo geral, a avaliação da interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos é processada em função do regime de operação da linha (permanente ou transitório) e da localização do duto (aéreo ou enterrado). Normalmente, pode-se abordar este complexo problema eletromagnético em duas partes:

Linha de transmissão em regime permanente (50 – 60 Hz): A interferência eletromagnética é decomposta nos acoplamentos elétrico (capacitivo e condutivo) e magnético (indutivo). Devido à frequência de operação relativamente baixa da linha, estes acoplamentos podem ser calculados de forma independentes, assumindo comportamento linear do sistema.

• Linha de transmissão em regime transitório (curto circuito, operações de chaveamento, descargas atmosféricas etc.): Neste caso, o espectro de frequência característica é muito amplo, desde aproximadamente 60 Hz/100 Hz à 10 MHz, [14]. Consequentemente, a interferência eletromagnética deve ser avaliada em função do acoplamento eletromagnético, principalmente na faixa superior do espectro. Assim, os efeitos dos campos elétrico e magnético não podem ser analisados de forma independente.

Em termos práticos, os níveis de tensões induzidas nos dutos pelas linhas de transmissão em regime transitório são substancialmente maiores que aqueles associados à operação em regime permanente. Por outro lado, são menos frequentes, pois as tensões induzidas em regime permanente solicitam os dutos de forma contínua. Por esse motivo, optou-se por abordar nessa Dissertação a avaliação da interferência eletromagnética em regime permanente.

O acoplamento magnético em regime permanente foi devidamente abordado em, [15,16]. O acoplamento elétrico condutivo/resistivo em regime permanente pode, em situações práticas, ser desconsiderado, uma vez que sua existência requer uma ligação elétrica (condutiva) entre fonte de interferência eletromagnética (linha) e o elemento sujeito à interferência eletromagnética (duto). Tal ligação ocorreria, por exemplo, se houvesse fuga de corrente pelas cadeias de isoladores da linha que atingisse o duto pelo solo. A probabilidade de ocorrência desse fenômeno em regime permanente é reduzida,[15,16].

Por conseguinte, nesta Dissertação, somente é considerado o acoplamento elétrico (capacitivo) entre linha e duto. O campo elétrico em baixas frequências (60 Hz), praticamente não penetra no solo, [15]. Tal característica é melhor explorada no capítulo 4 deste trabalho. Portanto, os dutos enterrados não são objeto de análise nesta Dissertação.

Diante do exposto, esta pesquisa busca a compreensão e quantificação dos níveis de interferência elétrica (acoplamento capacitivo) entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos.

Para tal, utiliza-se um modelo eletromagnético, confiável e fisicamente consistente, capaz de calcular os níveis de campos elétricos e de tensões induzidas gerados em tubulações metálicas instaladas nas proximidades de linhas de transmissão. Adicionalmente, tem-se a intenção de avaliar aspectos de segurança de seres humanos, animais e equipamentos em eventual contato com os dutos aéreos, bem como técnicas de mitigação nos casos em que valores limites de correntes, associados à segurança pessoal, forem ultrapassados.

#### 1.2 – Relevância do tema sob investigação

O sistema de transmissão brasileiro conta com linhas de transmissão e de distribuição que possibilitam, atualmente, a interligação de quase todo o território nacional.

O sistema de transmissão de energia elétrica mineiro possui cerca de 7% da capacidade de transmissão brasileira com, aproximadamente, 5.320 quilômetros de linhas de transmissão instaladas. Esse sistema é responsável pela transmissão e distribuição da energia elétrica desde as estações geradoras, hidroelétricas em sua maioria, até os grandes, médios e pequenos consumidores, [1].

Atualmente, com o crescimento da utilização de fontes energéticas econômicas e de baixo impacto ambiental, o sistema dutoviário tem se tornado a melhor alternativa para transmissão dessas fontes de energia.

Com a crescente instalação de linhas de transmissão e dutos, é cada vez mais comum a presença de dutos dentro das faixas de passagem de linhas de transmissão.

Sendo assim, o estudo da interferência entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos é de grande interesse para as concessionárias de energia elétrica e para as agências responsáveis pelo gerenciamento e transporte do petróleo e gás no Brasil,[11,12,13].

No estado de Minas Gerais, tal estudo interessa, também, à GASMIG (Companhia de Gás de Minas Gerais), empresa coligada à CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) que é a grande responsável pela expansão e gás no estado (troncos Sete Lagoas e Vale do Aço), devido aos vários pontos de cruzamento e paralelismo com linhas ao longo dos trajetos de implantação dos gasodutos, [17].

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, [18]. Além disso, está sendo instalado, ao longo do estado (sistema Minas-Rio), o maior mineroduto do mundo com aproximadamente 525 km para atendimento à AnglousFerrous, [19].

Os fatores descritos acima garantem a relevância do tema sob investigação, justificando a necessidade dos estudos propostos.

#### 1.3 – Objetivos geral e específicos

Esse trabalho tem como objetivo geral a avaliação dos níveis de interferência elétrica entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos.

Os objetivos específicos que permitem, em seu conjunto, que o objetivo geral seja alcançado, são os seguintes:

- Modelagem eletromagnética/computacional do acoplamento elétrico entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos para: cálculo dos níveis de campo elétrico, dos potenciais induzidos nos dutos, das correntes induzidas em corpos que eventualmente estejam em contato com os dutos;
- (ii) Validação e análises de sensibilidade do modelo;
- (iii) Avaliação de aspectos de segurança pessoal.

#### 1.4 – Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho de pesquisa inclui as seguintes etapas:

• Revisão Bibliográfica sobre o estudo do Estado da Arte.

• Caracterização dos sistemas sob estudo, quais sejam: linhas de transmissão e sistema dutoviário. Neste caso, são adotadas estruturas típicas reais dos sistemas de transmissão e dutoviário nacionais.

• 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 capacitivo entre linhas de transmissão, operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos;

 Desenvolvimento de programas para cálculo: (i)dos níveis de campos elétricos gerados pelas linhas de transmissão e (ii) potenciais induzidos nos dutos.

 Validação dos programas desenvolvidos por meio de comparação com outras metodologias e com resultados experimentais.

• Análises de sensibilidade com relação às configurações geométricas (dos dutos e das linhas) e níveis de tensões e cargas das linhas de transmissão.

- Avaliação dos níveis de corrente no corpo de pessoas em contato com os dutos.
- Avaliação de técnicas de mitigação dos efeitos elétricos indesejados.

#### 1.5 – Organização do texto

O presente texto está organizado em seis capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No capítulo 2, faz-se a descrição do sistema sob estudo. As principais características de linhas de transmissão e de dutos metálicos são apresentadas e as configurações geométricas dos sistemas a serem utilizados nesse trabalho são definidas.

No capítulo 3, faz-se um estudo do Estado da Arte da temática sob avaliação.Inicialmente, é realizada a avaliação dos efeitos da exposição de seres humanos a campos eletromagnéticos. Em seguida, apresentam-se as metodologias utilizadas para cálculo dos campos elétricos, dos potenciais induzido se correntes que circulam em corpos em contato com dutos. No capítulo 4, faz-se a descrição da modelagem eletromagnética utilizada para representar a interferência elétrica entre as linhas operando em regime permanente e os dutos metálicos aéreos.

No capítulo 5, são apresentados os resultados de simulações de campos elétricos, potenciais induzidos, além de cálculos de correntes induzidas e da avaliação de aspectos de segurança pessoal. Nesse capítulo são realizadas análises de sensibilidade, para diferentes configurações de linhas de transmissão e de dutos.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas algumas conclusões gerais provenientes do estudo em questão e propostas de trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2 -DESCRIÇÃO DO SISTEMA SOB ESTUDO

#### 2.1 – Introdução

O presente capítulo apresenta a descrição detalhada dos sistemas sob estudo, ou seja, das linhas de transmissão e dos dutos.

Primeiramente, são descritas as principais características físicas e elétricas do projeto de linhas de transmissão e definidas e caracterizadas as configurações geométricas utilizadas nesse trabalho.

Finalmente, são identificadas as principais estruturas e características dos sistemas dutoviários e definidas as configurações dos dutos a serem utilizadas nessa Dissertação.

#### 2.2 – Linhas de transmissão

#### 2.2.1 – Visão geral

Os sistemas de energia elétrica possuem uma estrutura dividida em geração ou produção, redes de distribuição, redes de transmissão e linhas de interligação.

O transporte da energia gerada diferencia-se pelos níveis de tensões e pela quantidade de energia transportada e são indispensáveis para o perfeito funcionamento do sistema elétrico, pois permitem, além da transmissão, o intercâmbio de energia entre diversos sistemas de acordo com necessidades e disponibilidades diferenciadas, [1]. Esse intercâmbio, por sua vez, possibilita o aumento na confiabilidade de abastecimento, principalmente, em situações anormais ou de emergência, [20,21].

O setor elétrico mundial tem sofrido uma reestruturação. Atualmente, os sistemas elétricos são, tipicamente, divididos em segmentos como: geração, transmissão, distribuição e comercialização.

No Brasil, este processo de reestruturação foi desencadeado com a criação de um novo marco regulatório, a desestatização das empresas do setor elétrico e a abertura do mercado de energia elétrica [22,23].Para gerenciar esse novo modelo do setor elétrico, o governo federal criou novas instituições e alterou funções de algumas já existentes. Essa

estrutura organizacional é composta por: Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Agências Estaduais de Energia Elétrica, Agentes Setoriais e outros, [24]. Esses órgãos têm o objetivo de gerenciar o setor elétrico e garantir a confiabilidade e segurança dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia, [24].

O sistema de energia brasileiro possui uma capacidade de geração de, aproximadamente, 113.683.685kW de potência, [25]. Dentre os principais agentes geradores do país, destacam-se: Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), Furnas Centrais Elétricas S/A(FURNAS), Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A(ELETRONORTE), Centrais Elétricas do Sul do Brasil S/A (ELETROSUL) Companhia Energética de São Paulo (CESP), Itaipu Binacional (ITAIPU), Cemig Geração e Transmissão S/A (CEMIG-GT), dentre outros,[26].

Com relação à transmissão da energia, o sistema de transmissão brasileiro conta com linhas de transmissão e distribuição que possibilitam, atualmente, a interligação entre centros de produção e consumo de quase todo o território nacional,[20,27]. Essa energia é transmitida em vários níveis de tensões.Dentre as principais empresas investidoras em linhas de transmissão no País destacam-se: FURNAS, CHESF, ELETRONORTE, ELETROSUL, CEMIG etc.

O sistema de energia elétrica mineiro possui uma capacidade de geração de energia de aproximadamente 19.275.563 kW, que representa cerca de 16,96% da geração nacional, como pode ser verificado na Figura 2-1, [25].





Com relação ao sistema de transmissão e distribuição de energia, o Brasil conta com cerca de 900 linhas de transmissão, que somam, aproximadamente, 90.000 quilômetros nas tensões de 230, 345, 440, 500 e 750 kV, [26]. Esse sistema é responsável pela transmissão e distribuição da energia elétrica, desde as estações geradoras (hidroelétricas em sua maioria), até os grandes, médios e pequenos consumidores, [25]. Já o sistema de

transmissão mineiro conta com, aproximadamente, 5.320 quilômetros de linhas de transmissão, o que corresponde a cerca de 7% da transmissão nacional, [28].

A CEMIG, por intermédio de suas controladas e coligadas de transmissão de energia elétrica, é a maior concessionária de distribuição de energia elétrica do Brasil em energia transportada e extensão de redes, bem como em número de consumidores. A CEMIG desenvolve atividades de distribuição de energia elétrica em 80 municípios e 5.415 localidades do estado de Minas Gerais, atendendo a,aproximadamente, 96% do território mineiro (18 milhões de pessoas),[29].

Devido à evidente importância da CEMIG para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em Minas Gerais e no Brasil, foram utilizadas configurações de linhas de transmissão reais da concessionária para o desenvolvimento dos estudos desse trabalho. Essas configurações de linhas de transmissão utilizadas no trabalho são descritas na secção 2.2.3. Antes, porém, na seção 2.2.2 destacam-se as principais características geométricas de linhas de transmissão.

#### 2.2.2 – Características de linhas de transmissão aéreas

As linhas aéreas de transmissão podem ser divididas em duas partes: a parte ativa, representada pelos cabos condutores que são os agentes do transporte de energia e a parte passiva, constituída pelos isoladores, ferragens e estruturas (torres e fundações), que asseguram o afastamento dos condutores do solo e entre si. Outros componentes, tais como os cabos para-raios e aterramentos, também compõem as linhas, [1,30].

As estruturas metálicas de linhas de transmissão podem ser classificadas quanto ao número de circuitos (torres com um ou dois circuitos), quanto à disposição dos condutores (disposição triangular, vertical e horizontal), quanto à função na linha (estrutura de suspensão, estrutura de ancoragem e estrutura em ângulo), quanto à tensão da linha, quanto ao formato (tronco-piramidal de circuito simples e duplo, delta e estaiada) e quanto à resistência mecânica das estruturas, [31].

O desempenho elétrico de uma linha de transmissão depende quase que, exclusivamente, de sua geometria, ou seja, das suas características físicas.

A escolha de uma configuração geométrica ideal para linhas aéreas depende de diversos fatores, tais como: nível de tensão, número de circuitos por torre, utilização de cabos pára-raios, cadeias de isoladores, diâmetros e composição de condutores ou feixes de condutores, ferragens etc. Além disso, a configuração da linha de transmissão deve ser escolhida buscando o menor impacto ambiental possível e deve atender aos aspectos de segurança relacionados aos níveis de campos eletromagnéticos gerados, rádio interferência

e nível de ruído audível, especialmente, no caso de linhas de transmissão de extra alta tensão, [30,31].

Um dos primeiros passos no projeto de linhas de transmissão é a definição do traçado que será percorrido pela linha. Nessa etapa deve-se realizar o levantamento topográfico do terreno com informações como: perfil do terreno e solo, cadastro de propriedades, indicação de obstáculos etc. Essas informações são fundamentais para garantir a confiabilidade e segurança do sistema, das pessoas e do meio ambiente, [32].

Assim, é de fundamental importância, nessa etapa, a definição da faixa de passagem ou servidão que corresponde a uma faixa de terra ao longo de toda a linha de transmissão, na qual é proibida a construção de quaisquer estruturas. A faixa de passagem é necessária para garantir o bom desempenho da linha de transmissão e a segurança das instalações e de terceiros, [9]. A largura da faixa de passagem é determinada em função das características civis, elétricas e mecânicas da linha, visando garantir a operação, inspeção e a manutenção da linha, além da perfeita segurança das instalações e de terceiros, [9].

Segundo [9], nos casos mais comuns, as faixas de servidão (segurança) das linhas de transmissão têm a largura mínima de 30 metros (345, 500 kV), 15 metros para cada lado do eixo (em relação a torre); para as linhas de 34,5, 69, 88 e 138 kV a largura mínima é de 20 metros, 10 metros para cada lado do eixo. A partir destas informações, o projeto da linha deve definir a locação das torres neste perfil. Nessa fase, alguns procedimentos são aconselháveis tais como: minimizar a quantidade de torres; espaçar as torres de maneira uniforme; evitar locação de torres em locais com terreno muito acidentados, úmidos ou em processo de erosão; garantir a distância mínima dos cabos ao solo;evitar paralelismo entre linhas de transmissão, linhas férreas, cercas de arames etc., [9].

A escolha dos condutores é também parte importante para definir a configuração geométrica da linha utilizada, pois representam de 30% a 35% do total de investimentos, [33]. Os condutores ideais para linhas de transmissão buscam o compromisso com propriedades mecânicas e elétricas e devem ser constituídos de materiais que possuam determinadas características, tais como: alta condutibilidade elétrica, baixo custo, boa resistência mecânica, baixo peso específico e alta resistência à corrosão e à oxidação. Essas características, por serem conflitantes, não são atendidas, simultaneamente, por nenhum material em particular. Dentre os metais mais utilizados em condutores de linhas de transmissão, estão o alumínio e suas ligas, [20,27].

Nesse trabalho são utilizadas seis linhas de transmissão, que representam configurações geométricas reais de linhas de transmissão do território de Minas Gerais utilizadas pela CEMIG e FURNAS, cujos detalhes são ilustrados a seguir (seção 2.2.3).

#### 2.2.3 – Descrição das linhas de transmissão sob estudo

Como mencionado anteriormente, são utilizadas nessa Dissertação, configurações reais de linhas de transmissão da CEMIG e de FURNAS. A descrição detalhada dessas linhas de transmissão é apresentada a seguir.

Normalmente, ao longo do trajeto das linhas de transmissão diversos tipos de torres são utilizadas em função de diferentes formações de relevo. Na descrição de cada sistema é apresentada, primeiramente, a silhueta mais utilizada no percurso e, em seguida, as principais características geométricas das mesmas são detalhadas em tabelas.

#### A. Sistema 1 - Linha de transmissãoJanaúba-Salinas (138kV)

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

A.2 - Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Tabela 2.1.

Configurações Geométricas - Sistema 1		
Tensão de operação	138 kV	
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 cabospara-raios	Aço galvanizado	
Código do condutor para-raios	EHS	
Distância entre subcondutores	0	
Altura média fase A	12,15m	
Altura média fase B	14,01m	
Altura média fase C	15,87m	
Altura média cabos para-raios	22,90m	
Diâmetro cabos Fase	18,31mm	
Diâmetro cabos para-raios	7,94 mm	
Vão Médio	400 m	
М	3,0 m	

Tabela 2.1 - Resumo das características físicas do sistema 1 – Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 138kV. Fonte,[34].

#### B. <u>Sistema 2 – Linha de transmissão São Gotardo 2–Três Marias(345</u> 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 345kV.

**B.2**- Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Tabela 2.2.

Configurações Geométricas - Sistema 2	
Tensão de operação	345 kV
Comprimento da Linha	165 km
N° de condutores/fase	2
Tipo de condutores fase	CAA
Código dos condutores fase	Ruddy
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	14,29 m
Altura média fase B	14,29 m
Altura média fase C	14,29 m
Altura média cabos para-raios	27,89 m
Diâmetro cabos fase	28,74 mm
Diâmetro cabos para-raios (PR)	9,52 mm
Vão Médio	421 m
M	9,5 m
Ν	6,85 m

Tabela 2.2 - Resumo das características físicas do sistema 2 – Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 345 kV. Fonte[35],

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

C.1- Silhueta mais utilizada no percurso da linha do sistema3, Figura 2-4.



Figura 2-4: Silhueta da torre do sistema 3 - Linha de Transmissão de 500kV

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

Configurações Geométricas - Sistema 3	
Tensão de operação	500 KV
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
Classe de cabos para-raios	7/16 EHS
Distância entre subcondutores	0,457
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
M	10,25 m
N	7,25 m

Tabela 2.3 - Resumo das características físicas do sistema 3 - Linha de Transmissão Trifásica Circuito Simples de 500 kV. Fonte, [36]

#### D. Sistema 4 – Linha de transmissão de Furnas –(500kV)

D.1 - Silhueta mais utilizada no percurso da linha do Sistema 4, Figura 2-5.



Figura 2-5: Silhueta da torre do Sistema 4 – Linha de Transmissão de 500 kV

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

Configurações Geométricas - Sistema 4	
Tensão de operação	500 kV
Comprimento da linha	93,21 km
N° de condutores/fase	4
Tipo de condutores fase	CAA
Código dos condutores fase	Bluejay
N° de cabos para-raios (PR)	2
Tipo dos cabos para-raios	Aço Galvanizado
Classe dos cabos para-raios	3/8 EAR
Distância entre subcondutores	0,95m
Altura média fase A	17,5m
Altura média fase B	25,0m
Altura média fase C	17,5m
Altura média cabos para-raios	30,70m
Diâmetro cabos Fase	31,96mm
Diâmetro cabos para-raios	9,52mm
Vão médio	450m
Μ	7,5m
N	7,5m

Tabela 2.4 - Resumo das características físicas do Sistema 4 – Linha de Transmissão trifásica circuito simples de 500kV. Fonte,[37].

#### E. Sistema 5 – Linha de transmissão 138kV (alta-reatância)

E.1 - Silhueta mais utilizada no percurso da linha do sistema 5, Figura 2-6.



Figura 2-6: Silhueta da torre do sistema 5 – Linha de Transmissão de 138 kV

Г

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

Configurações Geométricas - Sistema 5 - Alta reatância		
Tensão de operação	138 kV	
Comprimento da linha	80 km	
N° de condutores/fase	2	
Tipo de condutores fase	CAA	
Código dos condutores fase	Linnet	
N° de cabos para-raios (PR)	2	
Tipo dos cabos para-raios	Aço Galvanizado	
Classe dos cabos para-raios	3/8 HS	
Distância entre subcondutores	0,457m	
Altura média fase A	22,4m	
Altura média fase B	18,72m	
Altura média fase C	15,0m	
Altura média fase A'	22,4m	
Altura média fase B'	18,72m	
Altura média fase C'	15,0m	
Altura média cabos para-raios	24,4m	
Diâmetro cabos Fase	18,31mm	
Diâmetro cabos para-raios	9,52mm	
Vão médio	450 m	
Μ	7,5m	

Tabela 2.5- Resumo das características físicas do sistema 5 – Linha de Transmissão trifásica circuito duplo de 138kV – Configuração de Alta Reatância. Fonte,[38]

#### F. Sistema 6 – Linha de transmissão 138kV (baixa-reatância)

F.1 - Silhueta mais utilizada no percurso da linha do sistema 6, Figura 2-7.



Figura 2-7: Silhueta da torre do sistema 6 – Linha de Transmissão de 138kV

**F.2** - Dados relacionados às configurações geométricas da linha e às características elétricas dos condutores e cabos para-raios, Tabela 2.6.

Configurações Geométricas - Sistema 6 - Baixa Reatância	
Tensão de operação	138 kV
Comprimento da linha	80 km
N° de condutores/fase	2
Tipo de condutores fase	CAA
Código dos condutores fase	Linnet
N° de cabos para-raios (PR)	2
Tipo dos cabos para-raios	Aço Galvanizado
Classe dos cabos para-raios	3/8 HS
Distância entre subcondutores	0,457m
Altura média fase A	22,4m
Altura média fase B	18,72m
Altura média fase C	15,0m
Altura média fase A'	15,0m
Altura média fase B'	18,72m
Altura média fase C'	22,4m
Altura média cabos para-raios	24,4m
Diâmetro cabos fase	18,31mm
Diâmetro cabos para-raios	9,52 mm
Vão médio	450 m
M	7,5 m

Tabela 2.6 - Resumo das características físicas do sistema 6 – Linha de Transmissão trifásica de 138kV – Configuração de Baixa Reatância. Fonte, [38]

Com relação às configurações geométricas dos sistemas sob estudo, algumas considerações devem ser observadas:

• Quando as fases de uma linha possuem múltiplos subcondutores (feixe) dispostos uniformemente sobre um círculo de raio R, adota-se um condutor equivalente com um *raio* equivalente ( $R_{eq}$ ) que possui a mesma carga e produz o mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo,[20,27]. Matematicamente, o raio equivalente é expresso como:

$$R_{eq} = \sqrt[N]{rNA^{N-1}},\tag{2.1}$$

onde, r é o raio de cada subcondutor; N é o número de subcondutores; e A é o raio do círculo formado pelos subcondutores.

• A altura média (H) dos condutores pode ser expressa matematicamente como [20,27]:

$$H = h_{m\acute{a}x} - \frac{2}{3}f, \qquad (2.2)$$

em que, f é a flecha e  $h_{max}$  é a altura máxima do condutor (na torre), [20,27]. Sendo assim, a altura média considera o cálculo da flecha, que corresponde à distância ortogonal do ponto mínimo da catenária(curva descrita pelo condutor) ao vão nivelado, conforme Figura 2-8.



Figura 2-8: Representação da altura média dos condutores de uma linha de transmissão.

Para o cálculo da flecha (f) devem-se seguir os seguintes passos, [39]:

i.Escolhem-se as hipóteses de carga que devem nortear o projeto;

ii. Estima-se o vão médio, empregado como vão básico para cálculo [m];

iii. Calcula-se o alongamento (deformação plástica) a ser compensado [m/m];

iv.Emprega-se a equação da mudança de estado para calcular a tração mínima [kgf];

v. Calcula-se a flecha nestas condições [m].

Essas etapas de cálculo, por sua vez, dependem de outras variáveis, tais como: temperatura, características dos cabos, vida útil dos condutores (estimado), tração mínima, coeficiente de dilatação térmica, dentre outros, [39].

#### 2.3 – Dutos

#### 2.3.1 –Visão geral

O transporte de energia representa, em média, cerca de 60% das despesas logísticas das empresas e tem um papel fundamental na prestação de serviço aos clientes,[33].
O transporte de fluidos por meio de dutos é o principal meio utilizado pelas companhias de petróleo, gás e saneamento. Como vantagem, esse transporte mostra-se bastante confiável, uma vez que interrupções devido à variabilidade do tempo e a fenômenos meteorológicos são pouco evidenciadas. Além disso, esse meio de transporte apresenta índice baixo de danos e perdas de produtos, [12].

Segundo [40], o sistema dutoviário pode ser classificado em terrestre e submarino. Os dutos terrestres, por sua vez, subdividem-se em:

 Subterrâneos ⇒ são dutos que ficam enterrados com o objetivo de evitar danos causados pelas intempéries e acidentes, provocados por veículos, vandalismo etc. Os dutos enterrados também ficam mais protegidos em caso de corrosão e vazamento, uma vez que estão envolvidos por grandes quantidades de terra. Entretanto, deve-se preocupar com a confiabilidade do transporte quando estes estiverem próximos de linhas férreas.

 Aparentes ⇒ são os dutos visíveis no solo, normalmente encontrados nas chegadas e saídas das estações de bombeamento e carregamento.

 Aéreos⇒são dutos visíveis no solo, utilizados para instalação em grandes vales, cursos d'água, pântanos ou terrenos muito acidentados.

Os dutos também podem ser classificados quanto ao produto transportado e suas finalidades, da seguinte forma,[12]:

 Oleodutos ⇒ responsáveis pelo transporte de petróleo e derivados. Representam o meio de transporte preferencial para suprir tanto as refinarias quanto os grandes centros de consumo de derivados. Pode-se citar, como exemplo, o oleoduto entre Paulínia e Brasília, com cerca de 955 km de extensão e diâmetros de 20 e12 polegadas,que foi inaugurado, em 1996, para o transporte de produtos claros(movimentando, em 2000, cerca de 3.667.000 toneladas,[17].

 Gasodutos⇒responsáveis pelo transporte de gás natural. Atualmente, a TRANSPETRO (Transportadora de Petróleo e derivados da PETROBRÀS - Empresa brasileira responsável pela extração e transporte de petróleo) é responsável por, aproximadamente, 75% do gás natural movimentado no país, abastecendo distribuidoras, residências, estabelecimentos comerciais, indústrias e usinas termelétricas, [41]. Como exemplo, tem-se: Gasoduto Brasil/Bolívia, entre São Paulo e Santa Cruz de La Sierra, com diâmetro de 32 polegadas e, aproximadamente, 2.000 km, [17].

 Minerodutos ⇒ responsáveis pelo transporte de minério. O maior mineroduto do mundo está sendo construído no Brasil. Trata-se do sistema Minas-Rio com 525 km de extensão, da AngloFerrous Brasil (criada pela Anglo American em agosto de 2008). O sistema inclui uma mina de minério de ferro na cidade de Conceição do Mato Dentro e uma unidade de beneficiamento em Alvorada de Minas, ambas em Minas Gerais.

• Polidutos  $\Rightarrow$  dutos empregados no transporte de outros produtos como, vinho, água, cereais etc.

O primeiro duto para transporte de hidrocarbonetos, com 2 polegadas de diâmetro, foi construído em ferro fundido e liga um campo de produção a uma estação de carregamento de vagões, a uma distância de 8 quilômetros na Pensilvânia, em 1865, [42].

No Brasil, o primeiro duto para transporte de petróleo foi construído na Bahia em 1942 e tem diâmetro de 2 polegadas e 1 quilômetro de extensão, ligando a Refinaria Experimental de Aratu ao Porto de Santa Luzia, [43].

O resumo da evolução do sistema dutoviário brasileiro é apresentado na Tabela 2.7, [44].

Tabela 2.7 - Resuma	o da evolução de	o sistema duto	oviário brasileiro.	Fonte:[43]
---------------------	------------------	----------------	---------------------	------------

Data	Acontecimento	
1942	Construção do 1º duto brasileiro.	
1948	Construção da rede de oleodutos Santos e São Paulo.	
1966	Entra em operação o primeiro oleoduto Rio-Belo Horizonte (Orbel), à época o mais extenso do Brasil, com 18 polegadas de diâmetro e 365 km de comprimento. Entram em operação, ainda nesta década, oleodutos em Sergipe, Rio Grande do Sul e São Paulo.	
1970	Entram em atividade: o oleoduto Angra dos Reis-Reduc, e outros, no Rio de Janeiro e em São Paulo.	
1997	Tem início a construção do Gasoduto Bolívia-Brasil.	
1999	Entra em operação o gasoduto Bolívia-Brasil.	
2003	O Brasil conta com, aproximadamente, 5.451 quilômetros de dutos.	
2010	O país conta com cerca de, aproximadamente, 10.000 quilômetros instalados e em funcionamento no país.	
2013	Previsão de, aproximadamente, 3,32 milhões de barris de óleo por dia.	

A principal empresa responsável pela extração e transporte de petróleo, derivados e gás natural no Brasil é a PETROBRÁS. A TRANSPETRO, empresa que realiza o transporte para PETROBRÁS, atende às atividades de transporte e armazenamento de petróleo e derivados, álcool e gás natural, com, aproximadamente, 10.000 km de malha dutoviária, dentre os quais, 7.000 km são oleodutos e, aproximadamente, 3.000 km são gasodutos, [43].

Os principais gasodutos nacionais podem ser observados por meio da Figura 2-9.



Figura 2-9: Mapa dos principais gasodutos do Brasil. Fonte:[42]

#### 2.3.2 – Características físicas dos dutos

As tubulações de aço são largamente utilizadas em oleodutos, gasodutos, minerodutos, encanamentos etc, pois sua resistência às intempéries e às altas pressões permite construir tubulações de milhares de quilômetros. A união entre os tubos de aço é realizada por meio de soldas, [45].

O primeiro passo para a realização de um projeto de sistema dutoviário é a escolha do traçado, principalmente, para a determinação de áreas sujeitas à desapropriação, áreas de reservas indígenas, áreas de patrimônio histórico, cultural e arqueológico. Esses são considerados bens da União e precisam ser preservados e/ou resgatados, [46].

Em seguida, faz-se necessária a definição das características físicas do duto, tais como: composição, diâmetro, revestimento, extensão etc. Essas características dependem diretamente do material transportado e da vazão desejada, [45,47].

A escolha da composição físico-química dos dutos está, diretamente, ligada a fatores relacionados a sua utilização, tais como: (i) duto enterrado, aéreo ou submarino, (ii) material a ser transportado (gás, óleo, minérioetc), (iii) extensão da malha dutoviária e outros. Algumas composições químicas de dutos podem ser observadas em [45,48,49].

No que diz respeito a revestimento, os dutos podem ser revestidos com diferentes materiais de acordo com a sua aplicação, como por exemplo, [50]:(i) polipropileno sólido e sintético (isolamento térmico para águas profundas, proteção anticorrosiva e mecânica, resistência a pressão hidrostática); (ii)polipropileno cristal (revestimento térmico para indústria, com polímero heterofásico de baixíssima fluidez e excelente resistência ao impacto); (iii)polietileno em tripla camada (proteção anticorrosiva externa para tubulação enterrada ou submersa); (iv)pintura líquida externa (proteção anticorrosiva externa de tubos de aço para ambientes úmidos ou secos) etc. De modo geral, a espessura dos dutos (função principalmente da pressão) variam entre 5 e 8mm.

No âmbito de interesse desta Dissertação, as principais características físicas dos dutos para o estudo do acoplamento elétrico são: extensão e diâmetro.

Os diâmetros dos dutos variam, principalmente, de acordo com o material transportado e a vazão desejada. No Brasil, a malha dutoviária é composta, principalmente, por dutos com diâmetros variando de 4 a 32 polegadas.

Com relação à extensão, os dutos podem possuir poucos quilômetros (Gasoduto GNL-PCÉM-CEARÁ -19 km), centenas de quilômetro (Oleoduto Paulínia-Brasília – 525 km), e até milhares de quilômetros (Gasoduto Brasil-Bolívia – 2000 km), [17,18].

Sendo assim, com o objetivo de analisar a sensibilidade em relação a essas características, utilizam-se três configurações distintas de malhas dutoviárias com passagem pelo território mineiro. Vale ressaltar que se tratam de configurações reais utilizadas pela TRANSPETRO para o transporte de gás natural. As características principais dos sistemas dutoviários sob estudo são apresentadas na Tabela 2.8.

Duto	Origem	Destino	Extensão (Km)	Diâmetros (m)
GASPAJ	Paulínia (SP)	Jacutinga ( MG)	80	0,35
GASBEL I	Duque de Caxias (RJ)	Betim (MG)	357	0,40
GASBEL II	Volta Redonda (RJ)	São Brás do Suaçuí (MG)	260	0,45

Tabela 2.8 - Principais características dos sistemas dutoviários sob estudo. Fonte [17]

### 2.4 – Linhas de transmissão e dutos

Com o crescente desenvolvimento socioeconômico brasileiro, as indústrias e empresas que utilizam os dutos para transporte de fluidos têm aumentado suas malhas dutoviárias, assim como as companhias de energia elétrica tem aumentado também suas linhas de transmissão, ambas com extensão de milhares de quilômetros. Isso torna cada vez mais comum o compartilhamento dessas áreas entre empresas de transporte de fluidos e de energia elétrica, [11].

Cruzamentos e paralelismo entre dutos e linhas de transmissão são encontrados por todo o território nacional.

Sendo assim, existe a preocupação cada vez maior das empresas com relação à interferência eletromagnética entre as linhas e os dutos. Essa preocupação abrange, principalmente, os aspectos de segurança pessoal de funcionários, que geralmente estão em contato com esses dutos e, também,os riscos de vazamento de produtos causados pela corrosão dos dutos expostos a campos eletromagnéticos, [13].

Os incidentes relacionados a vazamentos por desgaste da proteção catódica são causados, principalmente, por interferência externa, defeitos de fabricação/falha do material ou corrosão.

A corrosão atmosférica é um dos principais causadores de falhas e acidentes em dutos, visto que esta causa perda de espessura na parede da tubulação e com isso a integridade estrutural do duto é reduzida, aumentando assim o risco de falhas.

Algumas medidas para prevenir a tubulação da corrosão atmosférica podem ser realizadas. Uma das medidas mais utilizadas para prevenir os efeitos deste tipo de corrosão é o devido isolamento do metal do ambiente agressivo. Entretanto, é verificado que nenhum revestimento está livre de falhas e, por esta razão, o potencial de corrosão nunca será completamente removido. A redução deste potencial depende de alguns fatores principais, tais como a boa qualidade do revestimento e da sua aplicação, a qualidade do programa de inspeção do duto e a qualidade das possíveis correções do mesmo, [12].

Contudo, vale ressaltar (como já destacado no capítulo 1), que a análise destas falhas está fora do escopo desta Dissertação.

Como já frisado no capítulo 1, este trabalho objetiva estudar a interação elétrica (capacitiva) entre linhas de transmissão (regime permanente) e dutos metálicos (aéreos), cujas características estão descritas nas seções anteriores. É oportuno adiantar que somente são considerados dutos cujos percursos são paralelos às linhas de transmissão.

## 2.5 – Conclusão

Neste capítulo apresenta-se uma visão geral dos sistemas sob estudo: linhas de transmissão e dutos. No que diz respeito às Linhas de transmissão, realiza-se, na subseção 2.2.1, um estudo da evolução do sistema de energia nacional e são apresentados dados relacionados à quantidade de energia gerada e transmitida do Brasil e do estado de Minas Gerais. Em seguida, na subseção 2.2.2, são apresentadas as características mais relevantes para o projeto de linhas de transmissão, tais como: definição do traçado (faixa de passagem), escolha dos condutores fase e para-raios, definição da estrutura da torre, configuração geométrica e outros. Finalmente, na subseção 2.2.3, é realizada uma descrição detalhada das linhas de transmissão utilizadas nesse estudo, incluindo dados de operação e a configuração geométrica.

Com relação aos dutos, na subseção 2.3.1, apresenta-se uma visão geral da importância do sistema dutoviário para o transporte de várias fontes de energia e realiza-se um resumo da evolução do sistema dutoviário, com os acontecimentos mais relevantes de cada fase. Em seguida, na subseção 2.3.2, são descritas as principais características físicas dos dutos, tais como: extensão, diâmetro, composição física, revestimento, dentre outros. Finalmente, faz-se uma descrição detalhada a respeito das configurações geométricas dos dutos utilizados nesse trabalho.

Além disso, na seção 2.4, evidencia-se a importância do estudo a respeito da interação entre as linhas de transmissão e dutos, destacando-se a motivação para tal estudo. Essa motivação baseia-se em aspectos de segurança, tanto para os dutos, quanto para pessoas em eventual contato com essas estruturas.

Os detalhes relacionados à interação entre linhas de transmissão e dutos, bem como a modelagem eletromagnética utilizada para tal estudo é apresentada no capítulo 4. Antes, porém, apresenta-se, no capítulo 3, um breve estudo do estado da arte.

# CAPÍTULO 3 -ESTUDO DO ESTADO DA ARTE

# 3.1 – Introdução

Como mencionado no primeiro capítulo, no presente trabalho, pretende-se realizar uma avaliação sobre a interferência elétrica entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos aéreos. Para isso, é necessário um estudo sobre os modelos eletromagnéticos utilizados para representar tal interferência e um estudo sobre os efeitos da mesma em seres humanos e em dutos.

O presente capítulo apresenta, primeiramente, os efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos (seção 3.2).

A seção 3.3 apresenta os aspectos básicos que envolvem o cálculo do campo elétrico. Nesta seção, são descritas as principais metodologias para cálculo das densidades lineares de carga, destacando as vantagens da utilização do Método de Simulação de Cargas, que é o método utilizado nesse trabalho. Além disso, são apresentadas duas metodologias para o cálculo dos módulos de campo elétrico (Método das Elipses e método aproximado).

Na seção 3.4, são apresentados os principais estudos e metodologias utilizados no cômputo dos potenciais induzidos em dutos por linhas de transmissão.

Finalmente, na seção 3.5, são apresentados os principais estudos sobre a interferência eletromagnética entre linhas de transmissãoe dutos metálicos.

# 3.2 – Avaliação dos efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos

A sociedade contemporânea tem manifestado preocupações quanto a diversos fatores, tais como: níveis de poluição do ar e água, excesso de lixo e resíduos gerados pela sociedade e pela indústria, dentre outras. Nesse contexto, a preocupação com exposição a campos eletromagnéticos tem, nas últimas décadas, se tornado fator relevante em projetos de construção ou ampliação de sistemas de transmissão, [51,52,53].

A possibilidade de uma associação causal entre campos eletromagnéticos de baixa frequência e câncer foi apresentada, por exemplo, em 1979, em um estudo epidemiológico de tipo caso-controle sobre neoplasias na infância, realizado em Denver Estados Unidos, [54]. Esse trabalho indicou uma relação entre a incidência de câncer em crianças (Leucemia) e a proximidade de suas casas de linhas de transmissão de energia. Um pouco mais tarde essa questão também é estudada por[55,56] com relação à exposição ocupacional.

A partir desses trabalhos vários outros estudos epidemiológicos e experimentais têm avaliado as possíveis relações entre câncer (gerados por campos eletromagnéticos)em humanos, animais de laboratório e células em cultura.

Dentre as conclusões apresentadas por [55,57,58,59,60,61,62] com relação especialmente a campos elétricos, destacam-se as seguintes:

• A exposição de seres humanos e animais a campos elétricos e magnéticos em 60Hz induz correntes elétricas internas. A densidade da corrente induzida é não uniforme em todo o corpo.

 Os campos elétricos de frequência 50 ou 60 Hz possuem baixa capacidade de penetração, a grande maioria dos efeitos biológicos está associada principalmente à exposição a campos magnéticos.

 Não existem dados experimentais ou teóricos sobre a densidade de corrente induzida nos tecidos e células que levam em consideração as variações locais das propriedades elétricas do meio (condutividade e permissividade).

 Os níveis de exposição de campos elétricos e outras características de campos magnéticos (harmônicos, transitórios, variações espaciais e temporais) tem recebido pouca atenção e existe pouca informação disponível a respeito dos níveis de exposição a campos elétricos que não seja o valor médio quadrático da intensidade de campo.

• Não há evidências científicas convincentes de que a exposição a campos elétricos e magnéticos – 60Hz – causa câncer em animais.

 Há evidências científicas de respostas comportamentais a campos elétricos e magnéticos (consideravelmente maiores do que aqueles encontrados em ambientes residenciais). Entretanto, efeitos neuro-comportamentais adversos devido a campos extremamente elevados não foram comprovados. Evidências laboratoriais mostram claramente que animais são capazes de detectar e responder a campos elétricos externos da ordem de 5kV/m. Além do crescente interesse sobre exposição humana a campos eletromagnéticos, existem normas nacionais e internacionais que regulamentam níveis máximos de campos elétricos admitidos e máximas correntes induzidas em corpos.

Segundo [7],os níveis máximos de exposição a campos elétricos (em 60 Hz) é de 5kV/m. Já[4,5], regulamentam em 4,2kV/m e 5kV/m, respectivamente, como máximo campo elétrico permitido.

Segundo [63], os níveis de exposição a campos elétricos e magnéticos são estabelecidos a partir de restrições básicas fundamentadas por meio de grandezas físicas, correlacionadas aos efeitos biológicos da exposição.

Níveis de intensidade de densidades de correntes induzidas superiores a 100 mA/m<sup>2</sup>, na faixa de frequência de 4 Hz a 1kHz, são capazes de provocar excitações no sistema nervoso central e outros efeitos agudos. Por esse motivo, para as frequências de 50 e 60 Hz, a grandeza utilizada para especificar tais restrições é a densidade de corrente. A partir desse parâmetro, foi estabelecido que para frequências na faixa de 4 Hz a 1 kHz, a exposição ocupacional deve ser limitada a campos com densidades de corrente inferiores a 10 mA/m<sup>2</sup>, adotando-se um fator de segurança igual a 10. Para o público em geral, foi adotado o fator de segurança de 50, resultando em uma restrição básica para a exposição de 2mA/m<sup>2</sup>, [63].

Em função da pouca disponibilidade de dados relacionando as correntes transitórias com efeitos na saúde para a faixa de frequência de 4 Hz a 1 kHz. A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda que os valores indicados nas restrições para densidades de correntes induzidas por transitórios ou campos com picos de duração muito curta, sejam tomados como valores instantâneos e não como médias temporais, [63].

No que diz respeito a níveis máximos de corrente induzida, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece que até a frequência de 2,5 kHz o nível de referência para corrente de contato para exposição do público em geral é de 0,5 mA. Esse valor corresponde à metade do estabelecido para a exposição ocupacional pela OMS, [63].

A Tabela 3.1, apresenta um resumo dos principais valores limites de exposição a campos elétricos, densidades de correntes e correntes induzidas, [2,4,5,7,63].

Valores Limite Público Geral	Intensidade Campo Elétrico (kV/m)	
ICNIRP[4]	5	
IEEE - C95.6[5]	4,2	
NBR 5422[2]	5	
NBR 15415[7]	5	
Valores Limite	Densidade de Corrente (mA/ m <sup>2</sup> )	
Valores Limite Exposição Ocupacional[4,5]	Densidade de Corrente (mA/ m <sup>2</sup> ) 10	
Valores Limite Exposição Ocupacional[4,5] Público Geral[4,5]	Densidade de Corrente (mA/ m <sup>2</sup> ) 10 2	
Valores Limite Exposição Ocupacional[4,5] Público Geral[4,5] Valores Limite	Densidade de Corrente (mA/ m <sup>2</sup> ) 10 2 Correntes Induzidas (mA)	

Tabela 3.1 - Valores limite de campos elétricos, densidades de correntes e correntes induzidas

# 3.3 – Aspectos básicos envolvidos no cálculo de campo elétrico

#### 3.3.1 –Introdução

Linhas de transmissão em operação normal (60 Hz) geram campos elétricos em suas proximidades. Existem dois cálculos de níveis de campos elétricos que são fundamentais no desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão: o campo elétrico na superfície dos condutores (superficial) e o campo elétrico no nível do solo (ou a 1 m do solo).

O campo elétrico superficial está associado às perdas por efeito corona, aos níveis de interferência e de ruído audível. O efeito corona ocorre quando o valor do gradiente de potencial na superfície dos condutores excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar, [64]. As perdas por efeito corona têm implicações diretas com a economia das concessionárias e no meio ambiente, por isso a necessidade de um estudo a esse respeito.

Níveis de campos elétricos na superfície dos condutores têm sido estudados por [64,65,66,67,68,69]. Vale ressaltar que os campos elétricos superficiais não são objeto de estudo dessa Dissertação.

O cálculo do campo elétrico no nível solo é importante devido à necessidade de respeitar limites máximos estabelecidos para essa grandeza, de modo a garantir a segurança de pessoas ou animais localizados nas proximidades das linhas de transmissão, [2,3,4,5,7].

Para o cálculo de níveis de campos elétricos (no nível do solo), gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente, faz-se necessário o conhecimento das características geométricas da linha de transmissão e das distribuições de carga na superfície dos condutores, que está associada à tensão de operação da linha, [30,27].

Seja um sistema constituído por uma linha monofásica, imersa no ar, localizada a uma altura H do solo, representado pela Figura 3-1.



Figura 3-1: Esquema de representação de uma LT monofásica

Considerando o sistema (linha, ar e solo) linear, homogêneo, isotrópico e não dispersivo, o campo elétrico em um ponto qualquer (P), localizado na região entre os condutores e o solo (no ar), pode ser calculado utilizando-se a equação (3.1), [30,70,71,72].

$$\vec{E} = \frac{\rho_{\rm L}}{2\pi\varepsilon_0 \rho} \hat{a}_{\rho}$$
(3.1)

Na equação (3.1),  $\varepsilon_0$  (=8,854x10<sup>-12</sup> F/m) é a permissividade do vácuo (~ar), é a densidade linear de carga distribuída na superfície dos condutores (C/m),  $\hat{a}_{\rho}$  é o vetor unitário que fornece direção e sentido ao campo elétrico e é a distância vertical entre a distribuição de carga e o ponto (P).Essa equação é obtida por meio de manipulações da terceira equação de Maxwell (Lei de Gauss), [30,70,71,72].

Simultaneamente com a equação (3.1), são utilizados, no cálculo dos níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão, o Método das Imagens (MI) e o Teorema da Superposição.

Para utilização do MI, o solo é considerado como um condutor elétrico perfeito (CEP), ou seja, sua condutividade tende a infinito. Seu efeito no cômputo dos níveis de campo elétrico é substituído por cargas imagens, localizadas à mesma distância da interface de separação entre os dois meios e com densidade linear de carga de sinal contrário. A aplicação do MI pode ser representada pela Figura 3-2.



Figura 3-2: Aplicação do MI

Com a aplicação do MI e o teorema da superposição, a expressão para cálculo do campo elétrico (equação 3.1), pode ser expandida conforme equação (3.2).

$$\vec{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0\rho_R} \hat{a}_{\rho R} - \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0\rho_I} \hat{a}_{\rho I}$$
(3.2)

Na equação (3.2), tem-se que:

•  $\rho_R$  é a distância entre o ponto de observação e a projeção vertical do mesmo no condutor real;

*ρ<sub>I</sub>* é a distância entre o ponto de observação e a projeção vertical do mesmo no condutor imagem;

•  $\hat{a}_{\rho R}$  é o vetor unitário que define direção e sentido do vetor campo elétrico (condutor real);

•  $\hat{a}_{\rho t}$  é o vetor unitário que define direção e sentido do vetor campo elétrico (condutor imagem).

Para uma linha de transmissão trifásica, devido ao fato de tratar-se de um sistema linear, o campo elétrico total pode ser obtido como a soma de todas as parcelas de campo geradas pelas distribuições de carga e suas imagens (teorema da superposição), [30,70,71,72].

Em [30,73], os autores apresentam a metodologia descrita acima com detalhes; além disso, esses trabalhos apresentam exemplos da utilização dessa metodologia para o cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão de configurações reais.

No Brasil, [73,74,75,76]apresentam resultados de cálculos de campo elétrico utilizando tal metodologia. Esses trabalhos são relevantes, uma vez que apresentam resultados para configurações de linhas de transmissão nacionais.

Alguns autores utilizam metodologias diferenciadas para o cálculo do campo elétrico gerado por linhas de transmissão. Em [77], os autores desenvolveram um método analítico para cálculo de campo elétrico que utiliza expansões multipolos para simplificação das expressões matemáticas. Em [78], o autor utiliza o método dos elementos de contornopara análise dos campos elétricos gerados por linhas de transmissão.

Diante do exposto, considerando-se as metodologias apresentadas nessa seção e assumindo que a geometria do sistema é conhecida, por meio da equação 3.2, observa-se que, para o cálculo dos níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão, faz-se necessário então o conhecimento das distribuições de cargas nas superfícies dos condutores ( $\rho_I$ ).

Na seção seguinte são apresentadas as diversas metodologias, adotadas pelas referências pesquisadas, para obtenção das distribuições de cargas nos condutores. Além disso são apresentadas as duas metodologias para obtenção do módulo do campo elétrico (método das elipses e método aproximado), bem como as técnicas de medição de campo elétrico.

#### 3.3.2 – Distribuições de cargas nos condutores (1.)

Para o cálculo de níveis de campos elétricos, gerados por linhas de transmissão, operando em regime permanente, cada condutor é caracterizado por um fasor de tensão (V), com partes real e imaginária. As cargas, por unidade de comprimento (), nos

condutores podem ser obtidas analiticamente ou por meio de métodos numéricos, [20,30].

O conhecimento do valor das cargas elétricas em cada um dos condutores da linha é o ponto de partida para o cálculo dos níveis de campos e potenciais elétricos.

Para sistemas físicos simples, as cargas nos condutores, podem ser obtidas utilizando-se solução analítica, [20,30]. No entanto, muitas vezes os sistemas físicos são muito complexos e essa solução analítica torna-se inviável, [79]. Em tais casos utilizam-se métodos numéricos para o cálculo das cargas nos condutores e consequentemente dos níveis dos campos elétricos, [80]. Dentre eles destacam-se: Método das Diferenças Finitas, Método de Monte Carlo, Método dos Momentos, Método de Simulação de Cargas (MSC) e o Método de Simulação de Carga de superfície.

O MSC é uma das técnicas mais utilizadas para problemas de cômputo de distribuições de cargas, pois envolve a solução de uma quantidade reduzida de equações

lineares em um custo computacional inferior quando comparado a outras técnicas, [30,74,75,81].

Segundo[81], o MSC apresenta como princípio básico a substituição das distribuições de cargas contínuas reais sobre a superfície dos condutores por um conjunto discreto de distribuições de cargas fictícias. As cargas fictícias são determinadas respeitando as condições de contorno do problema (potenciais dos condutores e na interface ar-solo). O MSC pode ser expresso, matematicamente, por meio da equação (3.3).

$$[\rho_L] = [P]^{-1}[V] \tag{3.3}$$

Na equação (3.3), tem-se que:

- [V] é o vetor de tensões cujos elementos correspondem aos fasores de tensões dos condutores do sistema sob estudo (V).
- [P] é a matriz de coeficientes de potenciais de Maxwell (m/F).
- [P]<sup>-1</sup> é a matriz de capacitância do sistema (F/m);
- é o vetor de fasores de densidades lineares de carga em todos dos condutores do sistema sob estudo (C/m).

Solucionando-se a equação (3.3), é possível obter a densidade linear de carga na superfície de cada condutor () e, consequentemente, o campo elétrico gerado pela linha de transmissão, conforme as equações(3.1) e (3.2).

O MSC pode ser aplicado a problemas bidimensionais com simetrias diferentes, tais como, cilíndrica, elíptica, esférica, dentre outras, [81,82,83,84,85,86]. Além disso, o MSC pode ser aplicado também a problemas tridimensionais como em [81,87].

Em [30,73,75,76,88,89], utiliza-se o MSC para obtenção da solução numérica para problemas de cálculos de campo elétrico, com a representação das distribuições de cargas, nos condutores das linhas de transmissão, por densidades lineares de cargas distribuídas uniformemente em linhas de comprimento infinito (ou finito).

#### 3.3.3 – Módulo do campo elétrico

O campo elétrico (), gerado pelas distribuições de cargas elétricas nos condutores de linhas de transmissão monofásicas e trifásicas, em regime permanente, pode ser expresso no domínio do tempo ou no domínio fasorial. Como o sistema é linear, a frequência do campo elétrico é a mesma das distribuições de cargas elétricas e tensões dos condutores (60 Hz). As representações nos domínios do tempo e fasorial são caracterizadas

 $\rightarrow$ 

por três grandezas: frequência, amplitude e defasagem angular. A diferença, em termos matemáticos, de tais domínios é a seguinte: no tempo, os componentes de correspondem a funções senoidais vetoriais, enquanto no fasorial a fasores-vetores.

Considere um sistema composto por uma linha de transmissão trifásica de configuração horizontal (fases A, B e C), apresentado na Figura 3-3 (sem perda de generalidade).



Figura 3-3: Linha de transmissão trifásica de configuração horizontal.

Em termos práticos, tem-se que: (i) os comprimentos dos condutores das fases A, B e C são muito maiores do que os seus respectivos raios e (ii) as distâncias entre as fontes (distribuições lineares de carga nas fases A, B e C) e o ponto onde o campo elétrico é calculado são muito menores que os comprimentos dos condutores. Adicionalmente, as presenças das torres e das cadeias de isoladores não são consideradas. Desta forma, o cálculo do campo elétrico pode ser realizado em duas dimensões. Devido a estes fatos, a Figura 3-3 ilustra a seção transversal (plano yz) em relação ao eixo longitudinal (eixo x) da linha de transmissão. A interface ar-solo corresponde ao plano xy, onde z=0. Nessa situação, o campo elétrico gerado pela linha, em um ponto genérico do espaço (para z>0), possui componentes na direção yz e pode ser escrito matematicamente conforme a equação (3.4).

$$E = E_{v}(t)\hat{a}_{v} + E_{z}(t)\hat{a}_{z}$$
(3.4)

Na equação (3.4),  $\hat{a}_y e \hat{a}_z \tilde{s}a$  os vetores unitários ao longo de y e z, respectivamente, e  $E_y(t) = E_y \cos(\omega t + \phi_y)$  e $E_z(t) = E_z \cos(\omega t + \phi_z) \tilde{s}a$  os componentes senoidais do campo elétrico no tempo. O campo elétrico total pode ser escrito em função dos componentes nos eixos y e z conforme equações (3.5) e (3.6).

$$E_{y}(t) = E_{y} \left[ \cos(\omega t) \cos(\phi_{y}) - \sin(\omega t) \sin(\phi_{y}) \right]$$
(3.5)

$$E_z(t) = E_z[\cos(\omega t)\cos(\phi_z) - \sin(\omega t)\sin(\phi_z)]$$
(3.6)

Nas equações (3.5) e (3.6), e são as amplitudes dos componentes do campo elétrico em y e z, respectivamente, e e são os respectivos ângulos de fase no tempo.

Como descrito anteriormente, o campo elétrico pode, também, ser representado no domínio fasorial. As equações (3.7) e (3.8) ilustram seus componentes.

$$E_{SY} = E_Y e^{j\phi Y} = E_Y \angle \phi_Y \tag{3.7}$$

$$E_{SZ} = E_Z e^{j\phi Z} = E_Z \angle \phi_Z \tag{3.8}$$

Nas equações(3.7) e (3.8), tem-se que:

• 
$$j = \sqrt{-1};$$

- E<sub>sy</sub> = E<sub>y</sub>cosØ<sub>y</sub> + jE<sub>y</sub>senØ<sub>y</sub>corresponde ao fasor campo elétrico em y, E<sub>ry</sub> = E<sub>y</sub>cosØ<sub>y</sub> à sua parte real e E<sub>iy</sub> = E<sub>y</sub>senØ<sub>y</sub> à imaginária;
- E<sub>sz</sub> = E<sub>z</sub>cosØ<sub>z</sub> + jE<sub>z</sub>senØ<sub>z</sub> corresponde ao fasor campo elétrico em z, E<sub>rz</sub> = E<sub>z</sub>cosØ<sub>z</sub> à sua parte real e E<sub>iz</sub> = E<sub>z</sub>senØ<sub>z</sub> à imaginária, respectivamente.

Assim sendo, tem-se que:

$$\vec{E}_s = E_{sy}\,\hat{a}_y + E_{sz}\,\hat{a}_z \tag{3.9}$$

Na equação (3.9)  $\vec{E_s}^{1}$  é o fasor-vetor do campo elétrico  $\vec{E}$ .

O módulo do vetor campo elétrico descrito acima pode ser obtido de duas maneiras, utilizando-se o método das elipses e um método aproximado. Ambos são descritos a seguir.

#### Método das Elipses

Uma análise das equações (3.4) a (3.6) indica que o vetor campo elétrico possui polarização elíptica. Assim, em cada ponto do espaço, ao longo de um ciclo (T=1/f≈17 ms),

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> O subscrito "s" indica representação no domínio fasorial.

aponta deste vetor descreve uma elipse. O semi-eixo maior desta elipse corresponde ao valor máximo do campo elétrico ( $E_{Máx}$ ) ou módulo do campo elétrico. Desta forma, pode-se calcular  $E_{Máx}$  em cada ponto genérico do espaço de interesse. A Figura 3-4 ilustra uma elipse genérica, em um ponto qualquer. Esta forma de calcular  $E_{Máx}$  corresponde ao método das elipses, cujos detalhes são apresentados a seguir.



Figura 3-4: Representação do Campo Elétrico Elipse para um ponto no espaço

Inicialmente, determina-se o componente do campo elétrico ao longo de uma direção definida por um ângulo entre o plano horizontal (à interface ar-solo) e o campo elétrico total. Conforme demonstrado na Figura 3.4, este ângulo é denominado  $\alpha$  e o componente do campo elétrico,  $E_{\alpha}$ .

A magnitude do campo elétrico ( ) que é a componente do campo ao longo de uma direção definida pelo ângulo α, com respeito a um plano horizontal, pode ser dada pela equação (3.10), [20,30].

$$(E_{\alpha})^{2} = (E_{rz}\sin\alpha + E_{ry}\cos\alpha)^{2} + (E_{iz}\sin\alpha + E_{iy}\cos\alpha)^{2}$$
(3.10)

Para se determinar os ângulos correspondentes aos campos máximo e mínimo, deriva-se a equação (3.10), em relação αα, e iguala-se o resultado a zero, equação (3.11).

$$\frac{d(E_{\alpha})^2}{d\alpha} = 0 \tag{3.11}$$

Em seguida, utilizando manipulações obtém-se a equação (3.12), que corresponde a uma equação quadrática, na qual a variável desconhecida é , [20,30].

$$\tan^{2}\alpha(E_{rz}E_{ry} + E_{iz}E_{iy}) + \tan\alpha(-E_{iz}^{2} + E_{iy}^{2} + E_{rz}^{2} + E_{ry}^{2}) - (E_{rz}E_{ry} + E_{iz}E_{iy}) = 0$$
(3.12)

A solução da equação (3.12) corresponde a dois ângulos ( $\alpha_1 \in \alpha_2$ ), que determinam os semi-eixos maior e menor da elipse. As magnitudes dos semi-eixos são determinadas pela substituição dos valores de  $\alpha$ ,obtidos em (3.12), na equação (3.10).

Uma forma alternativa de se calcular  $E_{Máx}$  (módulo do campo elétrico), que gera o mesmo resultado oriundo do método das elipses, é pela aplicação da equação (3.13).

$$E(t) = \sqrt{\left|E_{y}(t)\right|^{2} + \left|E_{z}(t)\right|^{2}}$$
(3.13)

A amplitude de E(t) é igual a  $E_{Máx}$ .

#### Método Aproximado

A equação (3.14) permite o cálculo do módulo do fasor-vetor campo elétrico ( $E_s$ ), representado na equação (3.9).

$$E_{MAX} = E_s = \sqrt{E_{sy}^2 + E_{sz}^2}$$
(3.14)

Os módulos de  $E_{sy}$  e  $E_{sz}$  são determinados pelas equações (3.15) e (3.16), respectivamente.

$$E_{sy} = \sqrt{E_{ry}^{2} + E_{iy}^{2}}$$
(3.15)

$$E_{sz} = \sqrt{E_{rz}^2 + E_{iz}^2}$$
(3.16)

A forma de determinação de  $E_s$  descrita acima, equações (3.14) a (3.16), é denominada nesta Dissertação "método aproximado".

#### 3.3.4 – Medição de níveis de campos elétricos

O aumento do interesse na caracterização da exposição humana a campos elétricos e magnéticos quase estáticos, em vários ambientes, levou ao desenvolvimento de metodologias e equipamentos para medição de níveis desses campos.

Alguns aspectos são relevantes no processo de medição de níveis de campos, tais como, [7,73,90,91,92,93]: (i) a medição deve ser realizada, preferencialmente, no meio dos vãos das linhas, onde os campos apresentam maiores intensidades e não são influenciados por estruturas metálicas que suportam os respectivos condutores; (ii) os campos elétricos e magnéticos devem ser medidos a uma altura de 1 metro acima do nível do solo, para comparação com os níveis de segurança recomendados; (iii) a medição pode ser realizada também a 1,70 metros acima do nível do solo, para avaliação a uma altura correspondente à

altura média da população e (iv) em áreas urbanas e regiões habitadas ou com circulação, os pontos para mapeamento das mesmas devem ser selecionados considerando-se as condições dos locais, tais como praças, avenidas, hospitais, escolas etc., dentre outros.

Além dos aspectos relacionados à segurança das pessoas, o processo de medição de níveis de campos elétricos, gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente, é de fundamental importância para validação dos cálculos realizados por programas desenvolvidos por pesquisadores, [30,74,75,88].

Resultados de medições de níveis de campos elétricos são apresentados em [73,76,89,90,91,93]. Em [90], os autores apresentam um guia para medição de níveis de campo elétrico. Em [94] há a disponibilização de um pacote computacional para cálculo desses níveis.

### 3.4 – Cálculo do potencial elétrico

Dado dois pontos quaisquer P e R (de uma região onde existe campo elétrico), os níveis de potencial no ponto P, em relação ao do ponto R, são obtidos, normalmente, mediante a solução numérica da integral de linha do campo elétrico (equação 3.1), dada pela equação (3.17), [30,70,71,72].

$$V_p - V_R = -\int_R^p \overrightarrow{E.dl}$$
(3.17)

A solução da equação (3.17) para uma linha de transmissão monofásica, onde o condutor pode ser aproximado por uma linha infinita (com distribuição uniforme de carga por unidade de comprimento,  $\rho_L$ ), Figura 3-1, é dada pela equação (3.18).

$$V_{P} = \frac{\rho_{L}}{2\pi\varepsilon_{0}} \ln\left(\frac{\rho_{R}}{\rho_{P}}\right) + V_{R}$$
(3.18)

Deve-se conhecer o potencial no ponto de referência R ( ). Na equação (3.18), e

são as distâncias verticais, respectivamente, dos pontos P e R ao condutor da linha de transmissão. Normalmente, a referência de potencial corresponde à superfície do solo. Como o solo é um condutor elétrico perfeito, =0. Neste caso,  $\rho_R = H$ .

Utilizando-se o método das imagens, a expressão para o cálculo dos níveis de potencial, é dada pela equação (3.19), conforme ilustrado na Figura 3.5.

$$V_{P} = \frac{\rho_{L}}{2\pi\varepsilon_{0}} \ln\left(\frac{\rho_{Pi}}{\rho_{PR}}\right)$$
(3.19)

Na equação (3.19),  $\rho_{PR}$  e  $\rho_{PI}$  correspondem, respectivamente, às distâncias verticais entre o ponto P e os condutores reais (+ $\rho_L$ ) e imagens (- $\rho_L$ ). No caso de umalinha de transmissão trifásica, aplica-se a equação (3.19) para calcular o potencial gerado por cada fase (A, B e C) e sua respectiva imagem. O potencial total (composto por três parcelas) é obtido por superposição.



Figura 3-5: Ilustração da aplicação do método das imagens para o cálculo do potencial elétrico.

Nas literaturas técnicas consultadas (tanto em termos nacionais quanto internacionais) existem alguns trabalhos que utilizam essa metodologia para cálculo de potencial induzido, como por exemplo, [30,73,74,75,88,95,96].

Além disso, [97] apresenta um guia com formulações práticas para computar níveis de potencial induzido em dutos localizados nas proximidades de linhas de transmissão. De acordo com esse guia tais potenciais podem ser obtidos por meio da equação (3.20). Ressalta-se que os cabos para-raios não são considerados nessa equação e que tal equação é valida apenas para circuito de configuração simples.

$$V_{D} = 0.25VH_{D} \sqrt{\left(\frac{h_{1}^{2}}{d_{1d}^{4}} + \frac{h_{2}^{2}}{d_{2d}^{4}} + \frac{h_{3}^{2}}{d_{3d}^{4}} - \frac{h_{1}h_{2}}{d_{1d}^{2}d_{2d}^{2}} - \frac{h_{2}h_{3}}{d_{2d}^{2}d_{3d}^{2}} - \frac{h_{3}h_{1}}{d_{3d}^{2}d_{1d}^{2}}\right)}$$
(3.20)

Na equação (3.20), tem-se que:

- V é a tensão entre fases em (kV);
- V<sub>D</sub>é o potencial elétrico induzido no duto (também denominado "potencial duto-solo sem carga") isolado e paralelo à linha de transmissão

- *H<sub>D</sub>*é a altura do duto em relação ao solo (m);
- *h<sub>k</sub>*é a altura média dos condutores fase da linha de transmissão (m) normalmente k=1,2,3;
- $d_{Kd}$ é a distância entre o condutor fase (k) e o duto (d) em metros.

A Figura 3-6 ilustra (sem perda de generalidade) os elementos geométricos presentes na equação (3.20).



Figura 3-6: Descrição das variáveis utilizadas para o cálculo dos níveis de potencial induzido nos duto.

# 3.5 – Interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos

Atualmente, com o crescimento econômico e industrial mundial, existe um aumento na quantidade de energia transportada por meio de linhas de transmissão associada a uma elevação no transporte de energia de fontes de energia alternativas (gás, óleo, minérioetc). Esse transporte é realizado por meio de dutos metálicos que geralmente compartilham o mesmo espaço físico das linhas de transmissão de energia elétrica, Figura 3-7.



Figura 3-7: Gasodutos localizados na faixa de passagem de linhas de transmissão, [98].

Linhas de transmissão operando em regime permanente podem induzir campos eletromagnéticos em objetos metálicos adjacentes, ou seja, localizados em suas faixas de passagem, [99,100]. Sendo assim, é cada vez mais comum a indução de campos eletromagnéticos gerados pelas linhas de transmissão nesses dutos. Essa indução, também chamada de interferência eletromagnética, pode ser avaliada pelos acoplamentos capacitivo e condutivo (campo elétrico) e pelo acoplamento indutivo (campo magnético), entre as linhas de transmissão e os dutos.

Esses acoplamentos podem provocar o aparecimento de tensões e potenciais induzidos nos dutos. Os efeitos indesejados de tais acoplamentos devem ser minimizados, pois podem acarretar riscos para a segurança humana (choques) e danos materiais.

A seguir são apresentados, em ordem cronológica, alguns trabalhos relacionados ao estudo da interferência eletromagnética entre linhas e dutos.

Em 1990, [101] apresenta uma análise da interferência elétrica entre linhas de transmissão e gasodutos.

Já em 1994, uma metodologia para calcular níveis de campos e potenciais elétricos em cercas metálicas e dutos próximos a linhas de transmissão é desenvolvida por [95]. O método é baseado no MSC e avalia os distúrbios causados nos perfis de campo e potencial elétricos na presença de cercas ou tubos metálicos.

Em 1995, [97] propõe um guia com formulações (simples e práticas) para o cálculo da interferência eletromagnética entre linhas e dutos. Os autores avaliam essa interferência por meio dos potenciais induzidos nos dutos e das correntes que circulam em corpos em contato com essas estruturas. As fórmulas propostas nesse trabalho são práticas e tornam os cálculos de potencial e corrente relativamente simples. Em 1997, os efeitos relacionados à presença de dutos nas proximidades de linhas de transmissão são apresentados em [102]. O autor caracteriza tal interferência para a linha operando em regime permanente e transitório e considerando dutos enterrados e aéreos.

Algumas análises de níveis de campos elétricos gerados por linhas de alta tensão no Kwait são realizadas em 1999 por [103].

A avaliação do acoplamento indutivo em dutos enterrados devido a linhas de transmissão operando em condições de falta (curto-circuito) é abordada em 2002 por [104]. Os mesmo autores, em 2005, avaliam tal acoplamento considerando características do solo, [105].

Em 2003, [106] apresenta um estudo a respeito de precauções relacionadas aos efeitos indesejados da interferência eletromagnética entre linhas e dutos enterrados.

Em 2007, alguns trabalhos se destacam no estudo da interferência entre linhas e dutos, por exemplo, em [88] o autor apresenta cálculos de níveis de campos elétricos considerando a presença dos dutos nas faixas de passagem das linhas. O autor utiliza uma configuração de linha real do Kuwait e diferentes configurações de dutos. Além disso, também em 2007, um grupo de pesquisa inglêsapresenta um estudo a respeito de tensões induzidas em dutos devido a linhas operando em regime permanente e transitório, [107]. Nesse trabalho os autores avaliam as tensões induzidas para solos com diferentes resistividades.

Em 2010, o acoplamento elétrico entre linhas de transmissão, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos é avaliado por [74,75]. Em ambos os trabalhos, os autores apresentam cálculos de níveis de campos elétricos gerados por linhas na presença de dutos localizados nas proximidades das mesmas e realizam análises de sensibilidade com relação às configurações das linhas e dos dutos.

Evidentemente, não se tem a pretensão de apresentar, nesta seção, todos os trabalhos desenvolvidos nesta área. Pelo contrário, o objetivo é descrever alguns trabalhos internacionais considerados relevantes dos principais grupos de pesquisa que abordam a questão. Em termos nacionais, deve-se ressaltar os estudos realizados em [76,94]

# 3.6 – Conclusão

Nesse capítulo, são apresentadas as metodologias utilizadas na avaliação da interferência elétrica entre linhas de transmissão, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos.

Primeiramente, na seção 3.2, os efeitos da exposição humana a campos eletromagnéticos são avaliados. Além disso, valores de referência de níveis de campos elétricos e correntes de contato são apresentados.

Em seguida, na seção 3.3, são apresentados os aspectos básicos envolvidos no cálculo do campo elétrico. Esses aspectos levam em consideração a configuração geométrica da linha e a sua tensão de operação.

A seção 3.4 apresenta as principais formulações para cômputo dos níveis de potencial induzido. As formulações das seções 3.3 e 3.4 têm embasamento nas Equações de Maxwell. Vale ressaltar que detalhes a respeito dessa metodologia são abordados no capítulo 4.

Finalmente, na seção 3.5, são apresentados alguns trabalhos que avaliam à interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos.

Após a apresentação dos tópicos abordados neste capítulo, o próximo passo corresponde ao detalhamento da modelagem eletromagnética utilizada nesta dissertação para o cálculo da interferência entre linhas de transmissão e dutos aéreos. Esta etapa é destinada ao Capítulo 4.

# CAPÍTULO 4 - INTERFERÊNCIA ELÉTRICA ENTRE LINHAS DE TRANSMISSÃO E DUTOS

## 4.1 – Introdução

O objetivo desse capítulo é descrever a modelagem eletromagnética utilizada para representar e quantificar o acoplamento elétrico entre linhas de transmissão, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos.

Primeiramente, na seção 4.2, faz-se uma descrição geral dos fenômenos básicos envolvidos no processo de interferência eletromagnética entre linhas de transmissão e dutos. Como o objetivo principal deste trabalho é a interferência elétrica, o processo em questão deve ser particularizado.

A referida particularização encontra-se descrita na seção 4.3. Nesta são apresentados os detalhes da modelagem eletromagnética utilizada para análise da interferência elétrica entre linhas e dutos. Tal modelagem inclui: cálculo de campo elétrico (com e sem a presença de dutos), avaliação dos potenciais elétricos induzidos nos dutos, corrente que circula em seres humanos (em eventual contato com os mesmos) e técnicas de mitigação dos efeitos elétricos indesejados.

Finalmente, na seção 4.4, apresenta-se uma revisão geral do que é abordado neste capítulo.

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

Linhas de transmissão de corrente alternada em operação normal (frequência industrial de 60 Hz) podem funcionar como fontes de distúrbios eletromagnéticos em corpos metálicos colocados em suas proximidades (como, por exemplo, tubulações metálicas).

Nesse contexto, um duto metálico localizado na faixa de passagem de uma linha pode ser vítima de interferência eletromagnética gerada pela mesma. Essa interferência pode ser representada, normalmente, pelos acoplamentos gerados pelo campo elétrico (capacitivo e condutivo), pelo campo magnético (induzido ou indutivo) e por irradiação, [15].Esses acoplamentos se processam simultaneamente e podem provocar danos a pessoas, animais ou equipamentos em contato com essas tubulações.

A integral de linha do campo elétrico (de natureza divergente) em um percurso entre o solo e o condutor, gera uma diferença de potencial entre os mesmos. Assim, na presença de uma tubulação metálica (duto), localizada nessa região, existiráuma diferença de potencial que pode provocar o aparecimento de correntes de natureza capacitiva através do ar e correntes condutivas em percursos que contêm os isolamentos entre os condutores, [15].

Além disso, a corrente da linha de transmissão gera um campo magnético, cujo fluxo abrange a região compreendida entre a linha e o duto próximo, podendo originar uma tensão induzida no mesmo, [15].

Finalmente, a corrente e a tensão da linha geram, respectivamente, campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo. Esses campos por sua vez, são associados ao vetor de Poynting que é resultado de um produto vetorial entre os mesmos, equação (4.1).

# $\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}$ (4.1)

A maior parcela desse vetor tem a direção da linha de transmissão e corresponde à densidade de potência transmitida por unidade de área. Uma parcela menor está associada à potência irradiada pela linha. Esta última atinge os corpos colocados em suas proximidades, podendo entregar-lhes um volume de energia em determinado intervalo de tempo. Em todos estes processos físicos, se os corpos metálicos estiverem enterrados no solo, seu efeito deve ser levado em consideração, pois neste caso faz parte do percurso das respectivas correntes e caminhos de integração dos campos elétricos e magnéticos, [15].

Para operação em regime permanente senoidal, os acoplamentos condutivos e irradiados são, em termos práticos, bastantes reduzidos. Desta forma, o foco deve ser nos acoplamentos capacitivo e indutivo, [15].

O acoplamento indutivo é mais pronunciado em dutos enterrados. Em dutos aéreos, as tensões induzidas, normalmente, atingem dezenas de Volts, [15,16,97].

Por outro lado, o acoplamento capacitivo somente se processa em dutos aéreos. A consequência desse processo é a indução de potenciais elétricos, em dutos isolados do solo, cujas amplitudes dependem, basicamente, das seguintes grandezas: nível de tensão da linha de transmissão e distância entre a linha e o duto, [15,16,97].

Conforme já amplamente discutido ao longo desta Dissertação, o objetivo principal refere-se à avaliação do acoplamento elétrico (capacitivo) entre linhas de transmissão e dutos aéreos, cuja base física é detalhada na próxima seção.

#### 4.3 – Modelagem eletromagnética análise da para interferência elétrica

### 4.3.1 –Introdução

A modelagem adotada para a quantificação da interferência elétrica entre linhas de transmissão operando em regime permanente e dutos metálicos, utiliza como base as Equações de Maxwell e alguns teoremas e métodos adicionais (Método das Imagens, Teorema da Superposição e Método de Simulação de Cargas).

As equações de Maxwell, que traduzem o comportamento eletromagnético de sistemas elétricos, no domínio do tempo e na forma pontual, são descritos pelas equações 4.2 a 4.5. A interpretação física de cada uma destas equações, bem como suas inúmeras aplicações, é amplamente divulgada na literatura, [70,71,72].

De acordo com as características de funcionamento (operação) de determinado sistema elétrico, estas equações podem ser simplificadas ou estudadas de forma desacoplada. Este é o caso no estudo proposto nesta Dissertação.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
(4.2)
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_C + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$
(4.3)

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{D} = \rho_{V} \tag{4.4}$$

$$\vec{\nabla} \bullet \vec{B} = 0 \tag{4.5}$$

Pelo fato da linha de transmissão operar em regime permanente senoidal, com frequência industrial (60 Hz), o comprimento de onda dos sinais eletromagnéticos associados ( $\lambda = C/f = 3x10^8 (m/s)/60Hz = 5x10^3 km$ ) é muito maior que o comprimento

(4.4)

físico da linha (centenas de quilômetros). Por conseguinte, o comportamento eletromagnético da linha de transmissão pode ser quantificado com base na "quase-estática".

Ademais, como interessa, neste trabalho, quantificar somente o acoplamento elétrico, as seguintes aproximações adicionais podem ser processadas:

- i. Os efeitos associados à natureza não-conservativa do campo elétrico podem ser desconsiderados. Isto significa que não é necessário trabalhar com a equação (4.2).
- ii. Os efeitos associados ao campo magnético podem ser negligenciados, o que acarreta a desconsideração das equações (4.3) e (4.5).

Diante do exposto, basta quantificar os efeitos relacionados com a equação (4.4), que traduz a natureza divergente do campo elétrico. Assim sendo, esta equação é a base da modelagem utilizada nesta dissertação.

Vale ressaltar que os campos elétricos, gerados pelas distribuições de carga da linha de transmissão e das respectivas cargas induzidas nos dutos, existentes no ar (entre os condutores da linha e os dutos), variam também de forma harmônica no tempo (regime permanente senoidal) com frequência de 60 Hz. Portanto, são estabelecidas densidades

de correntes de deslocamento  $(\vec{J}_d = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$  entre as fases da linha e o duto metálico.

Logo, correntes de deslocamento ( $I_d = \int_{S} \vec{J_d} \cdot \vec{d_s}$ ) são injetadas pela linha (condutores fase)

nos dutos. Este processo físico é denominado acoplamento elétrico entre a linha e duto. As correntes de deslocamento são, normalmente, designadas (no âmbito da teoria de circuitos) "correntes capacitivas". Daí, este processo é também denominado "acoplamento capacitivo", pois existe a constituição de capacitores no sistema sob estudo (condutores metálicos carregados e separados pelo ar).

Diante do exposto, a modelagem adotada nesta Dissertação segue, de modo geral, os seguintes passos (detalhados nas próximas subseções):

- Cálculo do campo elétrico, equação (4.4);
- Determinação do potencial elétrico (efeito integral do campo elétrico);
- Quantificação da corrente induzida (com o auxílio do efeito capacitivo entre linha-dutosolo);
- 4) Apresentação de técnicas de mitigação.

Antes, porém, além de todos os aspectos físicos descritos nessa seção, é oportuno apresentar os limites de validade (premissas) desta modelagem. São eles:

- (i) A distância entre as fontes (cargas na linha) e os pontos onde o campo e o potencial elétrico são avaliados (dutos) é da ordem de dezenas de metros (pelo menos de 10 m a 20 m). Isto permite aproximar os cabos da linha (fases e para-raios) por condutores filamentares, ou seja, com raios desprezíveis.
- (ii) As distâncias entre todos os condutores do sistema sob estudo (fases, para-raios e dutos) são muito maiores que seus respectivos raios (no mínimo por um fator igual a 10). Em consequência, o efeito de proximidade entre tais condutores pode ser, em termos práticos, desprezados. Assim, neste caso, as cargas podem ser aproximadas por distribuições contínuas/uniformes e lineares (por unidade de comprimento) ao longo de tais condutores. Outra consequência desta aproximação refere-se a linhas cujas fases são compostas por feixes de condutores (ou condutores múltiplos). Neste caso, pode ser utilizado o conceito de raio equivalente, descrito no Capítulo 2 (seção 2.2, subseção 2.2.3), equação (2.1).
- (iii) A catenária dos condutores da linha (fases e para-raios) é levada em consideração por meio de sua flecha (Figura 2-8). Assim, todas as suas alturas correspondem às "alturas médias", equação (2.2). Portanto, todos estes condutores são paralelos entre si e ao solo. Adicionalmente, os mesmos são cilíndricos e de superfície perfeitamente lisa.
- (iv) Os condutores que representam os dutos são, também, cilíndricos, perfeitamente lisos e paralelos aos cabos da linha e ao solo.
- (v) Os comprimentos dos condutores da linha de transmissão (da ordem de centenas de km) são muito maiores que as distâncias entre as fontes e os pontos de observação do campo/potencial elétricos. Consequentemente, em termos práticos, podem ser aproximados por condutores com comprimentos que tendem a infinito.
- (vi) A interface (superfície) de separação ar-solo é considerada plana, com potencial elétrico nulo (referência de potencial).
- (vii) O solo é considerado como um condutor elétrico perfeito. Logo, sua condutividade tende a infinito (resistividade tende a zero). Assim, o campo elétrico não penetra no solo e o método das imagens ideais pode ser utilizado. Por este motivo, somente dutos aéreos situados nas proximidades de linhas de transmissão estão sujeitos à influência do acoplamento elétrico (capacitivo) com a linha.
- (viii) Não existe carga elétrica livre nos meios que preenchem as regiões de interesse (arsolo).

- (ix) Os meios (ar e solo) são 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.
- (x) As tensões aplicadas aos condutores fase da linha de transmissão são 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.
- (xi) As torres e as cadeias de isoladores não distorcem os campos elétricos. Assim sendo, os cálculos de campo e potencial elétricos podem ser realizados em duas dimensões (em um plano normal ao eixo longitudinal da linha). Portanto, o campo elétrico tem somente componentes neste plano, não existindo componente ao longo da linha (no eixo longitudinal).
- (xii) Os cabos para-raios estão efetivamente conectados às torres das linhas e os aterramentos das mesmas são considerados muito bons (baixas resistências de aterramento). Tal situação, aliada à condição quase-estática, garante (em termos práticos) que os potenciais elétricos dos cabos para-raios são nulos.

#### 4.3.2 – Campo elétrico

O cálculo do campo elétrico (em um ponto arbitrário) gerado por uma distribuição uniforme de carga, ao longo de um condutor filamentar de comprimento infinito, representada por  $\rho_L$  (C/m), pode ser realizado, de forma direta, pela aplicação da Lei de Gauss na forma integral<sup>2</sup>, equação (4.6), [70,71,72].

$$\phi = \oint_{S} \vec{D} \bullet \vec{ds} = Q_{ENC}$$
(4.6)

Na equação (4.6), tem-se que:

- $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}$ , onde  $\vec{D}$  é o campo vetorial densidade de fluxo elétrico no vácuo ( $\approx$  ar);
- $Q_{ENC}$ é a carga contida no volume delimitado pela superfície fechada (superfície Gaussiana);
- *ds* é o elemento diferencial (caráter vetorial) de superfície.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> A equação (4.6) é obtida da (4.4) mediante a aplicação do Teorema de Gauss (ou da divergência), que permite relacionar uma integral de volume com uma integral de superfície fechada (que delimita o volume).

A aplicação da equação (4.6) no sistema descrito acima permite obter a equação (4.7), que quantifica o campo vetorial intensidade de campo elétrico. A dedução matemática envolvida é amplamente divulgada na literatura, [70,71,72].

$$\vec{E} = \frac{\rho_1}{2\pi\varepsilon_0 \rho} \hat{a}_{\rho} \tag{4.7}$$

A equação (4.7) é exatamente igual à (3.1). Portanto, todos os seus elementos estão definidos no Capítulo 3 (seção 3.3, sub-seção 3.3.1).

Em seguida, é aplicado o método das imagens para inclusão, na expressão do campo elétrico, enquanto (4.7), da contribuição da carga induzida na interface ar-solo pela carga fonte (condutor filamentar infinito). As bases do método das imagnes estão estabelecidas no Capítulo 3 (seção 3.3, sub-seção 3.3.1). Contudo, alguns aspectos adicionais merecem destaque.

Considere a Figura 4-1 que ilustra uma linha de transmissão trifásica (fases A, B e C), de configuração horizontal e circuito simples, com dois cabos para-raios (E,F) e com um duto (D) em sua faixa de passagem. Apesar de se tratar de uma configuração específica, as formulações apresentadas a seguir são gerais (ou seja, podem ser aplicadas para qualquer configuração).



Figura 4-1: Representação de uma linha de transmissão trifásica, circuito simples, configuração horizontal, dois cabos para-raios e um duto.

O Método das Imagens permite transformar o sistema físico real (composto de 2 meios semi-infinitos: ar e solo) em um sistema equivalente, composto por apenas 1 meio infinito: o ar (meio onde as fontes reais estão imersas). O efeito do solo subjacente é substituído por condutores imagens (A', B', C', D' E', F') posicionados de forma simétrica em relação aos condutores reais (fases e dutos). Assim, as alturas dos condutores imagens são as mesmas dos condutores reais, porém com sinal negativo, enquanto as distâncias horizontais permanecem as mesmas, conforme Figura 4-2.



Figura 4-2: Método das imagens aplicado ao sistema representado na Figura 4-1.

As cargas nas fases A, B e C são, respectivamente,  $\rho_{LA}$ ,  $\rho_{LB}$  e  $\rho_{LC}$ . Estas induzem cargas nos para-raios ( $\rho_{LE}$  e  $\rho_{LF}$ ) e no duto ( $\rho_{LD}$ ). Este conjunto de cargas, por sua vez, induz cargas no solo.

As cargas dos condutores imagens correspondem ao negativo das cargas dos condutores reais (- $\rho_L$ ). Tal fato decorre da necessidade de satisfazer as condições de fronteira do campo elétrico na interface ar-solo do sistema físico real (componente tangencial nula). Ademais, neste caso, o solo é modelado como um condutor elétrico perfeito, ou seja, sua condutividade ( $\sigma$ ) tende ao infinito ( $\sigma \rightarrow \infty$ ). A aproximação do solo por um condutor elétrico perfeito é fisicamente consistente por dois fatores principais: i) baixa frequência de operação da linha (f = 60 Hz), o que permite uma modelagem eletromagnética no âmbito da quase-estática, [30,70]e ii) tempo de relaxação ( $\tau$ ), associado à redistribuição de cargas elétricas no solo,muito inferior ao período do sinal senoidal da tensão da linha (T = 1/f  $\approx$  17 ms).

Na Tabela 4.1 são apresentados diversos valores de  $\tau$  para valores típicos de resistividade ( $\rho = 1/\sigma$ ) e permissividade elétricas ( $\epsilon$ ) de solos do ambiente brasileiro;  $\tau = \epsilon/\sigma$ , onde $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \epsilon_r$  é a permissividade relativa e  $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade do vácuo, aproximadamente igual à do ar. Percebe-se, pelos valores apresentados na Tabela 4.1, que para todos os valores de  $\rho = \epsilon_r$ ,  $\tau$  é muito menor que T. A menor relação entre T e  $\tau$  é de aproximadamente 3.830,00. Por este motivo, o método das imagens neste caso é denominado Método das Imagens Ideais (MII).

Permissividade relativa, ε <sub>r</sub>	Resistividade, ρ (Ω.m)	Tempo de relaxação, τ (ms)	Período, T (ms)
	100	1,33x10 <sup>-5</sup>	
	500	6,64x10 <sup>-5</sup>	
15	1000	1,33x10 <sup>-4</sup>	
	2400	3,19x10 <sup>-4</sup>	
	5000	6,64x10 <sup>-4</sup>	
50	100	4,43x10 <sup>-5</sup>	
	500	2,21x10 <sup>-4</sup>	
	1000	4,43x10 <sup>-4</sup>	17
	2400	1,06x10 <sup>-3</sup>	
	5000	2,21x10 <sup>-4</sup>	
100	100	8,85x10 <sup>-5</sup>	
	500	4,43x10 <sup>-4</sup>	
	1000	8,85x10 <sup>-4</sup>	
	2400	2,12x10 <sup>-3</sup>	-1
	5000	4,43x10 <sup>-3</sup>	

Tabela 4.1 - Tempos de relaxação para valores de permissividade relativa e resistividade de solos típicos.

É oportuno comentar que, com a aplicação do MII, o cálculo do campo elétrico somente pode ser realizado na região definida por z>0 (Figura 4-2). Esta corresponde à região onde, no sistema físico real (Figura 4-1), as fontes estão imersas (ar). Portanto, no sistema físico equivalente, os valores calculados de  $\vec{E}$  para z<0 não possuem significado físico, uma vez que no sistema físico real  $\vec{E}=0$  para z<0, tendo em vista que o solo é modelado como um condutor elétrico perfeito.

Contudo, os resultados ilustrados na Tabela 4.1 mostram que mesmo se for considerada uma condutividade finita para o solo (não ideal neste caso), o campo elétrico, em termos práticos não penetra no solo. Assim, mais uma vez, verifica-se que somente dutos aéreos sofrem influência do acoplamento elétrico (capacitivo) com linhas de transmissão.

A Figura 4-3 ilustra a aplicação do MII para o caso de apenas um condutor (genérico k), com o objetivo de calcular o nível de campo elétrico em um ponto de observação arbitrário P. O sistema equivalente é composto pelo condutor real, pelo condutor imagem e pelo ar (meio infinito). Evidentemente, o campo elétrico é gerado pelas distribuições de cargas lineares nos condutores real e imagem. Esta última traduz a influência do solo do sistema físico real.



Figura 4-3: Representação da aplicação do MII para um condutor.

Com o sistema equivalente da Figura 4-3 é possível calcular o campo elétrico em cada ponto de interesse. Assim, com a utilização do MII, a equação (4.7) pode ser escrita na forma da equação (4.8).

$$\vec{E} = \frac{\rho_{Lk}\hat{a}_{\rho RK}}{2\pi\varepsilon_0\rho_{RK}} - \frac{\rho_{Lk}\hat{a}_{\rho IK}}{2\pi\varepsilon_0\rho_{IK}}$$
(4.8)

A equação (4.8) é exatamente igual à (3.2). Logo, seus termos estão definidos no Capítulo 3 (seção 3.1, sub-seção 3.3.1). Por isso, são apresentadas abaixo somente suas expressões matemáticas:

•  $\rho_{RK} = \sqrt{(Y_P - Y_K)^2 + (H_P - H_K)^2}$ 

• 
$$\rho_{IK} = \sqrt{(Y_P - Y_{K'})^2 + (H_P - H_{K'})^2}$$

• 
$$\hat{a}_{\rho RK} = \frac{(Y_P - Y_K)\hat{a}_Y + (H_P - H_K)\hat{a}_Z}{\rho_{RK}}$$

• 
$$\hat{a}_{\rho IK} = \frac{(Y_P - Y_{K'}) \hat{a}_Y + (H_P - H_K) \hat{a}_Z}{\rho_{KI}}$$

(Y<sub>K</sub>, H<sub>K</sub>); (Y<sub>K'</sub> = Y<sub>K</sub>, H<sub>K'</sub> = -H<sub>K</sub>); (Y<sub>P</sub>, H<sub>P</sub>), são as coordenadas no plano yz dos condutores real e imagem e do ponto de observação, respectivamente.

Como o sistema sob estudo é considerado linear, utiliza-se o teorema da superposição. Assim, o cálculo do campo elétrico total é realizado por superposição de

todas as parcelas de campo geradas por todas as linhas de carga que compõem o sistema sob estudo (condutores fase e para-raios, e duto e suas respectivas imagens).Por conseguinte, a expressão geral de  $\vec{E}$  em um ponto qualquer (para z>0) é aquela representada na equação (4.9).

$$\vec{E} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{K=1}^{N_{Cond}} \rho_{Lk} \left( \frac{\hat{a}_{\rho Rk}}{\rho_{Rk}} - \frac{\hat{a}_{\rho lk}}{\rho_{lk}} \right)$$
(4.9)

Na equação (4.9), tem-se que:

- N<sub>Cond</sub>é o número de condutores, incluindo fases, para-raios e dutos;
- ρ<sub>Lk</sub> é a densidade linear de carga (C/m) do k-ésimo condutor;
- $\hat{a}_{oRk}$ ,  $\hat{a}_{olk}$ ,  $\rho_{Rk}$  e  $\rho_{lk}$  são definidas de acordo com a Figura 4-3 e equação (4.8).

Contudo, ainda falta determinar as distribuições de cargas, previamente desconhecidas, em todos os condutores fases, para-raios e duto. Esta determinação é feitacom o auxílio do MSC descrito a seguir.

A maior parte dos sistemas de transmissão de alta tensão possui geometria muita complexa, o que praticamente inviabiliza soluções analíticas para cálculo do campo elétrico<sup>3</sup>. Por conseguinte, técnicas numéricas têm que ser utilizadas para resolver o problema em questão. Uma das técnicas mais utilizada e eficiente é o Método de Simulação de Cargas (MSC), que envolve a solução de uma quantidade relativamente reduzida de equações lineares, em um tempo computacional curto.

Em termos gerais (como já destacado no Capítulo 3), o MSC apresenta como princípio básico a substituição das distribuições de cargas contínuas reais sobre a superfície dos condutores por um conjunto discreto de distribuições de cargas fictícias, [30,80,81]. As cargas fictícias são determinadas respeitando as condições de contorno do problema (potenciais dos condutores e na interface ar-solo).

Como visto anteriormente, devido à simetria cilíndrica dos sistemas sob estudo, as distribuições de carga dos condutores fase e para-raios, bem como do duto, são substituídas por linhas infinitas de carga, com distribuição linear de carga representa por $p_L$  (C/m).

Em primeiro lugar, é necessário calcular a matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell [P], cujos elementos são genericamente dados pela equação (4.10), [30,97].

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Normalmente, com o auxílio da Equação de Laplace:  $\nabla^2 V = 0$  (laplaciano do potencial elétrico igual a zero), [70].
$$P_{MN} = \begin{pmatrix} LT \rightarrow \left(\frac{1}{2\pi\varepsilon_{0}} \ln\left(\frac{4H_{M}}{d_{M}}\right) \\ DUTO \rightarrow \frac{1}{2\pi\varepsilon_{0}} \ln\left(\frac{2H_{M}}{d_{M}} + \sqrt{\left(\frac{2H_{M}}{d_{M}}\right)^{2} - 1}\right) \\ M \neq N \left\{ LT / DUTO \rightarrow \frac{1}{2\pi\varepsilon_{0}} \ln\left[\frac{(Y_{M} - Y_{N})^{2} + (H_{M} + H_{N})^{2}}{(Y_{M} - Y_{N})^{2} + (H_{M} - H_{N})^{2}}\right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$
(4.10)

Na equação (4.10), M e N correspondem a quaisquer dois condutores que compõem o sistema sob estudo (fase e fase, fase e duto, fase e para-raio, para-raio e para-raio, pararaio e duto e duto). As coordenadas dos condutores M e N, no plano yz, são respectivamente,  $(Y_M, H_M)$  e  $(Y_N, H_N)$ ; d<sub>M</sub> corresponde ao diâmetro do M-ésimo condutor. No caso de feixes de condutores, é necessário calcular o raio médio geométrico, descrito pela equação (2.1), no Capítulo 2 (seção 2.2, sub-seção 2.2.3).

Em segundo lugar, resolve-se o sistema de equações lineares, descrito pela equação (4.11), para o cálculo das distribuições de cargas lineares nos condutores fases, para-raios e duto, [30,81]:

$$[P] = [\rho_L] [V] \therefore [\rho_L] = [P]^{-1}[V]$$

$$(4.11)$$

A equação (4.11) é exatamente igual a (3.3). Logo, todos os seus elementos são definidos no Capítulo 3 (seção 3.3, sub-seção 3.3.2).

Com a solução do sistema dado pela equação (4.11), são determinadas as distribuições lineares de carga nos condutores. Em seguida, com a utilização da equação (4.9),são calculados os níveis de campo elétrico em qualquer ponto de observação de interesse, normalmente a 1 m do solo ou no nível do solo.

Como descrito, no Capítulo 3 (seção 3.3, sub-seção 3.3.3), o módulo de *E* pode ser calculado pelo método da elipse, equações (3.10) a (3.12), ou aproximado, equações (3.14) a (3.16).

#### 4.3.3 – Potencial elétrico nos dutos

De acordo com o apresentado no Capítulo 3 (seção 3.4), o potencial elétrico induzido no duto pode ser calculado das seguintes formas:

(i) Efeito integral do campo elétrico<sup>4</sup>  $\Rightarrow$  Equações (3.17) a (3.19). A aplicação da equação (3.19) para a determinação de uma expressão para o potencial<sup>5</sup> (V), em um ponto genérico (z>0), conduz à equação (4.12), onde todos os elementos que a compõem estão definidos na equação (4.9).

$$V = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \sum_{K=1}^{N_{cond}} \rho_{Lk} \ln\left(\frac{\rho_{lk}}{\rho_{Rk}}\right)$$
(4.12)

(ii) Fórmulas práticas simplificadas propostas em [97] $\Rightarrow$  Equação (3.20). Uma fórmula alternativa, também proposta em [97], é expressa na equação (4.13). É oportuno relembrar que  $V_D$  é o potencial elétrico induzido no duto em relação ao solo (potencial duto-solo).

As equações (3.20) e (4.13) não consideram a presença de cabos para-raios e são validas apenas para linhas de transmissão de circuitos simples. Além disso, em [97] os autores não explicitam a origem de tais equações.

Como mostrado no Capítulo 5, as equações (3.20) e (4.13) geram resultados próximos aos da equação (4.12).

$$V_D = 1.4.K_0.d_m.C_1.V_p|N_1|$$
(4.13)

Na equação (4.13), tem-se que, [97]:

•  $d_m$ corresponde à distância média (em metros) entre os condutores da linha. Para linhas de transmissão trifásicas  $d_m = \sqrt[s]{d_{AB} \cdot d_{BC} \cdot d_{CA}}$ 

- $C_1$ é a capacitância de sequência positiva da linha de transmissão, em F/m. Valores típicos para essa capacitância estão entre  $8x10^{-12}$  e  $15x10^{-12}$  F/m;
- V<sub>p</sub>é a tensão fase terra da linha em V;

•  $N_1$ é um valor numérico que depende da configuração geométrica do sistema, conforme Tabela 4.2,[97].

Configuração Típica	N1 (1/m)	N1 (1/m)	N1(1/m)
	<i>a</i> = 0	$a > 0 \begin{cases}  u  > 0, 1 \\  v  > 0, 1 \end{cases}$	$a > 0 \begin{cases}  u  < 0, 1 \\  v  < 0, 1 \end{cases}$

Tabela 4.2: Tabela para função N1. Adaptada de [97]

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> A contrapartida desta relação estabelece que o campo elétrico corresponde ao negativo do gradiente do potencial elétrico, [30,71,72].

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Com o auxílio do método das imagens ideiais e do teorema da superposição (e da Figura 4.3), considerando potencial nulo (referência) na superfície do solo.

Horizontal	0	$\frac{-1}{a}\left[\frac{1}{1+v^2}-\frac{1}{1+u^2}\right]$	$\frac{-1}{a} \left[ u^2 - v^2 \right]$
Vertical	$\frac{2c}{b^2 - c^2}$	$\frac{1}{a} \left[ \frac{u}{1+u^2} - \frac{v1}{1+v^2} \right]$	$\frac{1}{a}[u-v]$

Na Tabela 4.2, "a" corresponde à distância horizontal entre o duto e o plano vertical que define o centro de gravidade dos condutores da linha, "b" é a altura em relação ao solo, dos cabos fase e "c" é a altura, em relação ao solo, do duto. Além disso, u = (b+c)/a e v = (b-c)/a.

(iii) Operações matriciais  $\Rightarrow$  Similar ao "efeito integral do campo elétrico", mas devido a sua facilidade de implementação computacional é descrito em detalhe a seguir. Permite incluir quaisquer número e tipo de condutores fase, cabos para-raios e dutos, com uma alta precisão. Para sua apresentação, é considerado, sem perda de generalidade, o sistema da Figura 4-1 (três fases, dois para-raios e um duto).

A aplicação dos Métodos de Simulação de Cargas e dos coeficientes de potenciais de Maxwell permite representar o comportamento elétrico deste sistema pela equação (4.14).

$$\begin{bmatrix} V_F \\ V_{DT} \\ V_{PR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [P]_{F-F} & [P]_{F-DT} & [P]_{F-PR} \\ [P]_{DT-F} & [P]_{DT-DT} & [P]_{DT-PR} \\ [P]_{PR-F} & [P]_{PR-DT} & [P]_{PR-PR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \rho_{L_F} \\ \rho_{L_{DT}} \\ \rho_{L_{PR}} \end{bmatrix}$$
(4.14)

Na equação (4.14), tem-se que:

- V<sub>F</sub> e ρ<sub>L<sub>F</sub></sub> ⇒ Vetores de tensões fase-neutro (V) e densidades lineares de carga (C/m) das fases A, B e C, respectivamente, (ambos de dimensões 3x1);
- V<sub>DT</sub> e ρ<sub>L<sub>DT</sub></sub> ⇒ Tensões duto-solo (V) e densidades lineares de carga (C/m), dimensões 1x1;
- V<sub>PR</sub> e ρ<sub>L<sub>PR</sub></sub> ⇒ Vetores de tensões fase-neutro (V) e densidades lineares de carga (C/m) dos cabos para-raios, dimensões 2x1;
- [P] ⇒ Matrizes de coeficientes de potencial de Maxwell das fases (F-F), dutos (DT-DT), para-raios (PR-PR) e entre fases e duto (F-DT), fases e para-raios (F-PR) e entre dutos e para-raios (DT-PR). São obtidas por meio da aplicação da equação (4.10).
   Como os para-raios estão aterrados, V<sub>PR</sub> = 0. Substituindo esta relação na equação (4.14) e eliminando ρ<sub>Lee</sub>, tem-se a equação (4.15).

$$\begin{cases} V_{F} = [P']_{F-F} \rho_{L_{F}} + [P']_{F-DT} \rho_{L_{DT}} \\ V_{DT} = [P']_{DT-F} \rho_{L_{F}} + [P']_{DT-DT} \rho_{L_{DT}} \end{cases}$$
(4.15)

Na equação (4.15) tem-se as seguintes relações matriciais:

• 
$$[P']_{F-F} = [P]_{F-F} - [P]_{F-PR} [P]_{PR-PR}^{-1} [P]_{PR-PR}$$

• 
$$[P']_{F-DT} = [P]_{F-DT} - [P]_{F-PR} [P]_{PR-PR}^{-1} [P]_{PR-DT}$$

• 
$$[P']_{DT-F} = [P]_{DT-F} - [P]_{DT-PR} [P]_{PR-PR}^{-1} [P]_{PR-PR}$$

• 
$$[P']_{DT-DT} = [P]_{DT-DT} - [P]_{DT-PR} [P]_{PR-PR}^{-1} [P]_{PR-DT}$$

Para resolver as relações matriciais (4.14) e (4.15), é necessário impor correspondentes condições para os dutos. As condições mais relevantes, em casos práticos, são as seguintes:

a) Dutos isolados (do solo)  $\Rightarrow$  As equações (3.20) e (4.13) são válidas nesta situação. Neste caso, tem-se que:  $\rho_{L_{DT}} = 0$ . Assim, o potencial duto-solo ( $V_D$ ) é dada pela equação (4.16).

$$V_{DT} = V_D = [P']_{DT-F} \rho_{L_F} = [P']_{DT-F} [P_{F-F}']^{-1} V_F$$
(4.16)

b) Dutos aterrados  $\Rightarrow$  Neste caso,  $V_{DT} = 0$ . Logo,  $\rho_{L_{DT}}$  é dada pela equação (4.17).

$$\rho_{L_{DT}} = \left[ \left[ P' \right]_{DT-DT} \left[ P' \right]_{F-F} \left[ P'_{DT-F} \right]^{-1} - \left[ P' \right]_{DT-F} \right]^{-1} V_F$$
(4.17)

As equações (4.12), (3.20), (4.13), (4.16) e (4.17) permitem determinar níveis de corrente em pessoas que, eventualmente, entrem em contato com dutos. Esta importante questão de segurança pessoal é discutida na próxima sub-seção.

#### 4.3.4 – Correntes em corpos em contato com os dutos

O principal efeito do acoplamento elétrico (capacitivo) em linhas de transmissão e dutos refere-se a aspectos de segurança pessoal, pois uma pessoa em contato direto com o duto pode ser submetida a níveis de correntes superiores aos máximos suportáveis pelo corpo humano, [97,108]. Podem ocorrer, também, danos nos dutos, como por exemplo, isolamento, parte metálica e equipamentos conectados (sistema de proteção catódica). Tais danos são mais intensos em outros acoplamentos (indutivo e condutivo), condição de operação da linha (curto-circuito) e em dutos enterrados, [97].

O efeito da corrente elétrica no corpo humano é avaliado por sua intensidade e duração. Estas definem os limites toleráveis pelos seres humanos, [97,108]. Tais limites são divididos em três categorias de influência (em relação ao fenômeno solicitante):

- Longa duração (linha de transmissão operando em regime permanente);
- Curta duração (linha de transmissão submetida a curto-circuito);

• Duração muito curta (linha de transmissão submetida a descargas atmosféricas, por exemplo).

O acoplamento capacitivo está inserido na categoria de "longa duração". Neste caso, as normas indicam que medidas de segurança são requeridas quando as correntes atingem valores entre 5 e 15 mA<sup>6</sup>, [97,108].

A corrente em uma pessoa em contato com o duto, em decorrência do acoplamento capacitivo, pode ser obtida pela consideração do circuito equivalente de Thévenin ilustrado na Figura 4-4, [97]. A influência da linha no duto é representada por uma fonte de tensão, que possui as seguintes características:

• Potencial elétrico induzido duto-solo ( $V_D$ ), que pode ser calculado por uma das seguintes equações: (4.12), (3.20), (4.13) e (4.16).

• Impedância interna ( $Z_{Fonte}$ ) associada á capacitância total duto-solo. Essa impedância corresponde a impedância de Thévenin.

A impedância a ser inserida em série com esta fonte corresponde à impedância da pessoa em contato com o duto ( $Z_c$ ). Segundo [108], para fenômenos quase-estáticos (f=60 Hz), esta impedância pode ser reduzida a uma resistência de 1000  $\Omega$  ( $R_c$ ).



Figura 4-4: Circuito equivalente para cômputo das correntes em corpos em eventual contato com dutos.

Diante do exposto, tem-se que, [97]:

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> O nível de percepção do ser humano é em torno de 0,5 a 1 mA.

•  $Z_{Fonte} = \left(\frac{1}{j\omega C_D}\right)$ , onde  $\omega = 2\pi f$  (frequência angular) e  $C_D$  é a capacitância total do

duto (em relação ao solo).

- $C_D = L_D / P_{DD}$ , onde  $L_D$  é o comprimento total do duto (m) e  $P_{DD}$  (m/F) corresponde ao coeficiente de potencial do duto, obtido pela equação (4.10) quando M = N = D.
- $Z_c = 1000 \Omega e V_c = Z_c I_c$ , onde  $I_c$  é a corrente na pessoa e  $V_c$  é o potencial resultante.

Na maior parte das situações práticas, tem-se que  $Z_C >> Z_{Fonte}$ . Neste caso  $I_C$  é fornecida pela equação (4.18).

$$I_C = j \,\omega C_D V_D \tag{4.18}$$

Se  $5 < I_C > 15mA$ , técnicas de mitigação são necessárias para garantir a segurança pessoal.

#### 4.3.5 – Técnicas de mitigação

Como verificado na sub-seção anterior, o principal efeito indesejado do acoplamento capacitivo está associado a níveis de corrente em uma pessoa, em contato eventual com o duto, superiores aos limites máximos toleráveis pelo ser humano (5 a 15 mA). As técnicas de mitigação do efeito em questão podem ser aplicadas às linhas e/ou dutos. São as seguintes, [97]:

 (i)Nas linhas de transmissão ⇒ Em termos práticos, podem ser utilizadas, principalmente, em linhas em fase de projeto. No caso de acoplamento capacitivo correspondem a:

- Transposição dos condutores fase ⇒ Consiste na mudança em intervalos regulares, da sequência dos condutores fase sobre as torres das linhas. Essa técnica possibilita a redução de V<sub>D</sub>. Sua análise está fora do escopo dessa Dissertação.
- Sequência diferente de fases em linhas de transmissão de circuito duplos ⇒ Consiste na escolha apropriada dos arranjos das fases em linhas que suportam circuitos duplos (ou mais), como por exemplo, às representadas nas Figuras 2-6 (ABC e A'B'C') e 2-7 (ABC e C'B'A'). No Capítulo 5 é mostrada a grande sensibilidade de V<sub>p</sub> em relação a tais arranjos.
- (ii) Nos dutos ⇒ Problemas de influência capacitiva são, normalmente, solucionados por meio de aterramento do duto. De um modo geral, somente um ponto de aterramento e

uma resistência de aterramento de algumas dezenas de Ohms pode resolver os problemas. É importante mencionar que não existe uma recomendação especial para a localização dos eletrodos de aterramento ao longo da extensão do duto. Contudo, deve-se evitar que fiquem próximos das torres da linha, com o objetivo de minorar a influência de elevações de potencial nos aterramentos das torres, oriundas, por exemplo, de curto circuito na linha. No caso de dutos paralelos as linhas (objeto de interesse dessa Dissertação), em termos práticos, o aterramento do duto é realizado na metade da distância entre duas torres (metade de um vão). É importante salientar que o duto nunca deve ser conectado ao aterramento de uma torre da linha.

Mostra-se a seguir que, quanto menor a resistência de aterramento do duto, maior é a redução da corrente no corpo do ser humano em eventual contato com o duto. Para tal,

considere que:  $I_C = \frac{V_D}{Z_{Fonte} + R_C} \approx \frac{V_D}{Z_{Fonte}} > I_{ADM}$  (Figura 4-4), onde  $I_{ADM}$  é a corrente

suportável (admissível) pelo corpo humano.

Neste caso, é necessário aterrar o duto, com uma resistência de aterramento  $R_A$  em paralelo com o ser humano, de tal forma que  $I'_C < I_{ADM}$ , onde  $I'_C$  é a nova corrente na pessoa em contato com o duto. A Figura 4-5 ilustra esta situação.



Figura 4-5: Técnica de mitigação: aterramento do duto para segurança pessoal – circuito equivalente

Aplicando relações de circuito no sistema representado na Figura 4-5 e considerando que  $Z_{Fonte} >> R_c$ , tem-se a equação (4.19).

$$I'_{C} = \frac{I_{C}R_{A}}{R_{A} + R_{C}}$$

$$\tag{4.19}$$

Considerando  $I'_{C} < I_{ADM}$ , substituindo a equação (4.19) nesta relação e isolando  $R_{A}$ , chega-se à equação (4.20).

$$R_A < \frac{R_C}{\alpha - 1} \tag{4.20}$$

Na equação (4.20),  $\alpha = \frac{I_C}{I_{ADM}}$ . Esta equação traduz o comportamento da Figura 4-5,

pois à medida que  $R_A$  diminui,  $I_A$  aumenta e  $I'_C$  diminui. Portanto, maior é a segurança pessoal.

#### 4.4 – Conclusão

Esse capítulo descreve detalhadamente a modelagem eletromagnética utilizada para representar o acoplamento elétrico entre linhas de transmissão, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos. Essa modelagem é baseada nas equações de Maxwell e utiliza métodos e teoremas adicionais que são descritos e detalhados no decorrer do capítulo (Método das Imagens, Método de Simulação de Carga, Lei de Gauss e Teorema da Superposição).

Para a determinação das expressões para os cálculos de interesse, faz-se necessário uma descrição das principais grandezas envolvidas no fenômeno de interferência elétrica entre as linhas de transmissão e os dutos (denominado acoplamento capacitivo): campo elétrico, potencial elétrico induzido no duto  $(V_D)$  e corrente elétrica em corpos em contato com o duto  $(I_C)$ .É oportuno destacar que: (i) o acoplamento capacitivo depende, basicamente, da tensão da linha de transmissão e da separação entre linha e duto; (ii) o potencial induzido no duto cresce, de forma proporcional, com a tensão da linha e reduz com o distanciamento do duto. Adicionalmente, não depende do comprimento do duto; (iii) a corrente  $I_C$  aumenta com o aumento do comprimento do duto, sendo que para linha e dutos paralelos, este aumento é proporcional.

Em seguida, técnicas de mitigação (para segurança pessoal) são apresentadas. Dentre elas, destaca-se o aterramento dos dutos, com as seguintes características: (i) apenas um ponto de aterramento é suficiente (no meio do vão); (ii) quanto menor a resistência de aterramento, mais efetiva é a técnica. Neste caso, cuidados especiais devem ser dedicados ao aterramento em locais cujos solos apresentam altos valores de resistividade, pois as resistências de aterramento podem ser elevadas nesses casos, [109,110,111]. No capítulo seguinte, os resultados numéricos obtidos, utilizando-se a metodologia descrita nesse capítulo, são apresentados e diversas análises de sensibilidade são discutidas com intuito de enriquecer o entendimento da interação elétrica entre linhas de transmissão e dutos.

### **CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E ANÁLISES**

#### 5.1 – Introdução

Após as definições dos sistemas sob estudo e das metodologias adotadas para os cálculos do campo elétrico, do potencial elétrico, das correntes em corpos em contato com dutos a das técnicas de mitigação, foi elaborada uma rotina computacional para possibilitar os cálculos desejados. Tal rotina gera uma série de análises de sensibilidade de interesse prático. Os resultados gráficos decorrentes de tais análises de sensibilidade são apresentados nas subseções seguintes.

# 5.2 – Resultados associados à avaliação do campo elétrico

A presente seção apresenta os resultados associados à avaliação de níveis de campos elétricos gerados pelas distribuições de cargas nos condutores de linhas de transmissão operando em regime permanente.

Primeiramente, antes de apresentar os resultados associados às diversas análises de sensibilidade propostas o programa computacional desenvolvido nesta dissertação é validado por meio de comparações com resultados de medições e com outros resultados encontrados na literatura (sub-seção 5.2.1).

Em seguida, na sub-seção 5.2.2, o perfil de campo elétrico é avaliado no nível do solo e a 1 m do solo para uma linha de circuito duplo (alta e baixa reatâncias). Nessa seção é avaliada também, a influência da configuração geométrica da linha nos perfis de campo elétrico gerados. Para tal, são utilizadas as configurações descritas no Capítulo 2 (Figuras 2-2 a 2-7).

Posteriormente, na sub-seção 5.2.3, é realizada a quantificação da influência dos cabos para-raios nos níveis de campos elétricos gerados.

Em seguida, na sub-seção 5.2.4, verifica-se o comportamento do perfil de campo elétrico quando existe um duto localizado na faixa de passagem da linha de transmissão. Além disso, são realizadas diversas análises de sensibilidade com relação às configurações geométricas das linhas e dos dutos (raio e posicionamento). Finalmente, na subseção 5.2.5, é realizada uma comparação entre as metodologias para obtenção dos módulos de campo elétrico (método das elipses e método aproximado).

#### 5.2.1 – Validação dos resultados

A etapa de validação de resultados é de fundamental importância em qualquer estudo. Nessa dissertação, como já comentado, um programa computacional foi desenvolvido para calcular os níveis de campos elétricos de acordo com a metodologia proposta (Capítulo 4). Tal programa é validado, nessa sub-seção, por meio de comparações com resultados de medições e com resultados oriundos de simulações computacionais desenvolvidas por outros autores.

#### Comparação com resultados de medições

Nessa sub-seção, o modelo eletromagnético desenvolvido é validado por meio de comparações com resultados de medições de três trabalhos encontrados na literatura: (i) referência [90], (ii) referência [112] e (iii) referência [73].

#### (i) Referência [90]

Em 2000, Deschamps e outros, realizaram medições do perfil transversal de campo elétrico, a 1 m do solo, associado a uma linha de transmissão de circuito duplo de 400 kV, [90]. A configuração geométrica da linha utilizada pelos autores é ilustrada na Figura 5-1.



Figura 5-1: Linha de transmissão de circuitoduplo de 400 kV, adaptado de[90].

A Tabela 5.1, apresenta detalhes a respeito da configuração geométrica do sistema apresentado em [90], tais como distâncias horizontais e verticais dos condutores da linha.

As fases da linha são compostas por feixes de condutores, com dois subcondutores por fase de 31,8 mm de diâmetro cada. A distância entre os subcondutores é de 40 cm e alinha está situada em um terreno inclinado (não plano).

FASES	H (m)	Y (m)
A	45,00	Y <sub>A</sub> = - 8,00
В	37,50	Y <sub>B</sub> = - 8,00
С	30,00	Y <sub>C</sub> = - 8,00
A'	45,50	Y <sub>A'</sub> = + 8,00
B'	37,50	Y <sub>B'</sub> = + 8,00
C'	30,00	Y <sub>C'</sub> = + 8,00
CABOS PARA-RAIOS	H (m)	Y (m)
G1 ≡ G2	H = 52,50	Y = ± 6,00

Tabela 5.1: Altura sem relação ao solo (eixo z) e distâncias horizontais (eixo x) das fases em relação ao centro da linha da linha de circuito duplo utilizada nas medições.

A linha de transmissão de circuito duplo utilizada por [88], Figura 5-8 e Tabela 5.1, foi simulada neste trabalho e o perfil de campo elétrico obtido é apresentado na Figura 5-2.



Figura 5-2: Perfil de campo elétrico no nível do solo para o sistema apresentado por [90].

De acordo com as medições realizadas por [90], o valor máximo de campo elétrico obtido ao longo de toda faixa de passagem é de, aproximadamente, 2,6 kV/m. Observa-se, por meio da Figura 5-2, que o valor de campo elétrico máximo obtido utilizando-se o programa desenvolvido nessa dissertação é praticamente igual ao valor máximo encontrado nas medições de [90], apresentando uma diferença percentual máxima inferior a 0,5%.

A diferença percentual máxima (erro) é calculada segundo a expressão:

 $Erro = \left| \frac{Valor referência}{Valor referência} \right|$ , na qual, o valor de referência corresponde ao valor obtido pela referência comparada e o valor calculado, corresponde ao valor obtido nessa dissertação.

Ressalta-se que todas as diferenças percentuais obtidas nesse trabalho são calculadas utilizando-se essa expressão.

#### (ii) Referência [112]

Em 2003 Domingues e outros, desenvolveram simulações computacionais para cálculo de níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão em diversos níveis de tensões. Além disso, os autores realizaram medições em diversos trechos na faixa de passagem de tais linhas.

Como o objetivo aqui é a validação dos resultados por meio de comparação com medições, foram escolhidas duas configurações de linhas apresentadas por [112], uma de circuito simples e a outra de circuito duplo. Portanto, essa etapa de validação é realizada em duas etapas:

Primeiramente, utiliza-se para validação, a linha de transmissão (Itumbiara - São Simão) de circuito simples apresentada por [112]. Trata-se de uma linha de 500 kV, circuito simples, configuração delta equilátero, composta por três condutores por fase.Como os dados relacionados às configurações geométricas da linha em questão não são disponibilizados no artigo [112], para realização das simulações propostas utiliza-se uma configuração de linha semelhante à do sistema 4 (detalhada no Capítulo 2, seção 2.2, Figura 2-5 e Tabela 2.4).

Nas Figuras 5-3 e 5.4 são apresentados, respectivamente, os resultados obtidos nessa dissertação e os medidos e calculados por [112].





Figura 5-3: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação para uma linha de transmissão de circuito simples (sistema 4), descrito no capítulo 2.



Na Figura 5-4, os pontos correspondem aos valores medidos e a curva de linha contínua aos de simulação.

Analisando-se as Figuras 5-3 e 5-4, percebe-se que o perfil das curvas é bastante semelhante. Além disso, observa-se também, que e os valores de campos elétricos máximos e mínimos obtidos nessa Dissertação apresentam considerável semelhança com os obtidos pelos autores.

Em seguida, utiliza-se para validação, a linha de transmissão (Grajaú – Angra dos Reis) apresentada por [112]. Trata-se de uma linha de 500 kV, circuito duplo, configuração vertical, composta por quatro condutores por fase. Como os dados relacionados às configurações geométricas da linha em questão não são disponibilizados no artigo [112], para realização das simulações propostas utiliza-se uma configuração de linha de 500 kV semelhante à do sistema 6 (detalhada no Capítulo 2, seção 2.2, Figura 2-7 e Tabela 4.6).

Nas Figuras 5-5 e 5-6 são apresentados, respectivamente, os resultados obtidos nessa dissertação e os medidos e calculados por [112].





Figura 5-5: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação para uma linha de transmissão de circuito duplo (sistema 6), descrito no capítulo 2.

Figura 5-6: Perfil de campo elétrico apresentados por [112], para uma linha de transmissão de circuito duplo semelhante a do sistema 6, descrito no Capítulo 2.

De maneira bastante semelhante à análise para o circuito simples, percebe-se por meio das Figuras 5-5 e 5-6, que o perfil das curvas é bastante semelhante. Além disso, assim como no caso anterior, observa-se que os valores de campos elétricos máximos e mínimos obtidos nessa Dissertação apresentam considerável semelhança com os obtidos pelos autores.

#### (iii) Referência [73]

Em 2005, Guimarães realizou medições e simulações computacionais de níveis de campos elétricos gerados pelas distribuições de carga nos condutores de uma linha de transmissão de 500 kV, circuito simples, configuração horizontal, conforme Figura 5-7, [73].



Figura 5-7: Ilustração da configuração geométrica da linha de transmissão utilizada por [73].

A linha de transmissão possui três condutores por fase de 28,74 mm de diâmetros e espaçados de 0,457 m. As distâncias entre o eixo de simetria e as fases A e C são de 12 m e as alturas das fases em relação ao solo (YA, YB e YC) variam de 10 a 25 m em função do relevo irregular (não plano).

Para realização das medições, o autor utilizou 2.840 pontos ao longo da faixa de passagem da linha de transmissão. Além de medir o campo elétrico o autor armazenou dados de nível de tensão, distância horizontal dos pontos de medição e alturas, em relação ao solo, das fases e dos pontos de medição. Tais dados foram armazenados e processados para obtenção dos níveis de campos elétricos que, posteriormente, foram comparados com os valores de campo elétrico calculados pelo autor.

Utilizando-se as configurações da linha descrita acima, simulações foram realizadas no programa desenvolvido nesta dissertação a fim de comparar os resultados com aqueles obtidos pelo autor.

As Figuras 5-8 e 5-9 ilustram, respectivamente, os resultados obtidos nesta dissertação e os medidos e calculados em [73].







Figura 5-9: Perfil de campo elétrico obtido por medições e simulações apresentadas por[73].

Ao comparar as Figuras 5-8 e 5-9, alguns pontos merecem destaque especial. Percebe-se que os valores máximos da Figura 5-8 são próximos aos da 5-9 (tanto medidos quanto calculados). Os perfis transversais seguem as mesmas tendências em ambas as figuras. Contudo, o valor mínimo (abaixo da fase central B), obtido nessa dissertação, destoa do valor calculado na Figura 5-9 (1,4 e 2 kV/m, respectivamente). Todavia, quando são avaliados os valores mínimos medidos e calculados, o obtido nessa dissertação está mais próximo calculado (1,4 e 0,3 kV/m), quando comparado com medido e calculado por [73](2,0 e 0,3 kV/m). Como a metodologia adotada nessa dissertação pressupõe interface ar-solo perfeitamente plana, estes resultados são considerados satisfatórios.

#### Comparação com resultados computacionais divulgados na literatura

Nessa sub-seção, o modelo eletromagnético desenvolvido é validado por meio de comparações com resultados de simulações de dois trabalhos encontrados na literatura: (i) referência [30] e (ii) referência [88].

#### (i) Referência [30]

Em 1987, em [30] foram desenvolvidas simulações computacionais para cálculo de níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão de diversas configurações de linha (delta equilátero, *flat* ou horizontal e vertical). Como o objetivo aqui é a validação dos resultados por meio de comparação com os resultados de [30], utilizou-se para o cálculo dos níveis de campos elétricos as mesmas configurações de linha utilizadas em [30].

As linhas de transmissão são de 525 kV, circuitos simples com três condutores por fase, de raio 30 cm e espaçados por 0,45 cm. Os detalhes a respeito da disposição dos condutores são apresentados pelo autor na Figura 5-11.

As Figuras 5-10 e 5-11 apresentam os perfis de campos elétricos obtidos nessa dissertação e em [30], respectivamente.

10

VERTICAL



m 10 m 10.6 m 0.6 m. EQUILATERAL VERTICAL FLAT 2 DELTA DELTA 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

/ m

= 525 kV

(EQUIV. D = 30 cm)

10 m

3 X 3.3 cm

45 cm

Figura 5-10: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação para linhas de transmissão descritas em [30]

Figura 5-11: Perfil de campo elétrico obtido por simulações computacionais apresentados por[30].

Analisando-se as Figuras 5-10 e 5-11, percebe-se que o perfil das curvas é bastante semelhante. Além disso, observa-se também que os valores de campos elétricos máximos, obtidos nessa Dissertação, apresentam considerável semelhança com os obtidos por [30]. Para configuração *Flat* (horizontal), por exemplo, o nível máximo de campo elétrico obtido é

8,92 kV/m, enquanto que o máximo obtido em [30] é de 8,8 kV/m. As diferenças entre os resultados de [30] e os desta dissertação são da ordem de 2%.

#### (ii) Referência [88]

Em 2007, Ismail apresentou o resultado de uma pesquisa na qual é avaliada a influência de dutos metálicos aéreos no perfil transversal de campos elétricos gerados por distribuições de cargas de uma linha de transmissão de circuito duplo, típica do sistema de transmissão do Kwait, ilustrada pela Figura 5-12, [88].

A tensão da linha é de 275 kV, as fases são compostas por feixes de condutores, com quatro subcondutores por fase de 11,28 mm de diâmetro. A distância entre os subcondutores é de 40 cm, [88].



Figura 5-12: Ilustração do sistema utilizado por [88].

Na Tabela 5.2, são mostrados os valores das alturas das fases (A, B, C e A', B', C') e do duto (D) em relação ao solo, bem como a sua distância horizontal em relação ao centro da linha, [88].

FASES	H (m)	Y (m)
А	H <sub>A</sub> = 26,00	Y <sub>A</sub> = - 17,60
В	H <sub>B</sub> = 17,00	Y <sub>B</sub> = - 17,60
С	$H_{\rm C} = 8,00$	Y <sub>C</sub> = - 17,60
Α'	$H_{A'} = 26,0$	Y <sub>A'</sub> = + 17,60
В'	$H_{B'} = 17,00$	Y <sub>B</sub> ' = + 17,60
C'	$H_{c}' = 8,00$	Y <sub>C</sub> ' = + 17,60

Tabela 5.2: Altura sem relação ao solo (eixo z) e distâncias horizontais (eixo y) das fases e do duto em relação ao centro da linha da linha de circuito duplo utilizada em[88].

DUTO	H (m)	Y (m)
D	$H_{D} = 0,5$	Y <sub>D</sub> = 15,0

A Figura 5-13 apresenta os resultados de campo elétrico obtidos por [88]. São exibidos os níveis de campos elétricos para o sistema descrito acima, para as configurações de alta e baixa reatâncias.

Como pretende-se validar o programa desenvolvido nessa dissertação, a Figura 5-14, apresenta o resultado obtido por meio do mesmo para o sistema utilizado em [88].





Figura 5-13: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação para linhas de transmissão descritas em [88] sem a presença de dutos na faixa de passagem.

Figura 5-14: Perfil de campo elétrico obtido por simulações computacionais apresentados por[88], com a presença de dutos na faixa de passagem.

Os resultados apresentados nas Figuras 5-13 e 5-14, ilustram uma diferença máxima no perfil transversal de campo elétrico obtido nessa Dissertação, em relação ao descrito em[88], de 5 %. Considerando que nos cálculos de [88], a presença de dois cabos pararaios (condutores de aço galvanizado – 19/2,36 mm) é considerada, somado ao fato de que segundo [30] tal presença gera uma diferença de 2 a 3 % em relação à desconsideração dos cabos para-raios, esta diferença diminui para3 a 2%.

Outra comparação foi realizada com resultados apresentados por [88]. Nesse o autor avalia a influência de dois dutos nos perfis de campos elétricos gerados pela mesma linha de transmissão. Nessa situação os raios dos dutos são iguais a 0,5 m e estão localizados a uma altura de 0,5 m do solo, sendo que cada um está localizado a 15 m do eixo da linha.

As Figuras 5-15 e 5-16 apresentamos resultados de níveis de campos elétricos obtidos nessa Dissertação e os encontrados por [88].





Figura 5-15: Perfil de campo elétrico obtido pelo programa desenvolvido nessa Dissertação para linhas de transmissão considerando a presença de dutos em suas faixas de passagem descritas em [88].

Figura 5-16: Perfil de campo elétrico obtido por simulações computacionais apresentados por[88].

Percebe-se, por meio das Figuras 5-15 e 5-16, que além dos perfis de campo elétrico serem bastante semelhantes, os valores máximos e mínimos são muito próximos, (1,8 e 1,9 kV/m) e (10,2 e 10,3 kV/m), respectivamente.

## 5.2.2 – Análise do perfil transversal de campo elétrico no nível do solo e a 1m do solo

Sabe-se que uma das etapas do projeto de implantação de linhas de transmissão é a determinação da faixa de passagem (ou faixa de servidão), fundamental para garantir a segurança de pessoas e animais localizados nas proximidades das linhas de transmissão.

Um dos aspectos avaliados para estabelecer as faixas de passagem são os níveis de campos elétricos e magnéticos na vizinhança das linhas. Esses níveis estão associados a fatores relacionados à segurança de pessoas localizadas próximas às linhas de transmissão e devem satisfazer níveis máximos estabelecidos por normas, [2,4,5,7].

Sendo assim, para a avaliação dos níveis de campos elétricos gerados por linhas de transmissão, os perfis transversais das intensidades de campo elétrico no nível do solo e a um metro do solo são determinados. Para tal, utiliza-se uma linha de transmissão de 138 kV, circuito duplo, configuração vertical, descrita com detalhes na seção 2.2 do Capítulo 2. Essa linha é escolhida pelo fato de permitir, simultaneamente, uma análise da influência da configuração geométrica dos condutores da linha nos perfis de campo elétrico, pois a linha

pode ser avaliada em duas configurações, alta reatância (Figura 2-6) e baixa reatância (Figura 2-7).

Sendo assim, a Figura 5-17, apresenta os perfis de campo elétrico no nível do solo e a 1 m do solo, gerados pela linha de transmissão de 138 kV, circuito duplo (descrita acima), nas configurações de alta e baixa reatâncias, denominadas AR e BR, respectivamente..



Figura 5-17: Perfil transversal das intensidades de campo elétrico no nível do solo e a 1m do solo, sem a presença do duto, para os sistemas 5 e 6 (descritos no Capítulo 2).

Com base na Figura 5-17, as seguintes observações podem ser realizadas:

Os níveis de campo elétrico não ultrapassam os valores estabelecidos pelas normas
 [2,4,5,7] em toda faixa de passagem, alcançando valores máximos de aproximadamente 0,7
 e 1,9 kV/m para as configurações de baixa e alta reatâncias, respectivamente. Para ambas as configurações, os níveis de campo elétrico a partir de 20 m em relação ao centro da linha, apresentam valores inferiores a 10% dos níveis máximos encontrados.

 Os valores de campos elétricos para a linha na configuração em alta reatância são bastante superiores aos de baixa reatância. Assim, uma alternativa para minimizar os níveis de campos elétricos é a escolha adequada da configuração geométrica dos condutores da linha.

• As curvas de níveis de campo no nível do solo e a 1 m do solo, estão sobrepostas. Isso permite concluir que os valores de campo elétrico encontrados no nível do solo e a 1 m do solo são praticamente os mesmos<sup>7</sup>. Diante do exposto, os próximos perfis de campo

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Assim, o campo elétrico é uniforme entre os planos z=0 (interface ar-solo) e z=1 m. Desta forma, comporta-se de forma similar ao campo elétrico de um capacitor de placas paralelas, em que a distância entre as placas é muito menor que as dimensões das mesmas. Tal fato permite estabelecer

elétrico serão avaliados apenas no nível do solo, uma vez que os resultados a um metro do solo são, em termos práticos, os mesmos.

Prosseguindo a análise dos níveis de campos elétricos, a Figura 5-18 apresenta perfis gerados pelas distribuições de carga nos condutores de seis sistemas diferentes. Tratam-se de sistemas reais de transmissão nacionais, cujas silhuetas das configurações das linhas são detalhadas no Capítulo 2 (seção 2.2), sistemas 1 a 6 (Figuras 2-2 a 2-7).





Analisando-se a Figura 5-18, as seguintes conclusões podem ser observadas:

Para os sistemas 1, 2, 5 e 6, os valores de campos elétricos máximos, ao longo de toda extensão da faixa de passagem, não ultrapassam os níveis exigidos pelas normas [4] e [5], que são de 4,2 e 5 kV/m, respectivamente.

• Com relação aos sistemas 3 e 4, observa-se que os níveis de campos elétricos máximos ultrapassam os níveis máximos estabelecidos por [4] e [5], chegando a valores máximos de aproximadamente 5,9 e 6,1 kV/m, respectivamente. Esses resultados estão diretamente relacionados aos níveis de tensão de alimentação das linhas de transmissão, que para os sistemas 3 e 4 é de 500 kV, superiores aos demais sistemas. Vale ressaltar que as normas que estabelecem níveis máximos de exposição a campos elétricos, não levam em consideração os níveis de tensões de alimentação das linhas de transmissão.

uma relação direta e simples entre campo e potencial elétricos. Esta relação é explorada na próxima seção (5.3).

Os perfis de campos elétricos são bastante influenciados pelas configurações geométricas das linhas. Esse fato pode ser observado por meiodo sistema 1, cuja configuração geométrica está descrita no Capítulo 2, seção 2.2.3 (Figura 2-2 e Tabela 2.1). Tal sistema é o único cujas fases não apresentam simetria. Logo, o perfil de campo elétrico, para esse sistema é assimétrico. A influência da configuração geométrica também pode ser observada pelos resultados associados aos sistemas 3 e 4, por exemplo. A despeito do mesmo nível de tensão (500 kV), os perfis de campo elétrico são distintos. Comentário similar vale para os sistemas 1, 5 e 6, todos de 138 kV.

 Sistemas de circuitos simples e de configuração simétrica (2, 3 e 4) apresentam, na maior parte dos casos, perfil transversal de campo elétrico na forma de "M". Neste caso, entre as fases da linha existe um ponto de mínimo do valor de campo, que corresponde exatamente ao ponto abaixo da fase central. Neste ponto as distâncias das fases A, B e C são as que aproximam mais da condição de "equidistante". Em pontos imediatamente abaixo das fases extremas, o campo é máximo, pois quem predomina, na contribuição para o campo, é esta fase mais próxima. Essa é a condição mais distante de "equidistante". Outros sistemas (circuito simples assimétrico e circuito duplo) geram formatos distintos de perfil de campo. Contudo, o raciocínio para o entendimento dos pontos mínimo e máximo de campo é similar ao apresentado.

### 5.2.3 – Análise do perfil transversal de campo elétrico a 1m do solo considerando a influência dos cabos para-raios

Verifica-se na literatura [30], que os perfis de campos elétricos são pouco influenciados pela presença dos cabos para-raios nas configurações de linhas de transmissão (2 a 3%). Assim, faz-se necessário uma avaliação e quantificação dessa influência. Para tal avaliação, utiliza-se uma linha de transmissão de 345 kV, circuito simples, configuração horizontal, descrita no Capítulo 2, sub-seção 2.2.3 (sistema 2 – Figura 2-3).

Os perfis de campo elétrico considerando e não considerando a presença dos cabos para-raios são plotados na Figura 5-19. Além disso, a Figura 5-20 apresenta a diferença percentual entre os perfis de campo elétrico com e sem a presença dos cabos para-raios.



Figura 5-19: Perfil de campo elétrico com e sem a presença dos cabos para-raios para uma linha de transmissão de 345 kV, circuito simples e configuração horizontal (sistema 2).



Figura 5-20: Diferença percentual dos níveis de campo elétrico com e sem a presença de cabos para-raios para uma linha de transmissão de 345 kV, circuito simples e configuração horizontal (sistema 2).

Os resultados ilustrados na Figura 5-19permitem concluir que os níveis de campos elétricos considerando a presença dos cabos para-raios apresentam valores inferiores ao perfil que desconsidera os mesmos. A Figura 5-20 permite a quantificação dessa influência. Conforme divulgado na literatura, verifica-se que a diferença percentual entre os níveis de campos elétricos com e sem a presença dos cabos para-raios são inferiores aos 2% relatados na literatura, [30]. Tal situação ocorre para as demais configurações de linhas utilizadas nesta dissertação. Portanto, os resultados apresentados nas próximas seções desconsideram a presença dos cabos para-raios.

## 5.2.4 – Perfis de campos elétricos a 1m do solo com e sem a presença de dutos na faixa de passagem

Nessa seção, pretende-se avaliar a influência de dutos metálicos, localizados na faixa de passagem de linhas de transmissão, no perfil transversal de campo elétrico. Para tal avaliação foi construído, em um mesmo gráfico, os perfis de campo elétrico com e sema presença de dutos na faixa de passagem. O sistema utilizado em tal análise é o mesmo utilizado na subseção anterior (Figura 2-3).O duto utilizado possui um diâmetro de 0,35 m,está localizado a uma distância horizontal de 15 metros do centro da torre da linha e a uma altura de 0,5 m em relação ao solo. O resultado dessa análise pode ser observado na Figura 5-21, que ilustra o perfil de campo elétrico com e sem à presença do duto na faixa de passagem da linha de transmissão. Com base nesta Figura as seguintes observações podem ser destacadas:

• O campo elétrico sofre uma diminuição considerável nas proximidades do duto (15 m). Nesse ponto, verifica-se valores de campo de 0,66 kV/m. Caso não existisse o duto, o campo atingiria valores próximos a 4 kV/m . Isso corresponde uma diminuição de, aproximadamente, 84%.

• Além da diminuição dos níveis de campo elétrico no ponto onde o duto está localizado, evidencia-se também, uma diminuição desses níveis na região próxima ao duto. Observa-se que a redução de tais níveis ocorre entre as distâncias de 11,5 m e 17,5 m chegando a uma diminuição máxima de 84 % em d =15 m.

 No que diz respeito a aspectos de segurança pessoal, a presença dos dutos na faixa de passagem de linhas de transmissão é benéfica, pois reduz consideravelmente os níveis de campo elétrico gerado pelas distribuições de carga dos condutores das linhas.

 Apesar da presença de dutos nas proximidades de linhas de transmissão ser benéfica para pessoas ou animais próximos aos mesmos, é importante avaliar os efeitos de sua exposição contínua, em longo prazo, a esses níveis de campos elétricos. Essa avaliação está fora do escopo dessa dissertação.

• É importante salientar que a presença dos dutos na faixa de passagem das linhas é benéfica para pessoas que não estejam em contato direto com as estruturas do duto. Do contrário, o potencial existente no duto pode oferecer risco de choque elétrico a tais pessoas. Esse assunto é abordado com mais detalhes nas subseções 4.3.4 e 4.3.5 e seções 5.4 e 5.5, que tratam de níveis de correntes que circulam em pessoas em contato com dutos e técnicas de mitigação.



Figura 5-21: Perfis de campo elétrico com e sem a presença do duto na faixa de passagem de uma linha de transmissão de 345 kV, circuito simples, configuração horizontal (sistema 2).

A verificação de que a presença de dutos na faixa de passagem de linhas de transmissão influencia diretamente no perfil de campo elétrico, justifica uma investigação mais detalhada a esse respeito. Essa investigação é realizada por meio de análises de sensibilidade com relação às configurações geométricas dos dutos. Nesse caso, essa sensibilidade é avaliada com relação ao raio e ao posicionamento do duto em relação à linha de transmissão.

#### • Variação do raio dos dutos

A linha de transmissão utilizada nessa análise é a mesma anterior (Figura 2-3). São considerados nesta análise três valores de raios do duto: 17 cm, 20 cm, e 22,5 cm. A distância horizontal do duto em relação ao centro da linha é mantida igual a 10 m. A altura do duto é de 0,5 m.

A Figura 5-22 apresenta, em um mesmo gráfico, os resultados de níveis de campo elétrico com três dutos de raios diferentes, conforme mencionado.



Figura 5-22: Perfis de campo elétrico considerando a variação dos raios dos dutos Observando-se a Figura 5-22, as seguintes constatações podem ser tecidas:

 Observa-se uma discreta variação dos níveis de campo elétrico em relação aos raios do duto. A tendência geral é a seguinte: quanto maior o raio, maior será o decréscimo nos níveis de campo elétrico. Essa diminuição é de, aproximadamente, 67% para o raio igual a 17 cm, 81% para o raio igual a 20 cm e 87% para o raio igual a 22,5 cm.

 Aumentos mais significativos no raio do duto poderiam ocasionar maiores diminuições dos níveis de campo elétrico. Contudo, tal aumento excessivo nos raios dos dutos resultaria em dutos não realísticos, uma vez que seriam muito pesados e economicamente inviáveis.

#### Variação do posicionamento dos dutos

Para a análise dos efeitos do posicionamento do duto na distribuição do campo elétrico no nível do solo, é utilizada a mesma configuração de linha de transmissão utilizada na análise de sensibilidade anterior (Figura 2-3). Nessa análise, o duto é posicionado a três distâncias diferentes (10 m, 20 m e 30 m) do centro da linha. Em todas as análises o raio é mantido igual 17 cm.

A Figura 5-23 apresenta os resultados da análise de sensibilidade do perfil de campo elétrico com relação ao posicionamento dos dutos.



Figura 5-23: Perfis de campo elétrico considerando a variação do posicionamento dos dutos De acordo com a Figura 5-23, as seguintes observações podem ser realizadas:

• Percebe-se uma aparente variação dos níveis de campo elétrico em relação ao posicionamento dos dutos. A tendência geral é a seguinte: quanto mais próximo o duto estiver da linha, maior é o decréscimo nos níveis de campo elétrico. Os valores são os seguintes: para duto posicionado a 10 m o nível de campo elétrico reduz de, aproximadamente 2,1 kV/m para 0,93 kV/m (56%). Já com o duto posicionado a 20 e 30 m essa redução é de, aproximadamente, 53% e 45%, respectivamente.

 Diante do exposto, posicionar o duto imediatamente abaixo de algum dos condutores das linhas seria benéfico no que diz respeito a redução de níveis de campos elétricos. No entanto, essa medida é inviável, pois as estruturas dos dutos não podem coincidir com as torres das linhas e a presença dos dutos abaixo das linhas podem prejudicar a manutenção e confiabilidade operacional das mesmas.

### 5.2.5 – Comparação dos resultados dos módulos de campo elétrico obtidos

Conforme mencionado no Capítulo 3, o módulo do campo elétrico pode ser obtido de duas maneiras diferentes: método das elipses (ou no tempo) e método aproximado. Os resultados de níveis de campo elétrico obtidos nessa Dissertação, até o presente momento, utiliza o método aproximado.

Nessa seção, pretende-se comparar as três metodologias para obtenção de módulo de campo elétrico descritas anteriormente. Para tal, utiliza-se o sistema 2 (descrito no capítulo 2, seção 2.2.3 – Figura 2-3). O resultado dessa análise é apresentado na Figura (5-24).



Figura 5-24: Comparação das metodologias para cálculo do módulo do campo elétrico.

Observa-se, por meio da Figura 5-24, que as curvas de módulo de campo elétrico estão sobrepostas. Sendo assim, verifica-se que, para cômputo de campo elétrico no nível do solo, as duas metodologias apresentam resultados semelhantes.

### 5.3 – Resultados associados à avaliação do potencial elétrico

A presente seção apresenta os resultados associados à avaliação do potencial elétrico ao longo da faixa de passagem de linhas de transmissão. Como visto no Capítulo 4 é este perfil transversal de potencial que possibilita o cálculo de correntes induzidas em corpos em contato eventual com o duto.

Primeiramente, na sub-seção 5.3.1, os perfis de campo e potencial elétricos são avaliados simultaneamente, para todas as configurações de linhas sob estudo, para verificação de suas semelhanças e diferenças.

Posteriormente, na sub-seção 5.3.2, estes potenciais são comparados com os resultados oriundos das formulações descritas em [97].

Finalmente, na subseção 5.2.3, são calculados níveis de correntes induzidas em corpos em eventual contato com os dutos. Nessa seção são apresentadas também as técnicas de mitigação para os efeitos indesejados de tais correntes.

#### 5.3.1 – Comparação dos resultados de campo e potencial elétrico

O potencial elétrico corresponde ao efeito integral do campo elétrico, conforme discutido nos Capítulos 3 e 4 (equações (3.17), (3.19) e (4-12)). Assim, é esperado que o perfil de potencial elétrico esteja relacionado ao perfil de campo elétrico para um mesmo sistema físico. Dessa forma, essa seção compara os perfis de campo e potencial elétrico para todas as configurações de linha utilizadas nesse trabalho e em vários pontos de observação (alturas diferentes em relação ao solo).

A Figura 5-25 apresenta os resultados de campo e potencial elétrico para todos os sistemas sob estudo (descritos na seção 2.2 do Capítulo2) considerando o ponto de observação (altura) a 1 m do solo (Figuras 2-2 a 2-7).

Na Figura 5-26, um sistema é escolhido (sistema 2 – Figura 2-3) e os perfis de campo e potencial são obtidos considerando o ponto de observação no nível do solo.

Além disso, na Figura 5-27, o mesmo sistema (sistema 2) é utilizado para análise dos perfis de campo e potencial elétrico em pontos de observação distintos (0,5 m, 1 m, e 5 m).



Figura 5-25:Perfis de campo e potencial elétricos a 1 m do solo para todos os sistemas sob estudo, descritos no Capítulo 2, seção 2.2.



Figura 5-26: Perfis de campo e potencial elétrico, no nível do solo, para o sistema.



Figura 5-27: Perfis de campo e potencial para o sistema 2 calculados em três pontos de observação distintos (0,5 m, 1 m e 5 m).

Com base nos resultados ilustrados nas Figuras 5-25, 5-26 e 5-27, os seguintes comentários podem ser tecidos:

• Considerando o ponto de observação a 1 m do solo (para todos os sistemas), o perfil de potencial elétrico é exatamente igual ao perfil de campo elétrico (Figura 5-25). Em consequência, a relação entre o potencial e o campo elétrico é justamente a distância entre os planos que definem a região de campo uniforme, qual seja: V=E.H<sup>8</sup>, onde H é a distância em causa. Neste caso, H=1 m e, assim, V=E.

Tal fato ocorre, pois nessa região o sistema pode ser considerado como um capacitor de placas paralelas, cujas distâncias entre as placas é muito menor do que as dimensões do capacitor. Dessa forma, o campo elétrico em tal região é uniforme e o potencial elétrico é dado por uma relação direta do campo elétrico e da altura do ponto de observação em relação ao solo *H* (distância entre as placas *d*), V = E.d sendo d = H, [30].

• Considerando o ponto de observação a uma altura de 0,5 m, percebe-se também a proporcionalidade das curvas de campo e potencial elétricos (Figura 5-27). No entanto, o potencial nesse ponto é exatamente a metade do campo elétrico. Esse resultado confirma a afirmação acima, ou seja, na região na qual o campo elétrico é uniforme (z<1 m), a relação do campo e potencial é dada por V = E.H. Neste caso, H = 0,5m o que torna o valor de potencial a metade do campo elétrico correspondente.

• Conforme esperado, o potencial no nível do solo é igual a zero, Figura 5-26, uma vez que para todos os cálculos desenvolvidos o solo é considerado como um condutor elétrico perfeito.

Na região na qual o campo elétrico não é uniforme (z>1 m), o potencial elétrico não é dado pela simples multiplicação do campo pela altura do ponto de observação. Talfato pode ser observado com o auxílio da Figura 5-27. Por exemplo, para o ponto em y≈10 m (y= distância horizontal)o campo elétrico é aproximadamente 5,75 kV/m, enquanto potencial é em torno de 4,2 vezes o valor do campo (24,26 kV)e não 5 vezes, ou seja, não existe proporcionalidade entre campo e potencial.

Diante desses resultados, é interessante verificar até que altura o campo elétrico pode ser, em termos práticos, considerado uniforme. Para tal, a Figura 5-28 apresenta os perfis de campos elétricos no nível do solo, a 1 m e a 2 m do solo para avaliar a validade de tal consideração.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Esta relação é exatamente igual à existente entre o potencial e o campo em um capacitor de placas paralelas, onde a distância entre as placas é representada por H.



Figura 5-28: Perfil de campo elétrico para três pontos de observação diferentes: no nível do solo, a 1 m do solo e a 2 m do solo (sistema 2).

Observa-se, por meio da Figura 5-28 que, no nível do solo e a 1 m do solo o campo elétrico são praticamente iguais ao longo de todo perfil transversal, com uma variação máxima que chega a 5% entre os pontos (-2m<y<2m). Além disso, percebe-se que a diferença entre o campo elétrico no nível do solo e a 2 m do solo é bastante acentuada, chegando a 22% nas proximidades do eixo de simetria (-2m<y<2m).

#### 5.3.2 – Resultados de potencial com formulações práticas

Conforme mencionado no capítulo 4, [97] apresenta formulações práticas (equações (3.20) e (4.13)) para o cômputo dos níveis de potenciais em dutos.

O sistema escolhido para calcular o potencial utilizando-se as equações propostas por [97] é representado na Figura 2.3. O duto (situado nas proximidades desse sistema) possui raio de 0,22 cm e está posicionado a uma distância de 20 metros do eixo de simetria e a uma altura de 1 m do solo.

Os resultados obtidos são os seguintes:

- Equação (3.20): o potencial de 3,91 KV.
- Equação (4.13): o potencial de 3,98kV.

A Figura 5-29 apresenta o resultado de potencial elétrico para a mesma linha de transmissão utilizada acima (sistema 2), obtido por meio do programa desenvolvido nesta dissertação (Equações (4.12) e (4.16)).



Figura 5-29: Potencial elétrico a 1 m do solo para o sistema 2 (descrito no capítulo 2)

De acordo com a Figura 5-29, percebe-se que o potencial elétrico obtido para o ponto no qual o duto está localizado (z= 1m e y=20 m) é de, aproximadamente, 3,84 kV.

#### Comparação dos resultados das formulações de potencial elétrico

Conforme mencionado no Capítulo 4 (seção 4.3, sub-seção 4.3.3), existem três metodologias para obtenção do potencial elétrico: (i) efeito integral do campo elétrico (equação (4.12)), (ii) formulações práticas (equações (3.20) e (4.13)) e (iii) operações matriciais (equações (4.14) e (4.15)).

Os resultados obtidos pelas três formas de cálculo estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultados de potenciais elétricos para as três metodologias descritas acima.

METODOLOGIA	EQUAÇÕES	POTENCIAL ELÉTRCIO (kV)
Efeito integral do campo elétrico	(4.12)	3,84
Fórmulas Práticas	(3.20)	3,91
	(4.13)	3,98
Operações Matriciais	(4.14)	3,85

Verifica-se que os valores de potenciais são bastante próximos, apresentando uma diferença percentual máxima de, aproximadamente, 3,5% (equações (3.20) e (4.12)).

É importante salientar que, apesar dos resultados de potenciais elétricos apresentarem excelente concordância, as metodologias expressas por meio das equações (4.12) e (4.14) são mais robustas, pois permitem o cômputo dos potenciais elétricos nos dutos para quaisquer configurações de linhas de transmissão. Já as formulações práticas (equações (3.20) e (4.13)), permitem tal cálculo apenas para linhas de circuito simples e desconsidera a presença dos cabos para-raios.

Assim, considerando-se uma linha de transmissão de circuito simples cuja presença dos cabos para-raios não é relevante, a utilização das formulações práticas pode facilitar o cômputo do potencial elétrico em dutos.

# 5.4 – Resultados de correntes induzidas em corpos em eventual contato com os dutos

O cálculo de correntes que circulam em corpos em contato com os dutos é fundamental para avaliação de aspectos de segurança pessoal. Estas correntes podem ser calculadas utilizando-se a equação (4.18) apresentada no Capítulo 4, seção 4.3, sub-seção 4.3.4.

A Figura 5-30 ilustra os níveis destas correntes (em mA) por unidade de comprimento do duto (L<sub>D</sub>) em km, ou seja  $\frac{I_C}{L_D} = \frac{2\pi f V_D}{P_{DD}}$ . Nesta figura, I<sub>C</sub>/L<sub>D</sub>está representado em função da distância horizontal (em metros). Para todos os sistemas de transmissão utilizados nessa dissertação (Figuras 2-2 a 2-7). Nas simulações computacionais realizadas, para levantamento da Figura 5-30, o duto tem 1 m de altura e 20 cm de raio.



Figura 5-30: Corrente induzida por km de duto para todos os sistemas de transmissão (sistemas 1 a 6).

A interpretação da Figura 5-30 permite as seguintes observações:

• Os perfis de corrente induzida apresentam, como esperado, comportamento similar aos de campo e potencial elétricos.

• As distribuições de cargas elétricas dos sistemas1 e 6 geram níveis máximos de correntes induzidas próximos de 5 mA/km. Por outro lado, o sistema 5 (mesmo nível de tensão do sistema 6) gera níveis máximos próximos de 18 mA/Km. Este fato ilustra uma das técnicas de mitigação comentada no capítulo 4 (seção 4-3, sub-seção 4-3-5), referente à sequência diferente de fases em linhas de circuitos duplos.

• Os sistemas 2, 3, e 4apresentam níveis máximos de correntes mais elevados, variando 40 a 55mA/Km, aproximadamente.

• Curvas iguais às apresentadas na Figura 5-30 apresentam considerável interesse prático. Por exemplo, considere o sistema 4, com um duto situado a 20 m de sua fase central. Neste caso,  $I_c/L_D = 40$  mA/Km. Assim, se o duto possuir um comprimento de 1 Km ( $L_D$ ),  $I_c = 40$  mA. Desta forma, torna-se imperativa a aplicação de uma técnica de mitigação.

Com o objetivo de verificar a confiabilidade da metodologia e do programa desenvolvido é realizada aqui a validação dos resultados de correntes induzido por meio de comparação com os resultados apresentados por [97].

Para validação, são utilizados dois sistemas apresentados em [97]: (i) linha de transmissão de 400 kV, circuito simples, configuração horizontal e (ii) linha de transmissão de 400 kV, circuito duplo, configuração vertical. A Tabela 5.4 apresenta as seguintes configurações geométrica dessas linhas.
Tensão (kV)	N° de condutores por fase	Configuração	Altura Fase A	Altura Fase B	Altura Fase C	Posição Fase A	Posição Fase B	Posição Fase C
400	2	Horizontal	15	15	15	-10	0	10
400	2	Vertical	13	20	27	-7	-7	-7

Tabela 5.4: Configuração geométrica das linhas utilizadas na validação dos resultados

Os condutores A', B' e C' estão posicionados a uma distância simétrica em relação aos condutores A, B e C.

As Figuras 5-31 e 5-32 apresentam os resultados obtidos nessa dissertação e em [97], respectivamente, para a linha de circuito simples. Já as Figuras 5-33 e 5-34 apresentam os mesmos resultados para a linha de circuito duplo.

I mA/Km

40

30

20

10

-100

LINHA

80 -70

CONFIGURAÇÃO HORIZONT

400 KV



Figura 5-31: Perfil de corrente induzidas obtido nessa Dissertação para uma linha de circuito simples.



Figura 5-32: Perfil de corrente induzida obtido por [97] para uma linha de circuito simples.

-40 -30 -20 -10 0

-60 -50





Figura 5-34: Perfil de corrente induzida obtido por [97] para uma linha de circuito duplo.

Observa-se, por meio das Figuras 5-31, 5-32, 5-33 e 5-34, que os resultados são muito próximos apresentando uma diferença percentual para os pontos de máxima corrente

de, aproximadamente 1,5% e 3% para a linha de circuito simples e a de circuito duplo, respectivamente.

Uma análise adicional relevante refere-se à construção de curvas práticas que possibilitem uma determinação direta do máximo comprimento permitido para o duto, em função da máxima corrente admissível pelo corpo humano ( $I_{ADM}$ = 5 a 15 mA). Nesta perspectiva, a Figura (3-35) ilustra o máximo comprimento de duto ( $L_D$ ) em função do posicionamento horizontal do duto, para 3 valores de  $I_{ADM}$  (5,10 e 15 mA), para o sistema2.





A análise da Figura 5-35 permite as seguintes conclusões:

• Para um mesmo posicionamento horizontal, quanto menor a corrente admissível (postura mais conservadora), menor deve ser o comprimento do duto. Tal comportamento decorre da relação direta entre I<sub>C</sub>e L<sub>D</sub>.

• A partir de um certo valor de posicionamento horizontal (neste caso próximo de 15 m), para todos os valores de  $I_{ADM}$ ,  $L_D$  máximo aumenta com o aumento deste posicionamento. Isto ocorre devido ao fato de que  $V_D$  diminui com o aumento do posicionamento horizontal e, assim,  $I_C$ também diminui. Por outro lado,  $L_D$  máximo aumenta no posicionamento próximo de 15 mA até o da fase central. Tal comportamento está associado, diretamente, com a variação de  $V_D$ nessa região, que diminui em direção à fase central, o que promove menores  $I_C$  e uma possibilidade de utilização de dutos mais longos. Evidentemente, por questões de confiabilidade do sistema de transmissão, não é adequado que o duto seja localizado nesta região. • Valores maiores de  $I_{ADM}$ , para um mesmo posicionamento horizontal do duto, permitem maiores valores de  $L_D$  máximo, pois à medida que  $I_{ADM}$  aumenta  $I_C$  pode assumir valores maiores e, assim,  $L_D$  também.

A Figura 5-36 exibe resultados similares aos da Figura 5-35, porém para I<sub>ADM</sub>=5 mA e para todos os sistemas de transmissão (Figura 2-2 a 2-7).



Figura 5-36:Perfis de comprimentos máximos dos dutos pelo posicionamento dos mesmos, considerando I<sub>ADM</sub>=5 mA, para todos os sistemas sob-estudo (sistemas 1 a 6).

A análise dos resultados é similar à realizada para a Figura 5-35. Contudo, vale destacar que:

Para sistemas de transmissão com menores valores de tensão nominal, fixando o posicionamento do duto, maiores são os valores de L<sub>D</sub> máximo, uma vez que nestes casos V<sub>D</sub> são menores e, assim, I<sub>C</sub> também, quando comparados com os associados aos sistemas com tensões maiores;

Sistemas com configuração assimétrica apresentam curvas de L<sub>D</sub> máximo X posicionamento também assimétricos.

#### 5.5 – Técnicas de Mitigação

Conforme mencionado no Capítulo 4 (sub-seção 4.3.5), o principal efeito indesejado do acoplamento capacitivo está associado a aspectos de segurança pessoal, devido à possibilidade de correntes em pessoas em contato com os dutos, [97].

Verifica-se, por meio dos resultados apresentados na seção 5.4, que, dependendo de L<sub>D</sub>, os níveis de correntes podem ser superiores aos máximos toleráveis pelo corpo humano. Nesses casos, há a necessidade de utilização de técnicas de mitigação para tal problema.

As técnicas de mitigação associadas às linhas de transmissão são utilizadas geralmente em fase de projeto (transposição dos condutores e mudança de sequência de fases para circuitos duplos). Com relação aos dutos, geralmente, é prática comum aterrá-los.

A máxima resistência de aterramento ( $R_A$ ) é obtida pela equação (4.20). Esta equação mostra que, desde que tenha sido assumida uma resistência do corpo humano ( $R_C$ ) igual a 1000  $\Omega$ ,  $R_A$  depende diretamente de  $\alpha$ , a relação entre  $I_C$  e  $I_{ADM}$ . Logo, caso  $I_{ADM}$  seja fixada em 5mA (postura conservadora)  $R_A$  passa a depender somente de  $I_C$ . No caso em que as características do duto forem mantidas constantes (altura de 1 m, raio 20 cm e comprimento igual a 1 Km),  $I_C$  depende somente de  $V_D$ . Com essas condições, A Figura5-37 foi computacionalmente construída. Esta figura esboça o máximo valor de  $R_A$  (necessário para manter a corrente no corpo humano abaixo de 5mA) em função do posicionamento horizontal do duto, para os seis sistemas de transmissão considerados neste trabalho (Figuras 2-2 a 2-7).



Figura 5-37: Perfil de máxima resistência de aterramento do duto em função de seu posicionamento horizontal.

Observando-se a Figura 5-37os seguintes comentários podem ser tecidos:

 Para sistemas com maiores níveis de tensão (2,3,4), é necessário que o duto tenha um aterramento melhor (no sentido de menor resistência, R<sub>A</sub>). Isto ocorre porque, nestes casos, V<sub>D</sub> é maior e, assim, I<sub>C</sub> também, o que requer um menor R<sub>A</sub> para drenar maior corrente e proteger a pessoa em contato com o duto.

 Para sistemas com configuração assimétrica, o comportamento de R<sub>A</sub> máximo versus o posicionamento também é assimétrico.

• De um modo geral, à medida que o duto se afasta da linha de transmissão, R<sub>A</sub> aumenta, pois menor I<sub>C</sub> na pessoa e, assim, maiores valores de R<sub>A</sub> são suficientes para a proteção pessoal.

• O comportamento de  $R_A$  é inversamente proporcional aos de  $I_C$  e  $V_D$ , no sentido de que quando  $I_C/V_D$ são mínimos,  $R_A$  é máximo e vice-versa.

Resistências de aterramento baixas, como as requeridas para os dutos situados nas proximidades dos sistemas 2, 4 e 5 (Figura 5-37), máximo de 40  $\Omega$ , requerem cuidado especial no projeto do aterramento, principalmente em regiões cujos solos possuem elevados valores de resistividade, [109,110,111,113]. Essa questão está fora do escopo dessa dissertação.

É interessante proceder-se a uma avaliação da influência do comprimento do duto  $(L_D)$  em  $R_A$ . Assim, a Figura 5-38 apresenta uma análise da resistência máxima de aterramento, para diversos comprimentos de dutos (250 m a 1,5 Km), em função do posicionamento horizontal dos dutos.

Neste caso, I<sub>ADM</sub>=5 mA e o sistema de transmissão é aquele representado na Figura 2-3, o duto está a 1 m de altura e raio de 1 m .



Figura 5-38: Avaliação da resistência de aterramento para diversos comprimentos de dutos em função do posicionamento horizontal dos mesmos

Observa-se, por meio da Figura 5-38 que, de modo geral as tendências são as seguintes:

 Quanto menores os comprimentos dos dutos (para um mesmo posicionamento horizontal) maiores são os valores de resistências de aterramento, pois menores são os valores I<sub>C</sub>(quando comparados com I<sub>C</sub> associados a maiores L<sub>D</sub>).

• Para um mesmo  $L_D$  quanto maior o posicionamento horizontal (mais distantes o duto da linha), maior  $R_A$ , pois  $V_D$  e  $I_C$  diminuem e, assim, valores nais altos de  $R_A$  são suficientes para garantir a segurança pessoal.

#### 5.6 – Conclusão

Este capítulo apresenta uma série de análises de sensibilidade de interesse aplicado na avaliação da interação elétrica entre linhas de transmissão e dutos metálicos aéreos.

Inicialmente, na seção 5.2, são apresentados diversos resultados de interesse, associados a avaliação de níveis de campo elétrico. São eles:

Perfil transversal de campo elétrico (nível do solo e a 1 m de altura);

Influência dos cabos para-raios no perfil transversal de campo elétrico;

- Influência dos dutos no perfil transversal de campo elétrico;
- Comparação com resultados divulgados na literatura;
- Validação mediante comparação com resultados de medição divulgados na literatura;

 Sensibilidade no módulo do campo elétrico em relação ao método utilizado para seu cálculo (aproximado, elipse/no tempo – seção 4.3, sub-seção 4.3.2).

Em seguida, na seção 5.3, são descritos os comportamentos dos níveis de potencial elétrico nas proximidades das linhas de transmissão. Para tal, os seguintes resultados são apresentados:

Relação entre campo elétrico e potencial;

 Comparação entre os métodos utilizados nesta dissertação (efeito integral do campo elétrico, fórmulas práticas simplificadas e operações matriciais – seção 4.3, sub-seção 4.3.3).

Posteriormente, na seção 5.4, são analisados os níveis de correntes em seres humanos em eventual contato com os dutos. Os resultados correspondem à sensibilidade de tais níveis em relação a: configuração da linha de transmissão e posicionamento do duto em relação à mesma. Tais resultados são comparados com alguns, disponíveis na literatura.

Finalmente, na seção 5.5, técnicas de mitigação são apresentadas, tendo em vista aspectos de segurança pessoal. Os resultados são concentrados, essencialmente, na principal técnica relativa ao duto: seu aterramento.

# CAPITULO 6 - Conclusões e Propostas de Continuidade

# 6.1 – Introdução

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a interferência elétrica entre linhas de transmissão, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos. Essa interferência é avaliada pelo acoplamento elétrico (também denominado acoplamento capacitivo) entre as linhas e os dutos. Seus efeitos mais significativos geram níveis de potenciais elétricos induzidos nos dutos, que por sua vez podem provocar prejuízos/danos em pessoas, animais ou objetos em contato com os dutos.

Em termos de segurança pessoal (principal objeto de preocupação nessa dissertação), o dano mais preocupante refere-se aos níveis de correntes que são estabelecidos em seres humanos em eventual contato com os dutos. Caso tais níveis superem os máximos toleráveis, técnicas de mitigação são necessárias para minoração de tais efeitos indesejados.

O primeiro passo na avaliação dos níveis de interferência corresponde ao cálculo de perfis transversais (em relação ao eixo longitudinal da linha) de campos elétricos. Tais perfis são sensíveis às características elétricas e geométricas das linhas de transmissão e dos dutos.

Em seguida, o segundo passo, refere-se ao levantamento de perfis similares de potenciais elétricos. Tais perfis, igualmente sensíveis às referidas configurações geométricas, subsidiam de forma decisiva o terceiro passo na avaliação do acoplamento em causa, qual seja, a determinação das correntes em pessoas em contato direto com os dutos.

Nesse terceiro passo, curvas práticas de perfis transversais de correntes induzidas em dutos devem ser levantadas. Em função do seu caráter prático, é interessante que sejam representadas em função do comprimento do duto.

Finalmente, no quarto passo, caso as correntes em questão ultrapassem limites admissíveis, torna-se imperativo o estabelecimento de técnicas de mitigação. Estas podem ser aplicadas às linhas ou aos dutos. Neste trabalho, enfoque principal foi dado à aplicação em dutos, por meio de seu aterramento.

#### 6.2 – Principais conclusões

Para o cálculo das grandezas físicas de interesse, descritas na seção anterior, desenvolveu-se neste trabalho, um programa computacional. Este possibilita uma série de análises de sensibilidade. De tais análises um conjunto de conclusões podem ser esboçadas. Destacam-se a seguir as principais, dentro de uma expectativa geral:

- (A) Campos e potenciais elétricos
  - (A.1) Seus perfis transversais são, de um modo geral, proporcionais aos níveis de tensão das linhas de transmissão.
  - (A.2) Seus perfis transversais são muito sensíveis às configurações geométricas das linhas de transmissão. Podem, inclusive, apresentarem formato e intensidades distintos para linhas de mesmo nível de tensão. Como exemplo, pode-se citar linha de circuito duplo, nas configurações de alta e baixa reatâncias.
  - (A.3) Os níveis de campos elétricos são, em termos práticos, uniformes na região compreendida entre a superfície do solo e a de 1m de altura. Esta região é justamente àquela onde os dutos aéreos são normalmente instalados. Por conseguinte, os potenciais nessa região podem ser determinados pela simples multiplicação do campo elétrico pela altura de interesse (V =E.H).
  - (A.4) Os cabos para-raios promovem uma redução pouco significativa nos perfis de campos e potenciais. Tal redução alcança o máximo 2%.
  - (A.5) A presença dos dutos altera de forma significativa os perfis de campo elétrico. Tal alteração corresponde a uma diminuição dos níveis de campo nas proximidades dos dutos. Este fato é benéfico para a linha de transmissão. Contudo, seu efeito no duto deve ser avaliado, pois pode degradar sua estrutura físico-química em longo prazo (tópico fora do escopo dessa dissertação). De um modo geral, o campo elétrico no duto diminui com o aumento do seu raio e com seu afastamento horizontal em relação à linha.
  - (A.6) Os perfis de campo são validados por meio de comparação com resultados experimentais divulgados na literatura. Percebe-se, apesar da escassez de informações de alguns trabalhos, uma boa concordância entre os resultados obtidos nessa dissertação e aqueles de medição. Tal fato ilustra a consistência física da metodologia de cálculo utilizada nesta dissertação. Adicionalmente, os resultados são comparados também com outros trabalhos computacionais relatados pela literatura, novamente uma boa concordância é verificada.

- (A.7) Os níveis de potenciais elétricos, obtidos nessa dissertação, são comparados com resultados oriundos de formulações práticas, evidenciando uma boa concordância. É importante salientar que os potenciais elétricos induzidos nos dutos não dependem de seus comprimentos. Por outro lado, aumentam com a tensão da linha e reduzem com o afastamento entre duto e linha.
- (B) Correntes induzidas
  - (B.1) Seus perfis transversais possuem formatos análogos aos do campo e potencial elétricos, possuindo a mesma sensibilidade destes.
  - (B.2) Seus níveis são comparados com alguns disponíveis na literatura, os resultados ilustram excelente concordância.
  - (B.3) Para localizações práticas de dutos (exterior às fases extremas da linha), considerando seu posicionamento horizontal fixo, o máximo comprimento permitido de duto aumenta com o aumento da corrente admissível pelo corpo humano.
  - Por outro lado, mantendo a corrente admissível fixa, à medida que o duto se afasta da linha seu comprimento máximo permitido aumenta. Adicionalmente, este comprimento é sensível aos níveis de tensão e configuração geométrica das linhas de transmissão, sendo tanto menor quanto maior as tensões do sistema de transmissão.
  - Estes fatores ilustram um importante controle dos níveis de corrente induzida em dutos aéreos.
  - (B.4) Salienta-se que estas correntes aumentam com o comprimento do duto, sendo proporcional ao mesmo, quando a linha e o duto são paralelos.
- (C) Técnicas de mitigação (aplicada ao duto)
  - (C.1) Corresponde principalmente ao aterramento do duto. Verifica-se que à medida que a corrente no corpo humano em contato com o duto aumenta, é necessário um aterramento melhor (menor resistência de aterramento).
  - (C.2) A resistência de aterramento é sensível à linha de transmissão (configuração e tensão). De um modo geral, quanto maior o nível de tensão da linha, menor deve ser o valor desta resistência para proteção do ser humano.
  - (C.3) Para um mesmo posicionamento horizontal do duto, a resistência de aterramento diminui com o aumento do comprimento do duto.

Para finalizar é importante destacar que as conclusões elencadas acima referem-se, evidentemente, os acoplamentos elétricos (capacitivo) entre linha, operando em regime permanente, e dutos metálicos aéreos. Todavia, os processos físicos que estabelecem os acoplamentos elétricos e magnéticos, entre linhas e dutos, ocorrem de forma concomitante. Portanto, uma análise geral deve contemplar todos os acoplamentos.

# 6.3 – Publicações originadas da Dissertação

As seguintes publicações têm origem neste trabalho de dissertação:

1 - Santos, Mariana G., et al. 2010. Ferramenta computacional para cálculo dos níveis de campo elétrico gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente: Aplicação na interferência eletromegnética em dutos metálicos. *Nono Simpósio de Mecânica Computacional.* 28 de Maio de 2010, pp. 1-8, [75].

2- Santos, Mariana G., et al. 2010. Influência de dutos metálicos aéreos na distribuição de campo elétrico gerado por linhas de transmissão operando em regime permanente. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Setembro de 2010, pp. 100-107, [74].

# 6.4 – Propostas de continuidade

Os desenvolvimentos alcançados nesta pesquisa abrem diversas discussões e necessidades de trabalhos futuros, dentre os quais podem ser citados os seguintes:

(A) Regime permanente

(A.1) Dutos aéreos

Abordagem integrada dos acoplamentos elétrico (capacitivo) e magnético, considerando os seguintes aspectos:

- Avaliação dos efeitos da exposição, em longo prazo, a campos elétricos, levando em consideração a composição fisicoquímica do duto e o tipo de energia que este transporta.
- Avaliação da viabilidade econômica da instalação de dutos nas faixas de passagem de linhas de transmissão.
- Otimização de alguns parâmetros, tais como: determinação de localização ótima (dentro da faixa de passagem); projeto de aterramentos; avaliação de níveis de correntes induzidas em função das resistividades de solos típicos; comprimento máximo; definição da necessidade de outros pontos de aterramento do duto, etc.
- Trechos de dutos não paralelos às linhas.

(A.2) Dutos enterrados

Abordagem integrada dos acoplamentos elétrico (condutivo) e magnético, considerando os seguintes aspectos:

- Efeito do solo
- Corrosão do sistema de proteção catódica
- (B) Regime transitório (curto-circuito)

Abordagem integrada dos acoplamentos eletromagnéticos, considerando os seguintes aspectos:

- Ionização do solo
- Distância crítica entre os aterramentos das linhas e dos dutos aéreos (ou duto enterrados).
- Processo de corrosão dos pés das torres das linhas de transmissão pelas correntes contínuas do sistema de proteção catódica dos dutos.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- 1. MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Introdução ao Sistema de Energia Elétrica. Campinas: UNICAMP, 2003.
- NBR 5422. Projetos de Linhas aéreas de Transmissão de energia elétrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - 1985.
- 3. NIH (NATIONAL ISTITUTE OF HEALTH).Healths effects from exposure to powerline frequency electricand magnetic fields. 1999 (N. 99-4493).
- 4. 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.
- IEEE-C95.6. Standart of Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0 to 3 KHz. Piscataway, N. J.:Subcommittee 3 of Standards CoordinatingSubcommittee 28, 2002.
- MORENO, R. F. 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.
- 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.
- NETO, A. M.; SILVA, R. M. C.; BARBOSA, C. R. N.; DOMINGUES, L. A. M. C.; JÚNIOR, C. A. C.; CORREA, S. L.; COSTA, M. A. Avaliação dos Níveis de Campos Elétricos e Magnéticos em Áreas de livre Acesso ao Público - Subestação de Energia Elétrica Florianópolis Agronômica. XIII ERIAC, 24 a 28 de Maio, 2009.
- 9. CPFL. Orientação técnica. Linhas de Transmissão Ocupação de Faixa de Passagem, Responsável Roncolatto, R. A., 2007.
- GONÇALVES, F. A.; LOPES, J. C. R. Instalação de subestações pré-fabricadas na faixa de passagem de linhas de transmissão. Eletricidade Moderna, Ano XXXVII, 2008.
- ALBERTINI, J. A. C. Estudo da influência da corrente alternada na corrosão em dutos metálicos enterrados. Dissertação de Mestrado - Centro Universitário do Instituto Mauá de tecnologia, 2008.
- 12. ALMEIDA, J. P. Análise de falhas e riscos associados aos dutos de gás natural à alta pressão. Projeto de Graduação Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.
- 13. PANOSSIAN, Z.;ALMEIDA, N. L.; ADUB, F. S. E.; CORRÊA, D. M.; LEITE, M.; LAURINO, E. W.; PIMENTA, G. S.; OLIVER, J. H. L. Principais fatores que afetam a

corrosão de dutos enterrados e influencidos por corrente alternada induzida. 17° CBECIMat- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 2006.

- 14. SCHROEDER, M. A. O. Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo. Tese de. Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGEE/UFMG), Março de 2001. Orientador: Prof. Dr. Silvério Visacro Filho.
- SCHROEDER, M. A. O. 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.
- SCHROEDER, M. A. O.; VISACRO, S. An Alternative System for Direct Supply from Transmission Lines by Means of Magnetic Coupling. IEEE Power Engineering Review, v.21, p.52 - 53, 2001.
- 17. GASMIG. www.gasmig.com.br Ultimo acesso 30/05/2011.
- GASNET. www.gasnet.com.br/novogasoduto/operacao.asp O site do Gás Natual-Mapas de Gasodutos - Útimo acesso 30/05/2011.
- 19. ANGLOUS-FERROUS. www.angloamerican.com.br Último acesso 30/05/2011.
- 20. FUCHS, R. D. Transmissão de Energia Elétrica. [S.I.]: LTC/EFEI, 1977.
- 21. GRAINGER, J.; STEVENSON, W. D. J. Power System Analysis. [S.I.]: McGraw-Hill, 1994.
- 22. CAMARGO, M. G. B. C. O setor elétrico brasileiro e sua normatização comtemporânea. Dissertação de Mestrado UNISANTOS, 2005.
- 23. FLEURY, P. F.; FIGUEIREDO, K.; WANKE, P. Logística Empresarial: As pespectivas brasileiras. Coleção COPPEAD de Administração, São Paulo Atlas 2000.
- CÂMARA de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) www.ccee.org.br O Setor Elétrico Brasileiro/Instituições do Setor - Último acesso 30/05/2011.
- 25. AGÊNCIA Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/ResumoEstadual/ResumoEstadual.aspr
   Banco de Informações de Geração- Último acesso 30/05/2011. [S.I.]: [s.n.].
- ABRATE. www.abrate.com.br Associação Brasileira das Grandes Empresas de Transmissão de Energia Elétrica. [S.I.]: [s.n.], 2010.
- 27. HEDMAN, D. E. Teoria das Linhas de Transmissão. Santa Maria RS: Edições UFSM, 1983.
- CEMIG. Superintendência de Planejamento do Sistema Elétrico. Avaliação do Sistema de Transmissão - Período 2003 a 2012. Belo Horizonte, 2008.

- 29. CEMIG. Superintendência de Planejamento do Sistema Elétrico. Avaliação do Sistema de Transmissão Período 2003 a 2012, 2004.
- ELECTRIC Power Research Institute (EPRI), Transmission Line Reference Book -345kV and Above. Estados Unidos: General Electric Company, 1987.
- Neto, A. M.; Barbosa, C. R. N.; Domingues, L. A. de M. C.; Silva Filho, J. I.; Andrade,
   V. H. G; Amorim Júnior, H. de P. Desenvolvimento e Aplicação de Metodologias para Análise do Desempenho de Linhas de Transmissão. SNPTEE, 2007.
- 32. PIRES, L. F. A. Gestão ambiental da implantação de sistemas de transmissão de energia elétrica. Dissertação de Mestrado Universidade Federal Fluminense, 2005.
- RIBEIRO, P. C. C.; FERREIRA, K. A. Logística e transportes: Uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002.
- 34. CEMIG. ER/LT "Linhas de Transmissão Janaúba-Salinas 138 kV características da linha." Belo Horizonte 2006.
- CEMIG. ER/LT "Linha de Transmissão São Gonçalo Ouro Preto 2 500 kV características da linha." - Belo Horizonte - 1988.
- CEMIG. ER/LT "Linha de Transmissão São Gotardo 2 Três Marias 345 kV características da linha." Belo Horizonte.1988.
- 37. FURNAS. S.A. "Projeto básico de Linha de Transmissão de 500 kV, quatro condutores por fase".
- CEMIG. ER/LT 908. "Características de estruturas da Linhas de Transmissão tipo DL3 - 138 kV." - Belo Horizonte - 1999.
- 39. LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI A.; FUCKS, R. D.; Almeida, M. T. Projetos Mecânicos de Linhas Aéreas de Transmissão.1992.
- FRANCISCO, J. C. S. Avaliação da tenacidade à fratura de aço API 5170 utilizados na fabricação de dutos transportadores de gás e petróleo. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlo -SP. 2009.
- 41. TRANSPETRO. www.transpetro.com.br.Último acesso 30/06/2011.
- 42. CASTRO, C. A. A. S. Infra-Estrutura Logística: Dutovias Parte 01. Grupo de Pesquisa Aplicado à Cadeia de Abastecimento (GPAC) Artigo 084, 2007.
- CARDOSO, B.; C., V. Dutos. Artigo da Revista TN-Petróleo N° 67 www.tnpetroleo.com.br - Último acesso 30/05/2011.
- 44. PETROBRÁS. Padrão para gerenciamento de integridade de dutos da Petrobrás N°67, 2005.
- 45. ELLENBERGER, J. F. Piping Systems & Pipeline Asne Code Simplified -Mechanical Engineering: MCGraw-Hill, 2006.

- 46. ACEBRÓN, R. M. 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.
- 47. FERREIRA, M.; SÈRGI, S.; CAMARGO, J.; GOMES, R. V. B.; LACHTERMARCHER,
  M. G. Propriedades mecânicas e epóxis utilizadas no recobrimento interno de oleodutos e gasodutos. Polímeros:Ciência e Tecnologia Artigo técnico, 12, n. p.p. 180-187, 2002.
- 48. HANDBOOK. Valves, Piping, and Pipelines Handbook: 2nd edition, 2005.
- 49. API-5L. Specification for Line Pipe.API Specification 5L, 2000.
- 50. TENARISCONFAB. Catálogo de informações gerais. Último acesso 30/05/2011, www.tenarisconfab.com.br, 2008.
- 51. RUSCH, R. J. Impact of regulatory involvement. IEEE Tutorial Course The Electrostatic and Electromagnetic Effects of AC Transmission, 1979.
- 52. MORENO, R. F. Campos Eletromagnéticos e Saúde Humana: O fato e o mito. XVIII SNPTEE, 18 Outubro 2005.
- 53. KOIFMAN, S. et al. 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.
- 54. WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am. J. Epidemiol., 109, 1979.
- 55. MILHAM JR., S. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. N. Engl. J. Med., 307, 1982.
- 56. MATTOS, I. E.; KOIFMAN, S. Mortalidade por câncer em trabalhadores de companhia geradora de eletricidade do Estado de São Paulo, Brasil. Rev. SaúdePública, 1993.
- 57. BASTUJI-GARIN, S.; RICHARDSON, S.; ZITTOUN, R. Acute leukaemia in workers exposed to eletromegnetic fields. Eur. J Cancer, 1990.
- 58. BATES, M. N. Extremely low frequency electromagnetic fields and cancer: the epidemiologic evidence. Environment Health Pespective, pp 147-156, 1991.
- 59. BONNELL, J. A. Effects of electric fields near power transmission plant. J. R. Soc. Med., 75, n. pp. 933-941, 1982.
- 60. CALLE, E. E.; SAVITZ, D. A. Leukemia in occupational groups with presumed exposure to electrical and magnetic fields. N. Engl. J. Med., 313, n. pp. 1476-1477, 1985.
- 61. POOLE, C.; TRICHOPOULOS, D. Extremely low-frequency electric and magnetic fields and cancer. Cancer Causes and Control, 2, n. pp. 267-276, 1991.

- 62. SHEIKH, K. Exposure to electromagnetic fields and the risk of leukemia. Arch. Environ. Health, 41, n. pp. 56-63, 1986.
- 63. ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.
- 64. FUCHS, R. D. Estudo comparativo dos métodos de cálculo da distribuição dos gradientes de potencial nas superfícies dos condutores múltiplos. Tese apresentada à Congregação da Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI) em concurso de livre docência., 1974.
- HIRSCH, F. W.; SCHAFER, E. Progress Report on the HVDC Test Line of the 400 k. Corona Losses and Radio Interference. IEEE - Transactions on PowerApparatus and Systems, 1969. 1061 - 1079.
- OLSEN, R. G.; WONG, P. S. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines. IEEE - Transactions on Power Delivery, 1992. 2046 - 2055.
- 67. LOEB, L. B. Electrical Coronas. University of Califórnia Press, 1965.
- MARUVADA, P. Electrostatic Field of a System of Parallel Cylindrical Conductors. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol pas-88, nº 7, p.1069 – 1079, 1969.
- 69. PAGANOTTI, A. L. Cômputo dos Níveis de Campos Elétricos Superficiais de Linhas de Transmissão e Otimização de seus Valores na Superfície do Solo. Trabalho de conclusão de curso do Departamento de Engenharia Elétrica - Centro Federal de Educação Tecnológica. 2009.
- 70. CLAYTON, P. R.; KEITH, W. W.; SYED, N. A. Introduction to Electromagnetic Fields.WCB/MCGraw-Hill, 1997. ISBN ThirdEdition.
- 71. WENTWORTH, S. M. Fundamentos de Eletromagnetismo com aplicações em Engenharia, 2006.
- 72. SADIKU, M. N. O. Elementos do Eletromagnetismo: Bookman, 2004.
- 73. GUIMARÃES, G. E. Medições e cálculos de campos elétricos e magnéticos de uma linha de transmissão de 500 kV. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Belo Horizonte, 2005.
- SANTOS, M. G.; SCHROEDER, M. A. O,NEPOMUCENO E. G.; ASSUNÇÃO, T. C. B. N. Influência de dutos metálicos aéreos na distribuição de campo elétrico gerado por linhas de transmissão operando em regime permanente, XVIII Congresso Brasileiro de Automática, Setembro 2010. 100-107.
- 75. SANTOS, M. G.; LOBATO, A. T.; SCHROEDER, M. A. O.; NEPOMUCENO, E. G.; ASSUNÇÃO, T. C. B. N.. Ferramenta computacional para cálculo dos níveis de campo elétrico gerados por linhas de transmissão operando em regime permanente:

Aplicação na interferência eletromagnética em dutos metálicos, Nono Simpósio de Mecânica Computacional, 28 Maio 2010.

- RIBEIRO, E. E. Interferência eletromagnética devido às linhas de transmissão.
   SALTEE Seminário Avançado em Linhas de Transmissão de Energia, 1996.
- 77. TZINEVRAKIS, A. E.; TSANAKAS, D. K.; MIMOS, E. I. Analytical Calculation of the Electric Field produced by Single-Circuit Power Lines. IEEE Transactionson Power Delivery, Julho 2008. 1495-1505.
- 78. FILHO, E. B. S. Estudo de Campo Elétrico em Linha de Transmissão Utilizando o Método dos Elementos de Contorno. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP). 2008.
- TAKASHINA, T.; NAKAE, T.; ISHIBASHI. Calculation of complex fields in conducting media.IEEE - Transaction on Electrical Insulation, EI-15, 1980.
- 80. MALIK, N. H. A Review of the Charge Simulation Method and its aplications.IEEE-Transactions on Electrical Insulation, 24, 1989.
- 81. SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields. IEEE, 4 Dezembro 1973. 1660-1668.
- 82. ABOU-SEADA, M. S.; NASSER, E. Digital computer calculation of the electric potential and field of a rod gap. Proc. IEEE, 56, n. pp.813--820, 1968.
- 83. ABOU-SEADA, M. S.; NASSER, E. Digital computer calculation of the potencial and its gradient of a twin cylindrical conductor. IEEE, 88, n. pp. 1802-1814, 1969.
- 84. SATO, S.; MENJU, S. Digital calculation of electric field by charge simulation method using axispheroidal charges. Electrical Engineering in Japan, 100, n. pp. 1-8, 1980.
- SATO, S.; MENJU, S.; AOYAGI, K; M., HONDA, M. Electric field calculation in 2 dimensional multiple dielectric by the use of elliptic cylinder charge. 3rd ISH Symp., 1979.
- 86. SATO, S.; MENJU, S.; SAKAKIBARA, AOYAGI, K.; HONDA, M. Electric field calculation by charge simulation method using axi-spheroidal charges. 3rd ISH Symp., 1979.
- AKAZAKI, M.; MISHIJIMA, K.; SATO, S. Calculation of three dimensional axisymmetric fields by charges simulation method. Electrical Engineering in Japan, n. 98 pp. 1-7, 1978.
- 88. ISMAIL, H. M. Effect of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution. IEEE Transactionson Power Delivery, Outubro 2007. 2466-2472.
- 89. DOMINGUES, L. A. M. C.; FERNANDES, C.; BARBOSA, C. R. N. D. C. Cálculo de Campo Elétrico pelo Método de Simulação de Cargas. DTI/ACET, 1995.
- 90. DESCHAMPS, F.; PÉZARD, J.; CAPRA, D.; CONTI, R.; CROTTI, G.; DOVAN, T.; HOEFFELMAN, J.; KOREMAN, K.; MIZUNO, Y.; RENEW, D.; YOMORI, H.;

YOSHINAGA, J.; ZUCCA, M. Technical guide for measurement of low frequency electric and magnetic fields near overhead power lines., Electra, 243, n. pp. 22-39, 2000.

- ANDRADE, V. H. G.; OLIVEIRA, P. R. G.; GOMES, F. S. Medições de Campos Elétrico e Magnético nas Linhas de Transmissão de Furnas. (333/02, 341/02, 465/02, 467/02, 469/02, 473/02, 475/02, 479/02).
- 92. ANDRADE, V. H. G.; OLIVEIRA, P. R. G.; GOMES, F. S. Medições de Campos Elétrico e Magnético na Linha Adrianópolis - Jaragué I de Furnas. (285/02).
- ANDRADE, V. H. G.; OLIVEIRA, P. R. G.; GOMES, F. S. Medições de Campos Elétrico e Magnético na Linha Santa Cruz. (007/02).
- 94. NSA. Consultoria e Informática Ltda Consultoria Técnica Especializada em Eng. Elétrica. http://www.nsaconsultoria.com.br. Últimoacesso 09/06/2011.
- ABDEL-SALAM, M.; AL-SHEHRI, A. Induced voltages on fence wires and pipelines by AC power transmission lines. IEEE - Transactions on Industry Aplications, 30, 1994.
- 96. BERG, G. J. Measurement of electrostatic potential due to overhead high voltage lines. Intern. J. Elect. Eng. Education, 9, 1971.341-344.
- 97. CIGRÉ. Guide on the influence of high voltage AC power systems on metelic pipelines. WorkingGroup, 1995.
- 98. BARAÚNA, D. M. 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.
- 99. REILLY, J. P. Electric filed induction on sailboats and vertical poles. IEEE-Transaction on Power App. and Syst, PAS-97, 1978.1373-1383.
- REILLY, J. P. Electric field induction on longs objects A methodology for transmission line impact studies. IEEE - Transactions on Power App. and Syst., 1979. 1841--1852.
- DAWALIBI, F. P.; SOUTHEY, R. D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines II - Parametric analysis. IEEE- Transaction on Power Delivery,n°1, 1990.415-421.
- 102. BONDS, R. W. The Effect of Overhead AC Power Lines Paralleling Ductile Iron Pipelines.DIPRA, Research and Technical Director, 1997.
- ISMAIL, H. M.; GAMMAZ, A. Electric field and right-of-way analysis of Kuwait highvoltage transmission systems. Electric Power System Research, n° 50, pp. 213-218, 1999-b.

- 104. CHRISTOFORIDES, G. C.; LABRIDES, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Inductive interference calculation on imperfect coated pipelines due to nearby faulted parallel transmission lines. Electric Power Systems Research, 139--148, 2002.
- 105. CHRISTOFORIDIS, G. C.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Inductive Interference on pipelines Buried in Multilayer Soil Due to Magnetic Fields from Nearby Faulted Power lines. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Maio 2005.254-262.
- 106. SHEWEHDI, M. H.; JOHAR, U. M. Transmission line EMF interference with buried pipeline: Essential e cautions. Proceedings of the internacional conference on non-ionizing radiation at UNITEM(ICNIR). Electromagnetic Fields and Our Health, 2003.
- 107. COTTON, I.; KOPSIDAS, K.; ZHANG, Y. Comparison of Transient and Power Frequency-Induced Voltages on a Pipeline Parallel to an Overhead Transmission Line. IEEE Transactions on Power Delivery, Julho 2007.1706-1713.
- 108. IEEE. 80-2000. Guide for Safety in AC Substation Grounding, New York: IEEE, 2000, (IEEE Std. 80-2000).
- 109. ALIPIO, R. S. Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. (PPGMMC/CEFET-MG), Dezembro de 2008. Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder.
- 110. PEDROSA, A. G. E. Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e Permissividade de Solos Típicos com a Frequência. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla. Minas Gerais (PPGEL/UFSJ/CEFET-MG), Julho de 2010. Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder.
- 111. ALVAREZ, C. G. C. Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de. João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPGEL/UFSJ/CEFET-MG), Março de 2011. Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder.
- 112. DOMINGUES, L. A. D. M. C. et al. Mapeamento de Campos Eletromagnéticos em Linhas do Sistema de Transmissão de Furnas (138kV-765kV). XVII SNPTEE, 19 a 24 Outubro 2003.
- 113. VISACRO S. F. Aterramentos elétricos, Artliber, São Paulo, 2002.