

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/ÊNFASE
ELETROTÉCNICA**

**HUGO SCHELLER DE MOURA
LEONARDO HÉCTOR PEÇANHA SCIME**

**ESTUDO DAS INTERAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS ENTRE
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO E DUTOS DE
TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS ENTERRADOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2012

HUGO SCHELLER DE MOURA
LEONARDO HÉCTOR PEÇANHA SCIME

**ESTUDO DAS INTERAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS ENTRE
LINHAS DE TRANSMISSÃO DE ALTA TENSÃO E DUTOS DE
TRANSPORTE DE HIDROCARBONETOS ENTERRADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de TCC-2, do curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase em Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador : Prof. Antonio Carlos Pinho,
Dr.

CURITIBA
2012

Hugo Scheller de Moura
Leonardo Héctor Peçanha Scime

Estudo das Interações Eletromagnéticas entre Linha de Transmissão de Alta Tensão e Dutos de Transporte de Hidrocarbonetos Enterrados

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 01 de outubro de 2012.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Coordenador dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Antonio Carlos Pinho, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Fernando Colla, Eng.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Maria de Fátima R. R. Cabreira, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

MOURA, Hugo Scheller; SCIME, Leonardo Héctor Peçanha. Estudo das interações eletromagnéticas entre linhas de transmissão de alta tensão e dutos de transporte de hidrocarbonetos enterrados. 2012. f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Grandes objetos metálicos, como oleodutos, nas proximidades de linhas de transmissão de alta tensão sofrem indução eletromagnética pelas interações dos campos eletromagnéticos das linhas carregadas. Verifica-se que as tensões e correntes induzidas no oleoduto podem ser causadoras de condições não previstas no projeto original do oleoduto. Através de um modelo computacional, foi reproduzido o acoplamento capacitivo e indutivo entre oleoduto e linha de transmissão, usando-se respectivamente o método de simulação de cargas e equação de Carson-Clem, para simular diversas situações de um sistema onde a linha de transmissão está em regime permanente. Foram simulados, ainda, estruturas com cabos aterrados para a mitigação do efeito através de blindagem elétrica.

Palavras-chave: Oleodutos Metálicos. Linhas de Transmissão. Campo Elétrico. Acoplamento Eletromagnético.

ABSTRACT

MOURA, Hugo Scheller; SCIME, Leonardo Héctor Peçanha. Study of eletromagnetic interactions between high-voltage transmission lines and buried pipelines transporting hydrocarbons. 2012. f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrotécnica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Large metal objects such as pipelines, near transmission lines suffer from high voltage electromagnetic induction by the interactions of charged electromagnetic field line. There are voltages and currents induced in the pipeline which can cause conditions not foreseen in the original design of the pipeline. Through a computational model was reproduced the capacitive and inductive coupling between pipeline and transmission line, respectively using the method of simulated loads and Carson-Clem equation, to simulate the results in various situations of a system where the line transmission is at steady state. Were simulated, yet, grounded cables structures for the mitigation of the effects by electrical shielding.

Keywords: Metallic Pipelines. Transmission Lines. Electric Field. Electromagnetic coupling.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
AT	- Alta Tensão
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
CPFL	- Companhia Paulista de Força e Luz
DIPRA	- <i>Ductile Iron Pipe Research Association</i> - Associação de Pesquisa em Dutos de Ferro Fundido
EPRI	- <i>Electric Power Research Institute</i> – Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica
LT	- Linha de Transmissão
FEM	- <i>Finite Element Method</i> - Método dos Elementos Finitos
FDM	- <i>Finite Difference Method</i> - Método das Diferenças Finitas
MCM	- <i>Monte Carlo Method</i> - Método de Monte Carlo
MI	- <i>Method of Images</i> - Método das Imagens
CSM	- <i>Charge Simulation Method</i> - Método de Simulação de Cargas
SCSM	- <i>Surface Charge Simulation Method</i> - Método de Simulação de Cargas de Superfície
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	- Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
ONS	- Operador Nacional do Sistema
SIN	- Sistema Interligado Nacional

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil	10
Figura 2	- Duto paralelo à uma linha de transmissão	11
Figura 3	- Corrosão em duto devido corrente alternada de linha de transmissão próxima	12
Figura 4	- Tensões induzidas em dutos metálicos podem provocar riscos elétricos para pessoas em contato com o duto	13
Figura 5	- Contribuição do campo elétrico de um circuito trifásico no potencial de um duto metálico.	17
Figura 6	- Distribuição de 3 cargas pontuais em relação a um ponto C_i	19
Figura 7	- Distribuição de campo elétrico de um dipolo.	20
Figura 8	- Sistema de cargas com plano condutor e sistema de cargas imagens em substituição do plano condutor	21
Figura 9	- Distribuição de linhas de campo elétrico e reflexão na interface dos dieletricos	22
Figura 10	- Distribuição geométrica do sistema em análise para o exemplo de aplicação do método de simulação de cargas.	23
Figura 11	- Distribuição geométrica do sistema em análise com a distribuição das cargas imagens	25
Figura 12	- Indução magnética em um duto metálico	28
Figura 13	- Campo magnético e corrente em uma espira	29
Figura 14	- Exemplo da zona de influência da linha de transmissão no duto	30
Figura 15	- Circuito equivalente de parte da seção paralela do duto	31
Figura 16	- Unidade de locação de classe	35
Figura 17	- Causas de incidentes com gasodutos	38
Figura 18	- Medição de resistividade do solo	40
Figura 19	- Linhas de transmissão no Brasil: horizonte 2012	41
Figura 20	- Principais elementos das linhas de transmissão	43
Figura 21	- Circuito simples vertical	44
Figura 22	- Circuito duplo vertical	44
Figura 23	- Circuito simples triangular	44

Figura 24	- Circuito duplo triangular	44
Figura 25	- Circuito horizontal	45
Figura 26	- Faixa de servidão	46
Figura 27	- Campo elétrico ao nível do solo devido a uma LT de 138 kV, circuito duplo	48
Figura 28	- Campo elétrico a nível do solo devido a uma LT de 138 kV, circuito duplo, ABC/ABC, simulada em MATLAB	49
Figura 29	- Campo elétrico a nível do solo devido a uma LT de 138 kV, circuito duplo, ABC/CBA, simulada em MATLAB	49
Figura 30	-Tensão induzida ao longo do oleoduto	50
Figura 31	-Tensão induzida ao longo do oleoduto, simulada em MATLAB	50
Figura 32	- Linha de circuito duplo vertical utilizado nas simulações com tensão de 230 kV	53
Figura 33	- Linha de circuito simples horizontal utilizado nas simulações com tensão de 345 kV e 550 kV	53
Figura 34	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV	56
Figura 35	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 345 kV	56
Figura 36	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 550 kV	57
Figura 37	- Perfil de corrente de curto circuito, transversal à faixa de servidão, devido ao efeito capacitivo da linha de 230 kV	58
Figura 38	- Perfil de corrente de curto circuito, transversal à faixa de servidão, devido ao efeito capacitivo da linha de 345 kV	58
Figura 39	- Perfil de corrente de curto circuito, transversal à faixa de servidão, devido ao efeito capacitivo da linha de 550 kV	59
Figura 40	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com 2 condutores por fase	60
Figura 41	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com sequência de fases ABC/ABC	61
Figura 42	- Campo elétrico transversal à faixa, na profundidade do oleoduto, para a linha de 230 kV com um condutor por fase e sequencia ABC/CBA	62
Figura 43	- Campo elétrico transversal à faixa, na profundidade do	63

oleoduto, para a linha de 230 kV com um condutor por fase e sequencia ABC/ABC

Figura 44	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um paralelismo de 1 km	64
Figura 45	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um paralelismo de 5 km	64
Figura 46	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um paralelismo de 20 km	65
Figura 47	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com corrente de fase de 200 A	66
Figura 48	-Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com corrente de fase de 1000 A	67
Figura 49	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com corrente de fase de 2000 A	67
Figura 50	- Linha de circuito duplo vertical com condutores aéreos aterrados	69
Figura 51	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um condutor aéreo aterrado 5 m abaixo da fase	70
Figura 52	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com dois condutores aéreos aterrados 5 m abaixo da fase	71
Figura 53	- Campo elétrico devido linha de 230 kV no oleoduto	71
Figura 54	- Campo elétrico devido linha de 230 kV no oleoduto, com 1 condutor abaixo de cada circuito da LT	72
Figura 55	- Corrente de curto circuito no oleoduto devido LT de 230 kV, com 2 condutores abaixo de cada circuito da LT	72
Figura 56	- Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com malha de aterramento a 5 m da linha e a 1,5 m de profundidade	74
Figura 57	- Tensão induzida pelo efeito capacitivo na seção transversal da faixa de servidão, com malha de aterramento a 5 m da linha e a 1,5m de profundidade	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Resultados para extremos de tensão e corrente no duto metálico devido acoplamento capacitivo.	59
Tabela 2	- Resultados de tensão máxima e mínima no duto, para a variação de número de condutores e ordem de fases para linha de 230 kV.	61
Tabela 3	- Tensões e correntes devido o acoplamento indutivo, para a variação do comprimento de paralelismo.	65
Tabela 4	- Resultados para a tensão induzida no oleoduto para variados valores de corrente de regime permanente.	68
Tabela 5	- Resultados para potenciais e correntes induzidos no oleoduto antes e após adição de blindagem elétrica por condutores aterrados.	73
Tabela 6	- Resultados para potenciais e correntes induzidos no oleoduto antes e após adição de blindagem elétrica por condutores aterrados.	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	- carga elétrica
C	- capacitância
V	- tensão
P_{ij}	- coeficiente de potencial para i em relação a j
ϵ_0	- permissividade elétrica do ar
ϵ_i	- permissividade elétrica do meio i
ρ_L	- distribuição linear de carga
Dip	- distância entre condutor da fase “ i ” da linha de transmissão e oleoduto metálico
H_M	- altura do condutor M ao solo
d_M	- diâmetro do condutor M
S_{MN}	- distância entre o condutor M e N
S'_{MN}	- distância entre o condutor M e a imagem do condutor N
E	- campo elétrico
B	- campo magnético
ψ	- fluxo magnético
fem	- força eletromotriz
U	- força eletromotriz por unidade de comprimento
I	- corrente elétrica
z	- impedância por unidade de comprimento
y	- admitância por unidade de comprimento
γ	- coeficiente de propagação
ρ_p	- resistividade do oleoduto
ρ	- resistividade do solo
ρ_c	- resistividade do revestimento
δ_c	- espessura do revestimento
ϵ_0	- permissividade elétrica do ar
ϵ_r	- permissividade elétrica relativa do revestimento do oleoduto
D	- diâmetro do oleoduto
μ_0	- permeabilidade magnética do ar

μ_r	- permeabilidade magnética relativa do metal do oleoduto
ω	- frequência angular da corrente alternada.
f	- frequência da corrente alternada.
j	- operador unitário complexo ($\sqrt{-1}$)
L	- comprimento do duto paralelo à linha de alta tensão
α	- espessura da parede da tubulação
p	- pressão de projeto
S_y	- tensão mínima de escoamento definida para o material
ζ	- fator de eficiência da junta
T	- fator de temperatura
L_f	- largura da faixa de servidão
λ	- soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores, em metros
b	- distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo, em metros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
1.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	10
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	11
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivo Geral	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
1.4 JUSTIFICATIVA.....	14
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
2.1. EFEITO CAPACITIVO	15
2.1.1 Método de Simulação de Cargas	18
2.1.2 Princípios Básicos	19
2.1.3 Método das Imagens.....	20
2.1.3.1 Consideração sobre o Campo Abaixo do Plano Condutor	21
2.1.4 Aplicação Do Método.....	23
2.2 EFEITO CONDUTIVO.....	26
2.3 EFEITO INDUTIVO	27
2.4 OLEODUTOS	33
2.4.1 Oleodutos no Transporte de Gás Natural	34
2.4.2 Reparos em Oleodutos e Gasodutos	37
2.4.3 Proteção Anti-Corrosiva e Resistividade do Solo	38
2.5 LINHAS DE TRANSMISSÃO	40
2.5.1 Níveis Típicos De Tensão	42
2.5.2 Linhas De Transmissão Aéreas	42
2.5.3 Configurações Geométricas das Linhas Aéreas	43
2.5.4 Faixa de Servidão	45
3 MODELO MATEMÁTICO-COMPUTACIONAL.....	47
3.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO	47
3.1.1 Efeito Capacitivo	48
3.1.2 Efeito Indutivo.....	49
3.2 CENÁRIOS DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO	51
3.2.1 Parâmetros adotados.....	51
3.2.2. Limitações Adotadas para Avaliar a Tensão e Corrente no Sistema Duto Metálico- Linha de Transmissão	54
3.2.3 Simulações.....	54
3.3 PROPOSTAS DE AÇÕES MITIGADORAS	68
3.3.1 Blindagem Elétrica Através de Condutores Aéreas Aterrados	69
3.3.2 Alteração do Material de Revestimento do Oleoduto	73
3.3.3 Inclusão de Malha de Aterramento Acima do Oleoduto	74
4 COSIDERAÇÕES FINAIS	76
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

O acentuado desenvolvimento econômico registrado no Brasil nos últimos 16 anos (1994-2010) somado ao crescimento populacional vem promovendo uma elevação ainda maior da demanda e consumo de energia elétrica. Observa-se uma evolução econômica da ordem de 63%, conforme divulgação do Banco Central do Brasil (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2011) e IBGE (IBGE, 2011). No mesmo período observa-se ainda um crescimento populacional de 24%. As elevações desses dois índices forçam o aumento do consumo de energia elétrica, o qual vem apresentando elevação da ordem de 85%, conforme índices de carga informados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, 2011) no mesmo período.

Esse cenário de prosperidade econômica força o gestor público a expandir a infraestrutura para permitir a continuidade do processo de crescimento econômico na nação. Apesar do baixo índice de investimentos neste setor nos últimos anos, conforme descrito por Soares (2010), estimativas indicam que estes investimentos devem ter elevação considerável para os próximos anos da gestão do novo governo. Segundo Lima (2010), esse crescimento é liderado por ampliações do setor de infraestrutura energética com a construção de usinas hidrelétricas como as de Santo Antonio, Jirau e Belo Monte.

Após a crise energética de 2001, a política de expansão do setor energético nacional tem sido a de implementação de unidades geradoras a base de usinas térmicas, pois possuem menor custo e prazo para implementação (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011). Com essa política verifica-se que a matriz de geração elétrica do Brasil vem se tornando mais dependente de usinas térmicas a cada ano. Tal constatação é de fácil visualização por meio do gráfico 1. Pode-se observar por meio do mesmo que a capacidade instalada de geração de energia a partir de usinas térmicas mais que dobrou na última década.

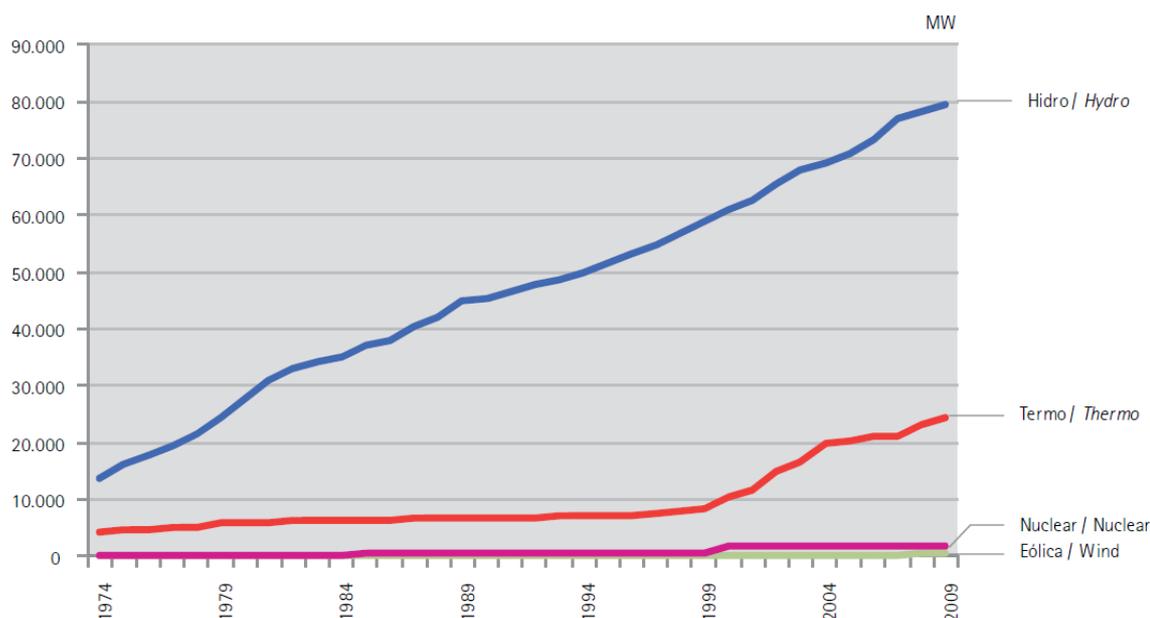


Figura 1 - Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil.
Fonte: MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2011.

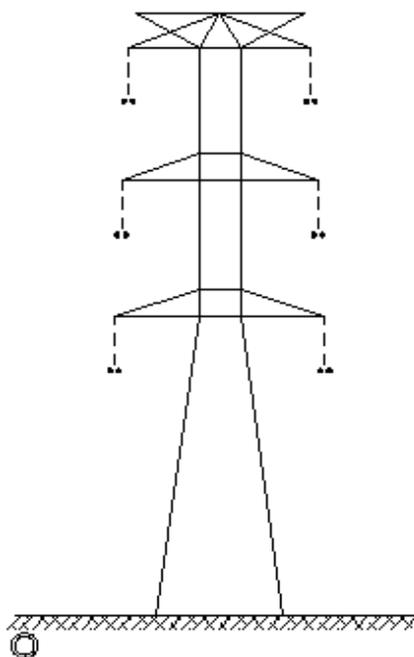
O crescimento do parque gerador é imediatamente acompanhado pelo aumento da rede básica¹ de transmissão de energia elétrica. Tanto o adensamento de linhas de transmissão quanto a necessidade de abastecimento das usinas geradoras com gás natural promovem uma condição de aproximação excessiva das linhas de transmissão de alta tensão com os oleodutos e gasodutos enterrados, que compõem a malha de distribuição de hidrocarbonetos e derivados a nível nacional. Conforme Dutra e Nunes (1999, p.159), essa aproximação pode impor certas condições aos dutos enterrados nas quais estes não foram projetados para operar, expondo o equipamento, o meio ambiente e, principalmente, a população próxima a riscos não previstos em seu projeto original.

1.1 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo em questão buscará analisar os fenômenos de interação eletromagnética existentes entre uma linha de transmissão de 230 kV ou superior e um duto de transporte de hidrocarbonetos enterrado, doravante a ser denominado de oleoduto, estando a linha em regime permanente.

¹ A ANEEL classifica, no art. 3 de sua Resolução Normativa Nº 67, como linhas de transmissão integrantes da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, as linhas com tensão nominal de operação igual ou superior a 230 kV.

O estudo tratará de oleodutos de aço, transportando hidrocarbonetos e derivados, enterrados em solo típico da região sudeste do Paraná e com trechos onde o paralelismo entre linha e oleoduto ocorra por pelo menos 1000 m, com distanciamento lateral de até 50 m da linha de transmissão. A figura 2 objetiva exemplificar a condição de estudo proposta.



**Figura 2 - Duto paralelo à uma linha de transmissão.
Fonte: Autoria própria , 2011.**

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

Conforme Dutra e Nunes (1999, p. 159), “As estruturas enterradas extensas, como tubulações, cabos de energia e de telecomunicações, apresentam elevada condutância e podem estar sujeitas às influências de linhas de alta tensão de transmissão de energia elétrica”. *O Electric Power Research Institute* (1982, p.329) afirma que: “O advento e crescimento do uso de linhas de alta tensão elevam a importância relativa aos efeitos de campo como tensões e correntes envolvidas em corpos condutores.”

Conforme previsto pelas leis do eletromagnetismo, os condutores percorridos por corrente alternada nas linhas de transmissão podem induzir correntes em objetos metálicos nas suas vizinhanças. De acordo com Dutra e Nunes (1999, p. 159), em condições normais, a magnitude das correntes induzidas é pequena, mas quando um curto-circuito ocorre na linha de alta tensão, até que a proteção atue levará alguns ciclos,

período onde haverá um forte desequilíbrio do campo magnético, ocasionando intensa indução sobre as estruturas enterradas.

A magnitude destas correntes induzidas provenientes de defeitos em linhas de alta tensão, depende das características de projeto da linha de transmissão, das características da estrutura enterrada, da resistividade do solo e seu cálculo envolve conhecimentos especializados na área de engenharia eletrotécnica.

Considera-se que os oleodutos são equipamentos que não foram projetados para operar com tensão ou corrente elétrica em sua superfície metálica. Fenômenos dessa natureza expõem o equipamento, o meio ambiente e população próxima a riscos não previstos em seu projeto original. Se as tensões e correntes induzidas no duto pela linha forem suficientes, pode ocorrer centelhamento na tubulação, mesmo que de baixa energia, porém com capacidade para promover a inflamação do hidrocarboneto gerando uma explosão (DUTRA ; NUNES 1999, p. 160).

A proximidade de linhas de alta tensão e tubulações metálicas também proporciona problemas de segurança para pessoas, que de alguma forma possam entrar em contato com a tubulação. É possível que seja necessário às equipes de manutenção, a utilização de botas e luvas isolantes.

A influência da linha de transmissão também afeta a proteção anti-corrosiva da tubulação devido às tensões e correntes induzidas na mesma, tornando-se essencial o estudo desse efeito para o projeto de um sistema de proteção catódica por corrente impressa eficiente.

A figura 3 mostra um exemplo de danos por corrosão devido correntes alternadas induzidas por uma linha de transmissão. A figura 4 exemplifica os riscos às pessoas em contato com o duto metálico.



**Figura 3 - Corrosão em duto devido corrente alternada de linha de transmissão próxima.
Fonte: North American Pipeline, 2009.**

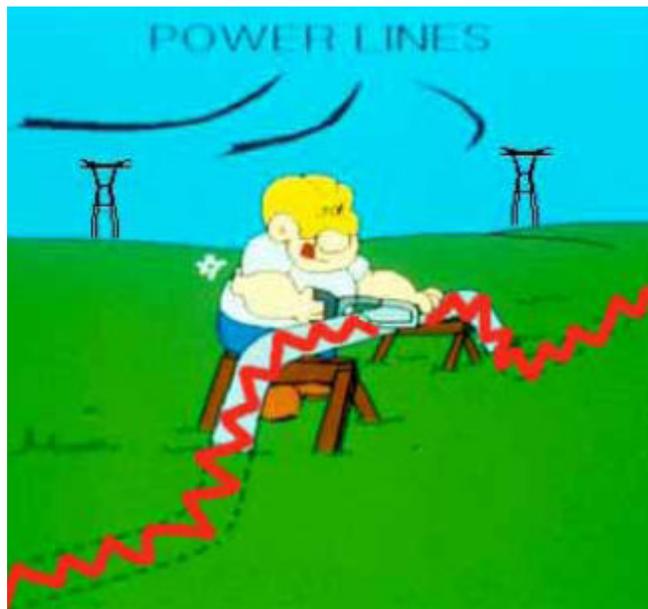


Figura 4 - Tensões induzidas no duto metálico podem provocar riscos elétricos à pessoas em contato com o duto.

Fonte: NACE International, 2005.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é simular via computador os efeitos devido ao campo eletromagnético de uma linha de alta tensão, 230 kV ou superior, em um oleoduto metálico enterrado e paralelo à uma linha de transmissão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- obter fundamentação teórica adequada ao estudo do problema.
- Buscar modelos matemáticos para o sistema composto pela linha de transmissão e oleoduto.
- implementar computacionalmente o equacionamento matemático.
- analisar os efeitos eletromagnéticos do compartilhamento da faixa de servidão pela linha de transmissão e pelo oleoduto.
- avaliar a necessidade de se considerar as correntes induzidas por uma linha de AT no projeto de um duto metálico enterrado, nas condições delimitadas por esse estudo, e propor medidas de prevenção de problemas relacionados as tensões induzidas em dutos metálicos.

- proposição de soluções que viabilizem o compartilhamento da faixa de servidão.

1.4 JUSTIFICATIVA

Conforme caracterizado na introdução, as necessidades de transporte de derivados de petróleo e de novas linhas de transmissão tendem a tornar cada vez mais comum a proximidade física destes dois sistemas: oleodutos metálicos e linhas de transmissão.

Das leis do eletromagnetismo, resulta que o campo elétrico e o campo magnético decorrentes de uma linha de transmissão, podem atravessar ar e terra, e induzir correntes e tensões na tubulação de aço enterrada de um oleoduto. A situação pode representar riscos para o funcionamento do duto, o sistemas de proteção anti-corrosiva, ou até mesmo para vidas humanas dependendo da intensidade na qual esse efeito se manifeste.

Durante um estudo preliminar, não foram detectados trabalhos com o tema proposto e aqui delimitado, no entanto, é de interesse das concessionárias do setor energético, dos poderes públicos e da sociedade, que a transmissão de energia elétrica e o transporte de insumos energéticos ocorra sem prejuízo à segurança, eficiência e economia. Espera-se que o estudo aqui proposto possa servir de referencial futuro à análise das condições de implantação de oleodutos nas proximidades de linhas de transmissão em condições de paralelismo físico entre estes dois sistemas.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O trabalho teve início com pesquisa de casos e estudos já realizados sobre o tema utilizando-se de pesquisa a bibliotecas on-line, normas e revistas técnicas.

A pesquisa foi baseada em conhecimentos teóricos já estabelecidos e consolidados em livros, artigos, teses e demais fontes de conceitos teóricos envolvendo linhas de transmissão, eletromagnetismo e oleodutos.

Após a construção de um referencial teórico adequado, obteve-se o modelo matemático apropriado para o sistema linha de transmissão e oleoduto.

A partir de então, por meio da utilização de processamento numérico computacional através do software MATLAB 2010 b, reproduziu-se o modelo

matemático na finalidade de obter resultados para situações próximas das encontradas em sistemas reais.

A seguir, simulações foram realizadas objetivando a análise e validação dos resultados. Diante disso, a pesquisa será bibliográfica e experimental (PÁDUA, 2007).

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O resultado da pesquisa será exposto em cinco capítulos distribuídos da seguinte maneira:

Capítulo 1 – Capítulo introdutório, onde são apresentados os problemas e premissas, objetivos do trabalho, justificativa teórica, procedimentos metodológicos e esta estrutura.

Capítulo 2 – Capítulo de fundamentação teórica. Neste serão apresentadas as principais bases teóricas utilizadas para as análises do estudo, tais como os efeitos eletromagnéticos estudados, linhas de transmissão e oleodutos.

Capítulo 3 – Nesta seção será apresentado o modelamento matemático implementado, uma validação do modelo de forma comparativa com outras bibliografias, os parâmetros de simulações realizadas e os casos simulados.

Capítulo 4 – São as considerações finais sobre as análises dos resultados obtidos em simulações e os objetivos propostos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme DIPRA (1999, p.2) tensões induzidas em um duto metálico por uma linha de transmissão, paralela e nas proximidades do duto, podem ocorrer por efeitos capacitivos, condutivos e indutivos. O modelamento e análise desses efeitos são o foco desse estudo, de tal forma que estes serão abordados detalhadamente nas seções a seguir.

2.1. EFEITO CAPACITIVO

Considera-se um capacitor todo par de condutores separados por um dielétrico, onde pelo menos um destes estiver carregado de forma a propiciar um campo elétrico entre eles (JOHNK, 1988). A indução eletrostática desse sistema promove um

acúmulo de cargas de polaridades contrárias nas superfícies dos condutores, armazenando assim certa quantidade de energia. Esse acúmulo de energia é o trabalho necessário para promover o deslocamento das cargas nos condutores. A razão entre essa quantidade de carga e a diferença de potencial entre os condutores é a constante chamada de capacitância (HAYT, 1983). Ou seja:

$$Q = CV \quad (1)$$

onde:

- Q é a quantidade de carga elétrica;
- C a capacitância ;
- V a diferença de potencial entre os condutores.

Quando considerado o sistema em estudo, ou seja, uma linha de transmissão e um oleoduto enterrado, verifica-se a aplicação da teoria sobre capacitores em um sistema físico real. “Esta é uma forma de acoplamento capacitivo atuando através da capacitância entre uma linha de transmissão CA e um duto, em série com a capacitância entre o duto e a terra adjacente.” (DIPRA, 1999, p.2).

Conforme Swedi e Johar (2003) a interferência capacitiva ocorre quando o duto possui uma boa isolamento em relação à terra. O duto recebe um potencial relativo ao solo que é proporcional a tensão nas linhas de transmissão.

A figura 5 ilustra as diferentes distâncias entre as fases na linha de transmissão e o duto a ela paralelo. Os potenciais induzidos no duto metálico devido a contribuição de cada fase devem ter módulo diferente, afinal a soma dos vetores de campo elétrico no ponto do espaço onde se encontra o duto é diferente de zero, mesmo para uma linha com tensões equilibradas (onde o vetor soma das tensões seja nulo).

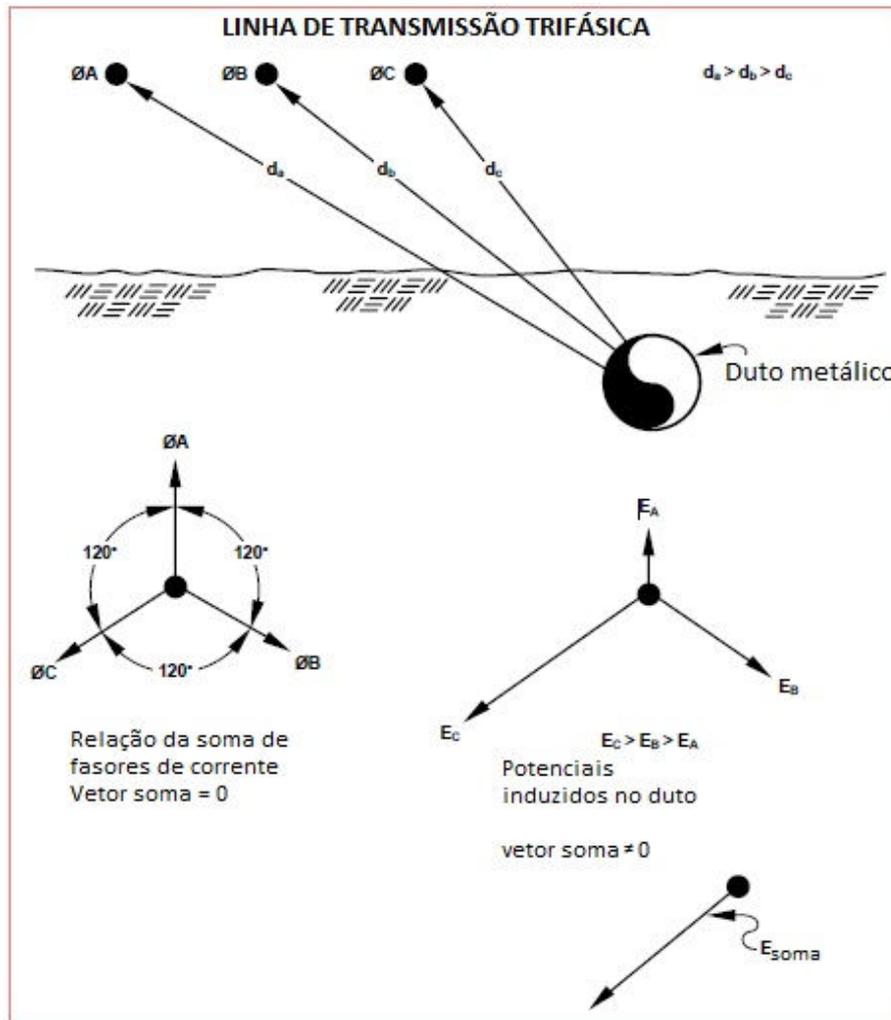


Figura 5 - Contribuição do campo elétrico de um circuito trifásico no potencial de um duto metálico.

Fonte: adaptado de DIPRA, 1999

A modelagem matemática de sistemas físicos é de grande importância para a otimização da engenharia do sistema em estudo. Se considerado como exemplo uma linha de transmissão de alta tensão, para a elaboração de um projeto seguro e otimizado do ponto de vista elétrico e econômico, é estritamente necessário o conhecimento total da distribuição de campos elétricos e magnéticos (MALIK, 1989). No entanto, a solução analítica de modelos de sistemas físicos reais se mostra demasiadamente complicada, quando não impossível, devido a grande complexidade de tais sistemas, (EPRI, 2005), (CLAYTON, 1997) e (MALIK, 1989).

Para o cálculo do campo elétrico produzido por uma linha de transmissão de alta tensão, assim como para outros sistemas, é necessário a solução das equações de Laplace e Poisson com a adoção de soluções de contorno especiais (JOHNK, 1988). Em casos de modelagem de sistemas complexos, onde a solução analítica das equações de

Laplace e Poisson são dificultadas conforme descrito anteriormente, a adoção de solução por métodos numéricos normalmente pode ser implementada.

Segundo Malik (1989), os principais métodos numéricos, ou seja com melhor aceitação acadêmica e melhor precisão, encontrados na literatura são:

- Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method* – FEM)
- Método das Diferenças Finitas (*Finite Difference Method* – FDM)
- Método de Monte Carlo (*Monte Carlo Method* – MCM)
- Método das Imagens (*Method of Images* – MI)
- Método de Simulação de Cargas (*Charge Simulation Method* – CSM)
- Método de Simulação de Cargas de Superfície (*Surface Charge Simulation Method* – SCSM)

No presente estudo será aplicado o método de simulação de cargas, por conveniência às ferramentas computacionais disponíveis e disponibilidade de referencial teórico.

2.1.1 Método de Simulação de Cargas

O Método de Simulação de Cargas, ou “*Charge Simulation Method*” (CSM), é um método que consiste da “solução de uma quantidade relativamente pequena de equações lineares, em um tempo computacional curto, quando comparado, por exemplo, com a técnica numérica de elementos finitos” (SANTOS, et al., 2010, p. 102).

No método de simulação de cargas, o campo elétrico é simulado por um sistema de distribuição de cargas discretas, ou fictícias, posicionadas fora da região de cálculo. Essa distribuição de cargas discretas é a aplicação do método das imagens, o qual será melhor apresentado em 2.1.3.

No caso de uma linha de transmissão, assim como para o oleoduto enterrado, verifica-se uma simétrica cilíndrica no sistema. Portanto, as cargas reais e fictícias são substituídas por linhas infinitas de carga, com distribuição linear de carga ρ_L (C/m).

2.1.2 Princípios Básicos

Basicamente, o método de simulação de cargas consiste na aplicação do princípio da superposição, que é a soma das contribuições individuais de cada carga. Por tanto, se uma série de cargas, sejam elas pontuais ou lineares, por exemplo, forem colocadas em uma dada região, o campo elétrico, em qualquer ponto desta região pode ser obtido a partir da soma das contribuições individuais de cada carga, desde que este ponto não coincida com a localização de uma das cargas (MALIK, 1989). A figura 6 apresenta um exemplo de distribuição de 3 cargas pontuais em relação a um ponto C_i qualquer. As equações 2 e 3 apresentam o modelamento matemático para o cálculo do potencial, ou do campo elétrico, no ponto C_i do sistema proposto na figura 6 (MALIK, 1989).

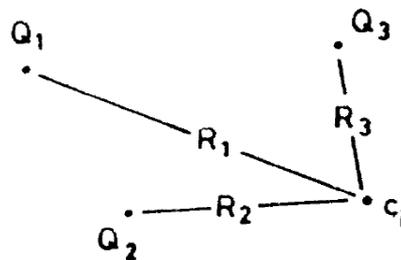


Figura 6 - Distribuição de 3 cargas pontuais em relação a um ponto C_i .
Fonte: Malik, Nazar H. (1989).

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} Q_j \quad (2)$$

$$V_i = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R_1} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 R_2} + \frac{Q_3}{4\pi\epsilon_0 R_3} = P_{i1} Q_1 + P_{i2} Q_2 + P_{i3} Q_3 \quad (3)$$

Nas equações acima, o termo P_{ij} é chamado de “coeficiente de potencial” e pode ser obtido a partir da solução analítica das equações de Laplace e Poisson para diversos tipos de cargas.

Uma vez conhecidos os tipos de cargas, suas localizações e seus valores, ou seja conhecendo as condições de contorno, é possível relacionar o potencial (V_i) com a carga (Q_i), através do seguinte sistema matricial (MALIK, 1989):

$$\begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.1.3 Método das Imagens

Quanto a aplicação do método de simulação de cargas para um sistema composto por uma carga linear Q , de densidade superficial de carga ρ_L (C/m), e um plano condutor infinito, o uso de cargas imagens seguindo, os princípios do método das imagens, é necessário.

O sistema descrito no parágrafo anterior é a descrição do modelo de uma linha de transmissão e o solo sob a mesma. Portanto, para a análise do campo elétrico nas vizinhanças de uma linha de transmissão de alta tensão, o método de simulação de cargas pode ser aplicado, com a complementação do método das imagens.

Segundo Hayt (1983), em todo dipolo existe um plano equipotencial onde se verifica um potencial $V=0$, plano este que se encontra a meia distância das cargas constituintes do dipolo. Esse plano pode ser representado como um plano de espessura desprezível e infinito nas demais dimensões. Por tanto, se substituído o dipolo por uma única carga e um plano condutor infinito verifica-se que o campo elétrico acima da superfície do plano não se altera em comparação a distribuição de campo no dipolo. A figura 7 exemplifica a distribuição de campo do dipolo e da carga e plano condutor.

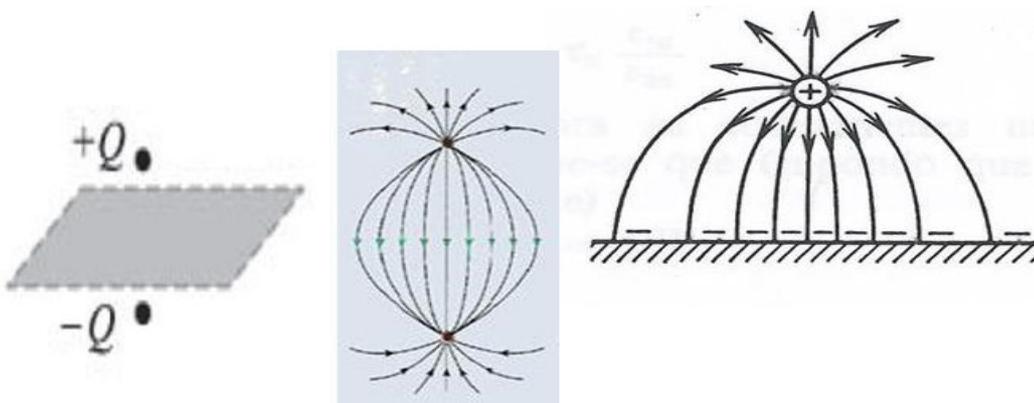


Figura 7 - Distribuição de campo elétrico de um dipolo.
Fonte: Adaptado de Hayt e Bessonov (1983).

O método das imagens consiste no processo inverso da análise do dipolo, ou seja, na substituição do plano condutor infinito por uma carga simétrica, em carga e posição, em relação a carga real. Esta carga fictícia garante uma distribuição das linhas de campo exatamente igual ao que se verificaria com a presença do plano condutor

infinito. A linearidade do sistema permite que qualquer conjunto de cargas pode ser modelado de forma simétrica a fim de eliminar o plano condutor e, em muitos casos, facilitar a solução da análise do campo. A figura 8 apresenta o modelamento simétrico proposto (HAYT, 1983).

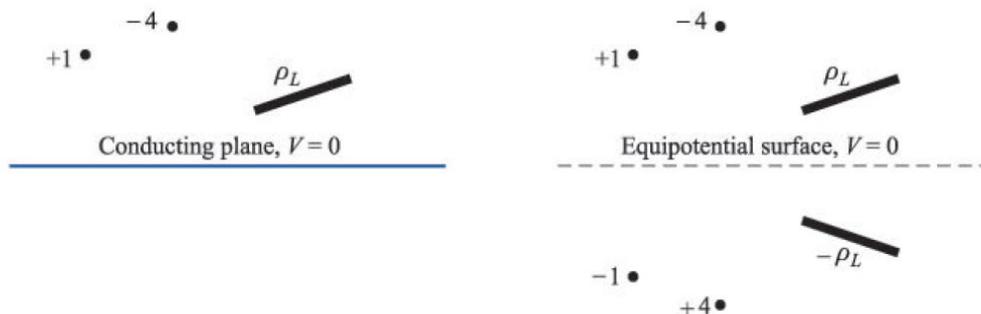


Figura 8 - Sistema de cargas com plano condutor e sistema de cargas imagens em substituição do plano condutor.
 Fonte: Hayt, 1983.

É importante observar que apesar do método das imagens “eliminar” a região de interface entre dois meios, ar-solo por exemplo, por um único meio, a área de cálculo computável para o campo elétrico é a região acima da superfície equipotencial onde $V=0$, ou seja, acima do plano condutor original. O método possuiu solução para região abaixo do plano condutor, no entanto ajustes precisam ser implementados, como por exemplo, a inclusão de novas cargas fictícias, conforme será descrito no próximo item.

2.1.3.1 Consideração sobre o Campo Abaixo do Plano Condutor

Quando se faz necessário a análise do campo elétrico em um sistema com mais de um meio dielétrico, o campo se torna mais complexo, assim como seu cálculo (MALIK, 1989). No entanto, o método de simulação de cargas, associado ao método das imagens, pode ser adaptado para considerar as condições de contorno e permitir a solução das equações de Laplace e Poisson, semelhante ao realizado anteriormente (EPRI, 2005).

A literatura apresenta meios, genéricos e simplificados, para o cálculo de campos elétricos de sistemas com multi-dieletricos. Malik (1989) e Singer (1973) apresentam modelamentos completos para superfícies genéricas de interface entre os

dielétricos. Já Bessonov (2000) apresenta uma formulação simplificada para meios que apresentam geometria e simetria mais simples. Um exemplo de sistema proposto é o de uma carga pontual próxima a um plano condutor, ou seja, a terra (BESSONOV, 2000). Percebe-se que esse sistema é equivalente ao caso proposto no presente estudo, exceto pela presença da distribuição linear de carga que representa a linha de transmissão. Esta formulação é a que será adotada para este estudo.

Bessonov (2000) demonstra que para ser possível calcular o campo elétrico abaixo do plano condutor é necessário a adoção de um sistema de duas cargas imagens, Q_2 e Q_3 . A razão da carga imagem adicional é que para o cálculo acima do plano condutor “somente uma condição de contorno ($E_t = 0$) tinha de ser satisfeita e isto podia ser feito com uma carga imagem (BESSONOV, 2000, p. 618).” Ou seja, não há componente tangencial do campo pois este se distribui de forma normal ao plano. No entanto, a mudança de dielétricos promove uma refração no campo distorcendo-o, ao ponto que passa a existir uma componente tangencial na distribuição do campo (HAYT, 1983), conforme exemplificado na figura 9.

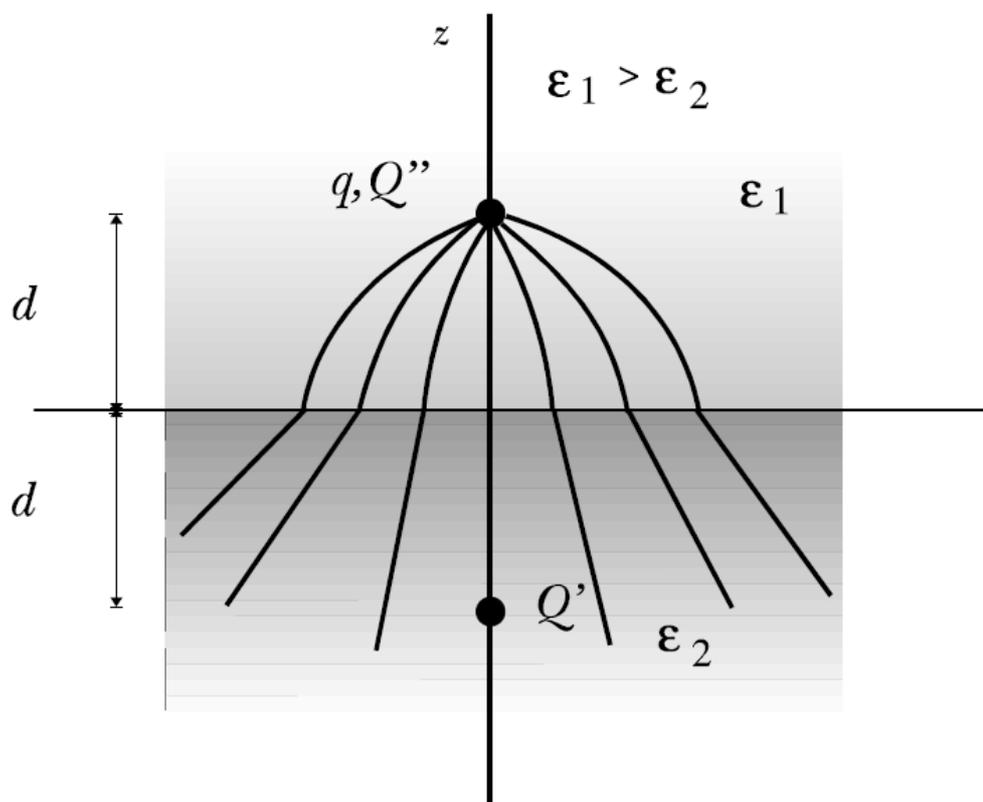


Figura 9 - Distribuição de linhas de campo elétrico e reflexão na interface dos dielétricos.
Fonte: PPGEE-UFPE, 2011.

A segunda carga imagem, proposta por Bessonov (2000), é utilizada para calcular a distribuição do campo em qualquer ponto do semi-plano inferior. A carga adicional Q_3 é considerada no mesmo ponto da carga real e seu módulo é calculado em função da relação dos valores de permissividade dos meios, conforme equação (5), abaixo:

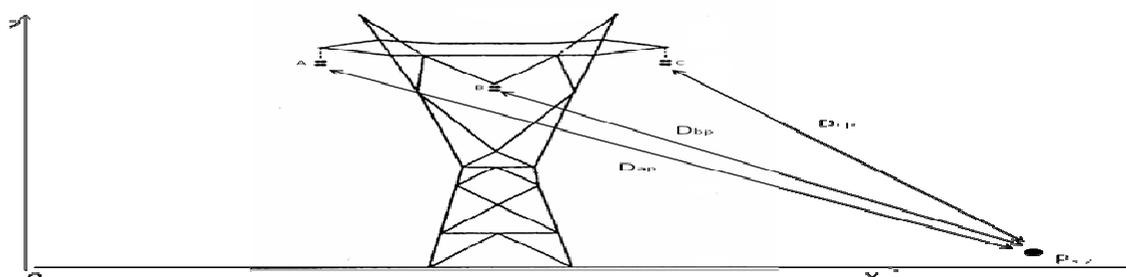
$$Q_3 = Q_1 \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (5)$$

Cabe ressaltar que Q_1 é obtido normalmente pela aplicação do método de simulação de cargas apresentado anteriormente. Uma vez conhecido Q_3 a distribuição de campo elétrico pode ser obtida pelas formulações que serão apresentadas adiante neste texto, fazendo a ressalva que nestas será aplicado o valor de permissividade do meio abaixo do plano condutor, que é ε_2 .

2.1.4 Aplicação do Método

Conforme Malik (1989), o método de simulação de cargas é perfeitamente adequado para a análise da distribuição de campos elétricos nas vizinhanças de uma linha de transmissão de alta tensão.

Visando uma apresentação do método de cálculo, faz-se uma análise do módulo do campo elétrico, em um dado ponto P, gerado por uma linha de transmissão trifásica, com distribuição de fases plana, operando em regime permanente. A figura 10 apresenta uma representação geométrica do sistema em análise.



**Figura 10 - Distribuição geométrica do sistema em análise para o exemplo de aplicação do método de simulação de cargas.
Fonte: Autoria própria, 2011.**

Primeiramente, é necessário conhecer a distribuição geométrica, coordenada XZ, dos elementos do sistema. Ou seja, a posição de cada condutor fase e do ponto de interesse, considerando que ao longo da linha de transmissão as distâncias entre os cabos de fase e o oleoduto se mantenham constantes. Os outros dados, como tensão de fase de cada condutor, permissividade relativa do meio, ou seja o ar ($\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) e geometria dos condutores, também, devem ser conhecidos. Estes dados são as condições de contorno para elaboração das matrizes P e V do método de simulação de cargas.

Calcula-se a matriz [P], que é a matriz de coeficientes de potencial de Maxwell. Para um sistema com simetria cilíndrica, como o de uma linha de transmissão com condutores paralelos, os elementos da matriz [P] são definidos conforme as equações 6 e 7 (EPRI, 2005).

$$P_{MM} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{4H_M}{d_M}\right) \quad (6)$$

$$P_{MN} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln\left(\frac{S'_{MN}}{S_{MN}}\right) \quad (7)$$

onde:

- P_{MM} – coeficiente de potencial relativo ao condutor M;
- P_{MN} – coeficiente de potencial mútuo entre os condutores M e N;
- H_M – altura do condutor M;
- d_M – diâmetro do condutor M;
- S_{MN} – distância entre os condutores M e N;
- S'_{MN} – distância entre o condutor M e a imagem do condutor N.

A configuração final da matriz [P] se mostra como uma matriz quadrada de ordem igual ao número de condutores no sistema. Neste caso, uma matriz 3x3.

É importante destacar que no cálculo de S'_{MN} deve ser considerado o método das imagens, que neste caso pode ser aproximado pelo método das imagens ideais conforme descrito na seção 2.1.3. A distribuição das cargas imagens segundo esse critério resulta em um sistema como o da figura 11.

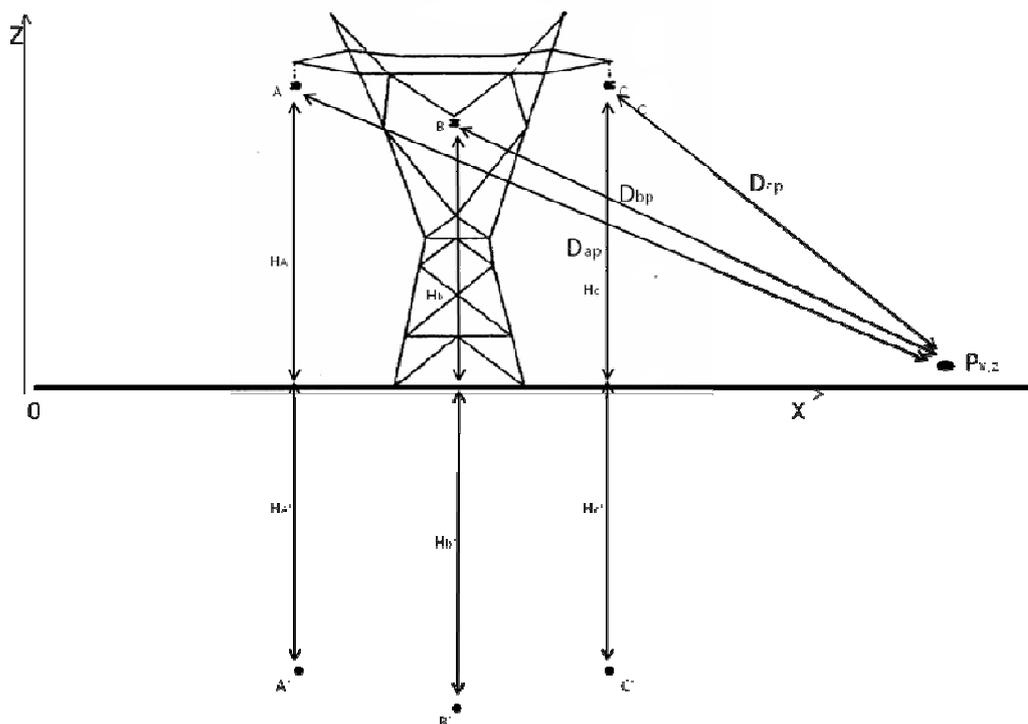


Figura 11 - Distribuição geométrica do sistema em análise com a distribuição das cargas imagens.

Fonte: Autoria própria, 2011.

O cálculo da matriz de tensões $[V]$ é relativamente simples, devendo-se atentar para o fato de se tratar de fasores, ou seja, números complexos com parte real e imaginária, e os módulos são as tensões de fase. A configuração dessa matriz é a de uma coluna, devendo ser respeitada a mesma distribuição adotada na matriz de coeficientes de potencial $[P]$.

De posse das matrizes $[P]$ e $[V]$, é possível montar a equação matricial $[V]=[P] \times [Q]$, ou $[Q]=[P]^{-1} \times [V]$. A solução dessa equação é uma matriz de distribuição linear de cargas que permite calcular o campo elétrico no ponto de interesse. Cada condutor contribui com o campo elétrico total, de forma que o seu cálculo é o resultado da soma das diferentes parcelas, ou seja, é a aplicação do método da superposição (EPRI, 2005).

Segundo Clayton (1997) e EPRI (2005), da Lei de Gauss em coordenadas cartesianas e o método da superposição, resultam a formulação abaixo para o cálculo do campo elétrico no ponto de interesse:

$$E_{XK} = \frac{Q_K}{2\pi\epsilon} \left[\frac{X_P}{X_P^2 + (Z_K - H_P)^2} - \frac{X_P}{X_P^2 + (Z_K + Z_P)^2} \right] \quad (8)$$

$$E_{YK} = \frac{Q_K}{2\pi\epsilon} \left[\frac{Z_P - Z_K}{X_P^2 + (Z_K - Z_P)^2} - \frac{Z_P + Z_K}{X_P^2 + (Z_K + Z_P)^2} \right] \quad (9)$$

$$E_X = \sum_1^K E_{XK} \quad (10)$$

$$E_Y = \sum_1^K E_{YK} \quad (11)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{E_X^2 + E_Y^2} \quad (12)$$

Alem do campo elétrico o potencial no ponto pode ser também calculado.

$$V_{SP} = \sum_1^K \frac{Q_K}{2\pi\epsilon} \ln \frac{S_K}{S'_K} \quad (13)$$

onde:

- x – indica as componentes horizontais do campo elétrico;
- y – indica as componentes verticais do campo elétrico;
- k – representa cada uma das k cargas que contribuem em campo elétrico.

2.2 EFEITO CONDUTIVO

Problemas envolvendo condutância podem ocorrer durante a construção e também após a instalação. A condução elétrica pode ser causada por contato direto ou falta a terra.

Se um contato acidental acontecer entre o condutor CA e o duto metálico, o duto deve elevar seu potencial até o potencial do condutor até que a linha de corrente alternada seja desenergizada.

Felizmente, este tipo de contato direto é muito raro (DIPRA, 1999, p.3).

Este tipo de interferência, que na literatura também é chamada de interferência ôhmica ou resistiva, também ocorre no caso de descargas atmosféricas atingirem a estrutura de transmissão próxima ao oleoduto (SWEDI; JOHAR, 2003, p.4).

Como a impedância de falta a terra é bastante baixa, a corrente de falta cria gradientes de potencial no solo em direção radial à entrada da corrente de falta. O

potencial no duto será limitado, além da resistividade do solo, pela isolação de seu revestimento.

“Portanto, a terra ao redor do duto estará em um potencial relativamente elevado em relação ao potencial do duto. Isto pode resultar em danos ao duto metálico ou ao seu revestimento” (DIPRA, 1999 p.3).

“Qualquer um que tocar na tubulação fora do cone de tensão poderá receber um choque devido o potencial entre o tubulação e o solo circundante. Medidas de proteção para as pessoas são necessárias, se a tensão de contato exceder 65 V em interferência de longa duração, ou 1.000 V para interferência de curta duração. Estas medidas incluem uso botas de borracha, com isolamento, luvas, ou preenchimento de proteção isolado” (SWEDI; JOHAR, 2003, p.4).

2.3 EFEITO INDUTIVO

“Uma das maiores causas de indução de tensão em dutos é o fluxo de corrente nas linhas” (DIPRA, 1999, p.4).

O fluxo de corrente em um condutor cria campo magnético em volta dele. Em uma linha de transmissão de corrente alternada no sistema de potência, este fluxo variará no tempo, e pode, portanto, produzir em um condutor paralelo em suas proximidades (duto metálico), uma força eletromotriz (fem) induzida. A figura 12 exemplifica a ação do campo magnético no problema em questão.

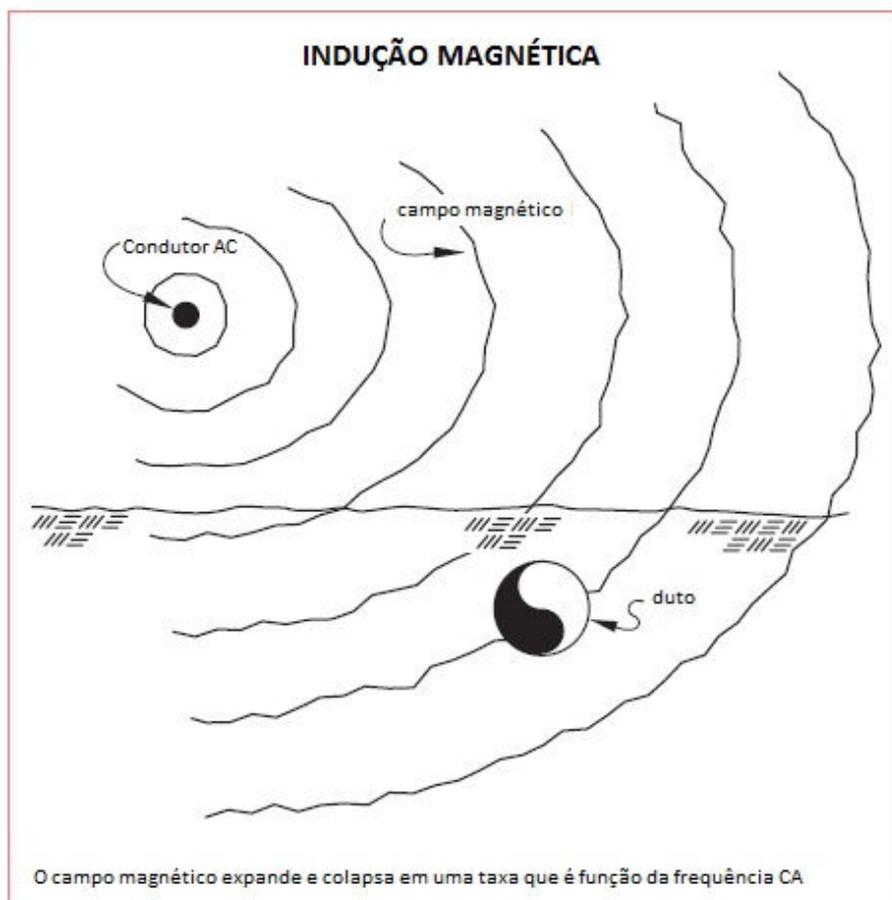


Figura 12 - indução magnética em um duto metálico
 Fonte: adaptado de DIPRA, 1999

A magnitude da tensão induzida dependerá de (DIPRA, 1999, p.5):

- geometria física da separação dos condutores e condutores do duto;
- resistência do revestimento do duto;
- resistência longitudinal do duto;
- comprimento do duto eletricamente contínuo e paralelo a linha de transmissão;
- magnitude da corrente no sistema;
- frequência do sistema elétrico de potência;
- número de fases na linha de transmissão (monofásico, ou trifásico).
- resistividade do solo;
- discontinuidades (quando o duto diverge em relação ao paralelismo com a linha de transmissão).

A probabilidade de interferência aumenta com o crescimento da corrente de operação das linhas, com o melhoria da qualidade do revestimento do gasoduto, e com o comprimento do duto metálico paralelo e próximo às linhas de alta tensão CA (SWEDI, JOHAR, 2003, p.4).

Para entender as tensões induzidas, da teoria eletromagnética, é conhecido que condutores percorridos por corrente elétrica variável no tempo podem induzir força eletromotriz.

De acordo com experimentos de Faraday, um campo magnético estático não produz fluxo de corrente, mas um campo variável no tempo produz uma tensão induzida (chamada força eletromotriz ou simplesmente fem) em circuito fechado condutivo, o que gera um fluxo de corrente (SADIKU, 2004, p.370).

A equação de Maxwell, na forma integral para esta formulação, pode ser representada por (SADIKU, 2004, p.372):

$$fem = \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = - \frac{d\psi}{dt} \quad (14)$$

onde:

E é o campo elétrico;

B o campo magnético e;

ψ o fluxo magnético (campo magnético por unidade de área).

A figura 13 exemplifica a relação geométrica entre o campo magnético e a corrente que lhe dá origem, com o caso de uma espira percorrida por uma corrente elétrica.

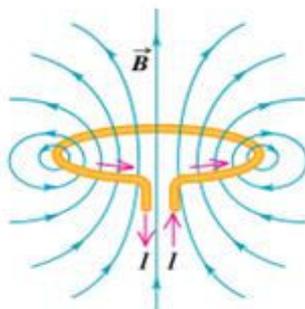


Figura 13 - Campo magnético e corrente em uma espira.
Fonte: adaptado de SADIKU, 2004.

O campo magnético tem origem na existência de cargas elétricas em movimento relativo à um referencial onde ele é percebido. Percebe-se que uma linha de transmissão de corrente alternada, proporcionará não apenas campos magnéticos em suas vizinhanças, como também uma variação de fluxo magnético nessa região, que será proporcional à frequência da corrente alternada.

Assim, é possível que uma força eletromotriz apareça na superfície de um oleoduto metálico nas proximidades de uma linha de transmissão.

Conforme Swedi e Johar (2003, p.3), os dutos de aço utilizados no transporte de gás natural, petróleo e derivados do petróleo, são revestidos por uma camada isolante (essencial para a proteger o material metálico de corrosão). Com a melhoria da isolação dos oleodutos, a proteção contra a corrosão se torna mais eficiente, todavia, os valores das tensões induzidas nos oleodutos aumenta.

Grcev (2000, p. 109) descreve que a aproximação do paralelismo entre uma linha de transmissão e um duto metálico, pode ser feita através da chamada zona de influência, conforme ilustra a figura 14. Cada seção do oleoduto é modelada por um circuito equivalente apropriado, como uma linha de transmissão com perdas, conforme ilustra a figura 15, onde z é a impedância do elemento do duto e y a admitância em relação à terra .

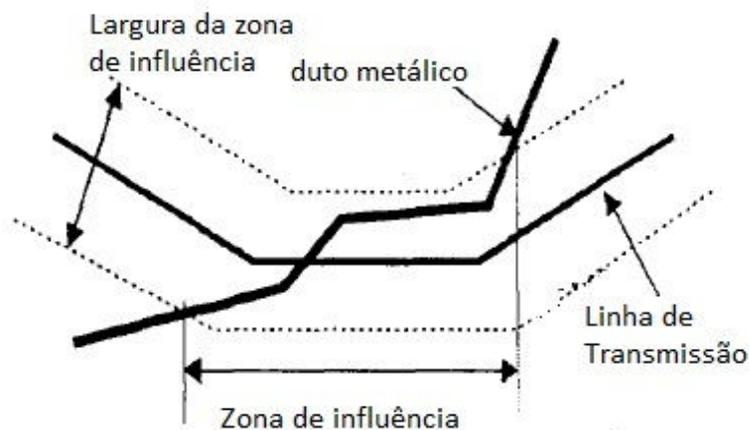


Figura 14 - Exemplo da zona de influência da linha de transmissão no duto.
 Fonte: adaptado de GRCEV, 2000, p. 109

As equações correspondentes à linha de transmissão para o circuito do oleoduto, baseado na configuração dada pela figura 15, são BORTELS (2006, p.211):

$$\frac{dV}{dx}(x) + zI(x) - U(x) = 0 \quad (15)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + yV(x) = 0 \quad (16)$$

onde:

z é a impedância por unidade de comprimento (Ω/m);

y é a admitância por unidade de comprimento ($1/\Omega.m$);

U é a fem no oleoduto metálico, por unidade de comprimento (V/m).

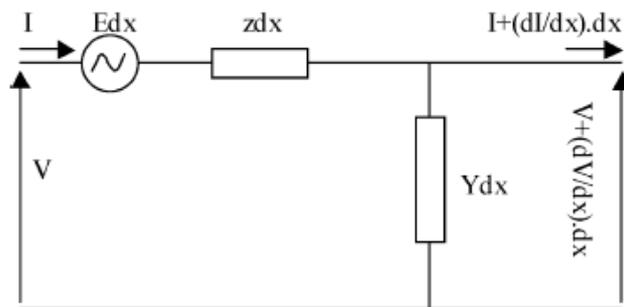


Figura 15 - Circuito equivalente de parte da seção paralela do duto.
Fonte: BORTELS, 2006, p. 211.

Derivando (15) em relação a x , em combinação com (16) tem-se:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2 V(x) - \frac{dU(x)}{dx} = 0 \quad (17)$$

Onde $\gamma = \sqrt{zy}$ é chamado de coeficiente de propagação.

Ainda, de acordo com BORTELS (2006, p.212), as expressões para y e z podem ser escritas como:

$$z = \frac{\sqrt{\rho_p \mu_0 \mu_r \omega}}{\pi \cdot D \sqrt{2}} + \frac{\mu_0}{8} + j \left\{ \frac{\sqrt{\rho_p \mu_0 \mu_r \omega}}{\pi \cdot D \sqrt{2}} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{3,7 \sqrt{\rho \omega^{-1} \mu_0^{-1}}}{D} \right\} \quad (18)$$

$$y = \frac{\pi D}{\rho_c \delta_c} + j \omega \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \pi D}{\delta_c} \quad (19)$$

Seja:

ρ_p = resistividade do oleoduto ($\Omega.m$);

μ_0 = permeabilidade magnética do ar ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m);

μ_r = permeabilidade relativa do aço do oleoduto;

D = diâmetro do oleoduto;

ρ = resistividade do solo ($\Omega.m$);

ρ_c = resistividade do revestimento ($\Omega.m$);

δ_c = espessura do revestimento (m);

ϵ_0 = permissividade elétrica do ar ($8,85.10^{-12}$ F/m);

ϵ_r = permissividade elétrica relativa do revestimento do oleoduto;

ω = frequência angular da corrente alternada. ($2\pi.60$).

Considerando que por alguns quilômetros, o duto se estende paralelo à linha de transmissão, sem ligação à terra, e que a resistividade do solo ao longo deste trecho de paralelismo seja constante, tem-se uma fem $U(x)$ induzida constante ao longo do comprimento “L” do oleoduto paralelo. Além disso, a admitância “y” e impedância “z” do duto também poderão ser consideradas constantes (BORTELS et al. 2006, p.212).

Para o circuito de linha de transmissão balanceado, as correntes nos cabos de cada uma das fases “a”, “b” e “c” são:

$$I_a = I\angle 0^\circ, I_b = I\angle -120^\circ, I_c = I\angle 120^\circ \quad (20)$$

A expressão para a fem induzida por unidade de comprimento no duto paralelo, para a linha sem cabos guardas, é dada pela fórmula de Carson-Clem (BORTELS 2006, p.212):

$$U = -jf \frac{\mu_0 I}{2} \left[\ln \frac{d_{bp} d_{cp}}{d_{ap}^2} + j\sqrt{3} \ln \frac{d_{bp}}{d_{cp}} \right] \quad (21)$$

d_{ap} , d_{bp} e d_{cp} , são respectivamente as distâncias entre o oleoduto metálico e os cabos das fases na linha de alta tensão, conforme representado anteriormente na figura 10.

Através do cálculo de (18) e (19), obtém-se o coeficiente de propagação γ . Conhecida a fem U por (21), pode-se calcular a tensão induzida ao longo do oleoduto metálico através da expressão (22), ou mesmo a corrente que nele flui pela equação

(23), conforme segue, para uma posição x no oleoduto, entre 0 e o comprimento L (BORTELS 2006, p.213):

$$V(x) = \frac{U}{2\gamma} (e^{-\gamma(L-x)} - e^{-\gamma x}) \quad (22)$$

$$I(x) = \frac{U}{2z} (2 - e^{-\gamma(L-x)} - e^{-\gamma(x)}) \quad (23)$$

onde:

$V(x)$ é a tensão induzida ao longo das coordenadas x do duto.

$I(x)$ é a corrente induzida ao longo das coordenadas x do duto.

L é o comprimento do duto.

2.4 OLEODUTOS

No tocante ao oleoduto, é importante ressaltar que este termo é reconhecido na indústria e muito utilizado na indústria de petróleo para distinguir tipos de dutos que, apesar de grande semelhança física, têm utilizações distintas. Um oleoduto, diferentemente de um oleoduto ou um gasoduto, é utilizado para transporte de diversos tipos de produtos líquidos e gasosos. Os diferentes tipos de produtos são, inclusive, transportados sem a necessidade de interrupção no fluxo. Estes são sequenciados, principalmente em função de sua densidade, e bombeados sem contaminação e perda de especificação.

Para este trabalho, serão considerados apenas oleodutos metálicos (aço), transportando hidrocarbonetos e derivados inflamáveis (que serão considerados como materiais não condutores e diamagnéticos), enterrados e com proteção anticorrosiva. Essa proteção anticorrosiva impõe que o oleoduto deve ser, apesar de enterrado, isolado do solo. Essa condição de isolamento do solo será a de principal relevância para o estudo em questão.

Os oleodutos são considerados um dos meios de transporte de hidrocarbonetos mais econômicos. Além da economia proporcionada, a utilização de oleodutos propicia maior segurança. Não obstante, devido às proporções geradas a partir de um provável acidente, a segurança na construção e manutenção do oleoduto não deve ser negligenciada (CORTELETTI, 2009, p. 1).

2.4.1 Oleodutos no Transporte de Gás Natural

No caso de transporte de gás natural são utilizados gasodutos. Estes “variam em diâmetro e pressão de acordo com o destino do gás natural” (CORTELETTI, 2009, p. 18). A pressão é a responsável pelo transporte do gás e a medida que o gás é transportado a pressão diminui. Dessa forma, fazem-se necessárias estações de compressões intervaladas ao longo do gasoduto a fim de incrementar a pressão fazendo com que o gás atinja o destino desejado (CORTELETTI, 2009, p. 19).

Faz-se necessário reservar uma largura mínima ao redor do duto, a qual é considerada de utilidade pública e deve ser desapropriada, caso necessário. Tal largura, ou faixa, é denominada faixa de servidão. A NBR 12712-2002: Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível, utiliza o termo faixa de domínio ou faixa definindo-o como “área de terreno de largura definida, ao longo da diretriz do gasoduto situado fora da área urbana, legalmente destinado à sua instalação e manutenção, ou faixa destinada, pela autoridade competente...”. A largura média da faixa de servidão é de 12 metros e serve para realização de manutenção e inspeção do oleoduto. O traçado dos dutos é selecionado a partir de caminhos já existentes, como estradas e rodovias, desde que não pertencentes a áreas ambientalmente protegidas. (CORTELETTI, 2009, p. 19).

A eficiência no transporte e distribuição do gás natural representa clara redução econômica na implantação de um gasoduto. Segundo Burman (2004, p. 15), a redução do atrito interno pela pintura proporciona aumento de 10% na eficiência de transporte do gás natural, comparativamente a gasodutos que não possuem tal revestimento interno.

Comparando o transporte de gás natural com o transporte de petróleo através de oleodutos, tem-se que um volume muito maior de gás é transportado por unidade de energia, devido à menor densidade do gás natural.

A localização onde o oleoduto será inserido influi fortemente em seu projeto. O cálculo da espessura da parede do gasoduto, o espaçamento entre as estações de compressões e a determinação da pressão de ensaio são critérios a partir dos quais se realiza a classificação da locação de diretriz do gasoduto. A Petrobras N-2180 define unidade de locação de classe como sendo uma “área que se estende 200 m para cada lado da linha de centro de qualquer trecho, com comprimento contínuo de 1600 m”. Tal definição pode ser visualizada na figura 16.

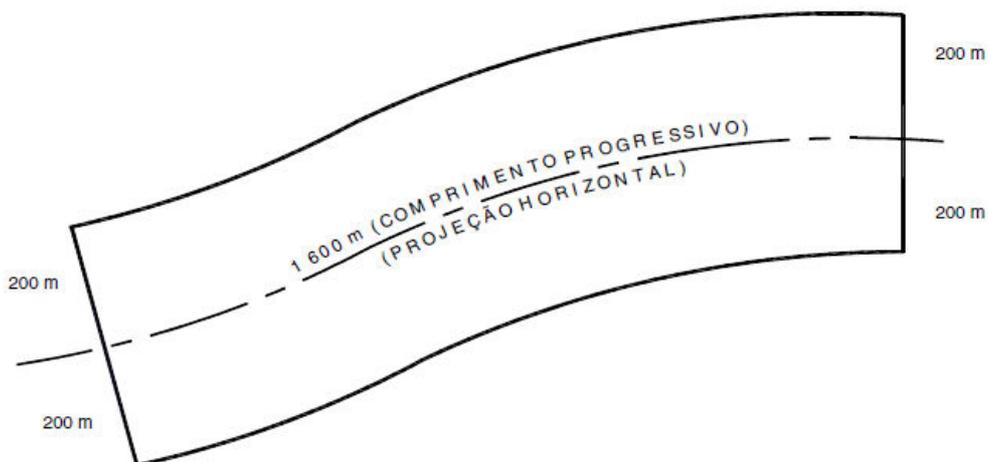


Figura 16 - Unidade de Locação de Classe.
Fonte: Norma Petrobrás N-2180, p. 3.

Ainda segundo a Petrobrás N-2180 “a classe de locação deve ser estabelecida em função da quantidade de construções para ocupação humana existente em uma unidade de locação de classe”.

Para gasodutos novos, a classificação da classe de locação varia da classe 1 a 4, variando respectivamente, de unidades de locação de classe contendo menos de 10 (dez) construções para ocupação humana até “unidades de locação de classe onde prevaleçam prédios de 4 ou mais pavimentos, incluindo o térreo” (Norma Petrobrás N-2180).

Devido aos riscos envolventes, faz-se necessário a instalação de válvulas de segurança ao longo da tubulação. De acordo com a NBR 12712, tais válvulas devem ser instaladas a um distanciamento máximo, dado em decorrência da classe de locação, variando entre 8 km e 32 km. Devem ainda ser instalados no início, no fim de cada trecho e em intervalos não superiores a 200 km, lançadores e recebedores (*scraper-traps*) com a finalidade de limpeza e inspeção da tubulação (BURMAN, 2004, p. 16).

Para o cálculo da determinação da espessura requerida de parede, para tubos e demais componentes da tubulação, visando resistir à pressão interna, utiliza-se a equação (24):

$$\alpha = \frac{p \cdot D}{2S_y \cdot F \cdot \zeta \cdot T} \quad (24)$$

onde:

α = espessura requerida de parede (mm);

p = pressão de projeto (kPa);

D = diâmetro externo (mm);

S_y = Tensão mínima de escoamento definida para o material (kPa);

F = fator de projeto;

ζ = fator de eficiência da junta (longitudinal ou helicoidal);

T = fator de temperatura.

O fator de projeto reflete o grau de segurança estrutural do gasoduto para cada classe de locação. O fator de temperatura é dependente da temperatura de projeto. O fator de eficiência de junta é considerado como unitário para todos os dutos fabricados sob normas aceitas pela NBR 12712-2002, sendo que para as exceções, o valor do fator de eficiência de junta é 0,8. Tanto o fator de projeto quanto o fator de temperatura quanto o fator de eficiência de junta são obtidos de tabela, de acordo com a classe de locação, temperatura de projeto e norma de fabricação, respectivamente, na NBR 12712-2002.

Caso seja esperada ação corrosiva sobre o duto instalado, é necessário um incremento no valor da espessura calculada na equação (24), a fim de compensar as perdas previstas por ação corrosiva.

A profundidade de enterramento do gasoduto é diferenciada para gasodutos de transmissão e distribuição. Os gasodutos de transmissão têm sua profundidade de enterramento de acordo com a classe de locação/situação, podendo variar de 750 mm a 900 mm. Já os gasodutos de distribuição devem ser enterrados em profundidade igual ou superior a 600 mm (NBR 12712-2002, p. 15). Em ambas as situações (transmissão e distribuição) devem ser observadas exceções quanto à locação em cruzamentos de rodovias, ferrovias e ruas, em rios e leitos de rios, e demais situações descritas na NBR 12712-2002. Os dutos enterrados devem ainda ser sinalizados com fita contínua, ou outro meio, localizada a 300 mm acima do duto (NBR 15649-2004: Tubulação para Indústria de Petróleo e Gás Natural).

2.4.2 Reparos em Oleodutos e Gasodutos

A tubulação enterrada apresenta perigo potencial para pessoas e equipamentos (NBR 15649:2004). No projeto de tais tubulações devem ser previstos alguns requisitos, como:

- projeto, incluindo traçado, arranjo, interação com sistemas interligados;
- procedimentos operacionais e de controle;
- proteção contra a corrosão;
- proteção e minimização de impactos externos;
- especificação de materiais, procedimentos de construção e controle de qualidade.

A observação destes requisitos tem o objetivo de restringir as futuras necessidades de reparo na tubulação. A Norma Petrobrás N-2737 define que tubulações que apresentam qualquer dano com vazamento, ou sulcos e cavas com profundidade maior que 12,5% e 10% da espessura nominal de parede, no caso de oleodutos e gasodutos, respectivamente, apresentam necessidade de reparo. Além destes, outros danos previstos na mesma norma, devem ser reparados ou removidos, tais como: qualquer tipo de trinca, mordeduras, solda não aceita por norma, áreas de corrosão e tensionamento longitudinal.

São previstos três tipos de reparos na Norma Petrobrás N-2737. São eles: reparo de contingência, temporário e permanente. Os reparos de contingência “são precedidos de ações operacionais para minimizar os impactos ao meio ambiente e pessoas.” Trata-se de um reparo preliminar que visa viabilizar os reparos temporários e definitivos. Os reparos temporários “servem para reforçar regiões que apresentam danos, garantindo a segurança e a continuidade operacional do duto, quando a execução do reparo definitivo for inviável”. Já os reparos permanentes propiciam a recomposição mecânica integral do duto.

As ocorrências de acidentes com gasodutos são classificadas pela EGIG - *7th Report of the European Gas Pipeline Incident Data Group* - em três formas distintas (CORTELETTI, 2009, p. 46):

- pit (furo pequeno): diâmetro menor que 2 cm;
- fenda: diâmetro maior que 2 cm e menor que uma fissura (20% do diâmetro);

- ruptura: diâmetro total do duto ou fissuras (acima de 20% do diâmetro).

O gráfico na figura 17 mostra que ações de terceiros, como escavações e construções, representam em torno de 50% do total de acidentes em gasodutos.

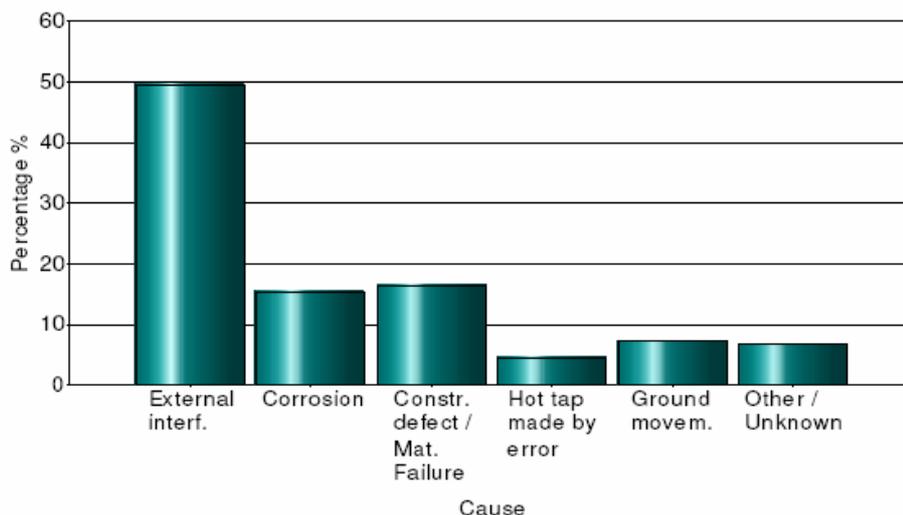


Figura 17 - Causas de Incidentes com Gasodutos.
Fonte: CORTELETTI, 2009, p. 47.

2.4.3 Proteção Anti-Corrosiva e Resistividade do Solo

O rompimento de um oleoduto é capaz de gerar danos muitas vezes irreparáveis ao meio ambiente e, financeiramente, as consequências alcançam facilmente a marca de bilhões de dólares. A proteção da estrutura metálica de um oleoduto apresenta custos muito elevados, porém totalmente justificáveis diante das consequências resultantes de um dano no oleoduto (NETO et al., 2005, p. 2).

Dutos de aço carbono necessitam de proteção anticorrosiva para prolongamento da vida útil do mesmo. Objetivando a proteção externa do duto, uma das formas mais empregadas é o revestimento externo associado à proteção catódica. O revestimento utilizado no duto representa ponto principal da prolongação da vida útil do mesmo e representa cerca de 5% do custo total de instalação (MARROIG et al., 2003, p. 2).

O efeito corrosivo traz como consequência a diminuição da espessura da parede nominal do duto, por meio do acúmulo de água e resíduos sólidos localizados. Tais resíduos, se abrasivos, além das consequências da abrasão, podem comprometer

toda a estrutura do duto por meio do entupimento de válvulas e filtros componentes do sistema (NÓBREGA et al., 2002, p. 3).

Oleodutos enterrados ou submersos interagem com o meio no qual estão inseridos, portanto, justifica-se a aplicação de um projeto de proteção catódica à estrutura. No caso de oleodutos aéreos ou isolados do meio eletrolítico apenas justifica-se um projeto de proteção anticorrosiva interna, caso transporte material eletrólito (SCHIMIEGUEL; CASTRO; PELLICIOLLI, 2004, p. 18).

O projeto do sistema de proteção catódica deve ser consequência de criterioso levantamento de dados. Informações sobre o traçado, valores de resistividade do solo, possíveis mudanças sazonais, ataque bacteriano, fontes de interferência CC ou CA, proximidade de linhas de transmissão e sistemas elétricos ferroviários ou metroviários são dados necessários para o projeto eficiente do sistema de proteção catódica do oleoduto (Norma Petrobrás N-2171, p. 4).

A proteção catódica pode ser efetuada por meio da instalação de sistemas por corrente impressa ou por corrente galvânica. Ambos os meios apresentam o mesmo princípio: “obtenção da proteção pela injeção de corrente na estrutura através do meio em que ela se encontra” (SCHIMIEGUEL; CASTRO; ACCIOLLI, 2004, p. 26). De acordo com a Norma Petrobrás N-2171, a preferência deve ser pelo sistema por corrente impressa, a qual considera resistividade do solo, existência de fontes de correntes de interferência, inserção do duto em áreas de vandalismo, facilidade de acesso para a instalação de retificadores, impacto da proteção catódica em outras já existentes ou a ser futuramente instaladas, e outras.

A resistividade do solo é quesito primordial no projeto de proteção catódica de oleodutos. Segundo a Norma Petrobrás N-2245, a resistividade deve ser medida a 1,5 m de profundidade do solo e, de acordo com o local, devem ser observadas as individualidades descritas na referida norma.

A medição da resistividade do solo pode ser obtida por meio da utilização do Método de Wenner ou Método dos Quatro Pinos. Tal método é descrito pela NBR 7117:1981. O método utiliza um terrômetro para medir os valores de resistência. O equipamento apresenta dois terminais de corrente (A e B) e dois terminais de potencial (M e N). Uma corrente elétrica é injetada através dos terminais de corrente gerando um potencial no outro par de terminais e indicando a resistência elétrica entre os eletrodos (SCHIMIEGUEL; CASTRO; ACCIOLLI, 2004, p. 28).

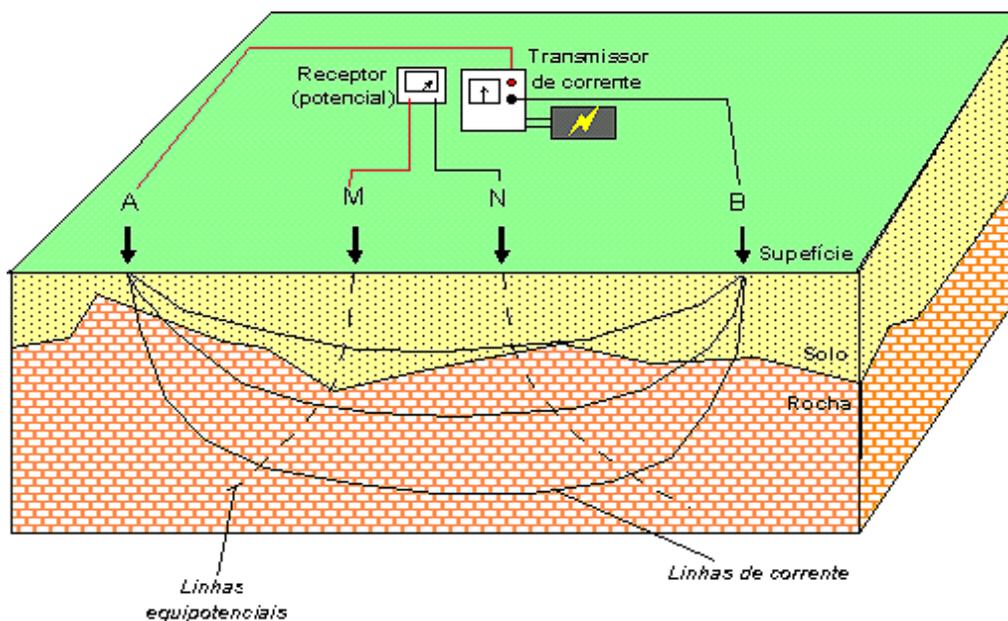


Figura 18 - Medição da Resistividade do Solo.
Fonte: SCHIMIEGUEL; CASTRO; ACCIOLLI, 2004, p. 28.

2.5 LINHAS DE TRANSMISSÃO

O Operador Nacional do Sistema (ONS), em seu glossário de termos técnicos, define que “linha de transmissão é o trecho compreendido entre a primeira e a última torre, excluindo-se os barramentos de entrada das subestações” (ONS,2009, p.27).

De acordo com o Electric Power Research Institute (EPRI), “Linhas de transmissão são os meios pelos quais a energia elétrica é transportada da fonte de geração para os lugares de uso” (EPRI, 2005, p. 1-3).

Observa-se que ambas as definições em nada restringem o termo as suas características construtivas, por tanto, linhas de transmissão podem ser tanto aéreas com cabos nus, como subterrâneas com cabos isolados.

Neste estudo, consideram-se linhas de transmissão como sendo estruturas aéreas, com cabos nus de alumínio, com ou sem alma de aço, destinadas a transportar energia elétrica com tensão de operação nominal de 230 kV ou superior.

As linhas de transmissão, no Brasil, apresentam em geral, tamanho considerável devido às distâncias existentes entre o ponto de geração e o ponto de consumo. O parque gerador brasileiro é constituído basicamente por usinas de médio e grande porte, o que contribui ainda mais para um sistema de transmissão de longa distância.

O Brasil apresentava sua rede de transmissão elétrica desconexa até 1999 segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2011), causando perda na eficiência tanto de produção quanto de geração de energia elétrica. A figura 19 apresenta as linhas de transmissão existentes e previstas no Brasil em 2012.

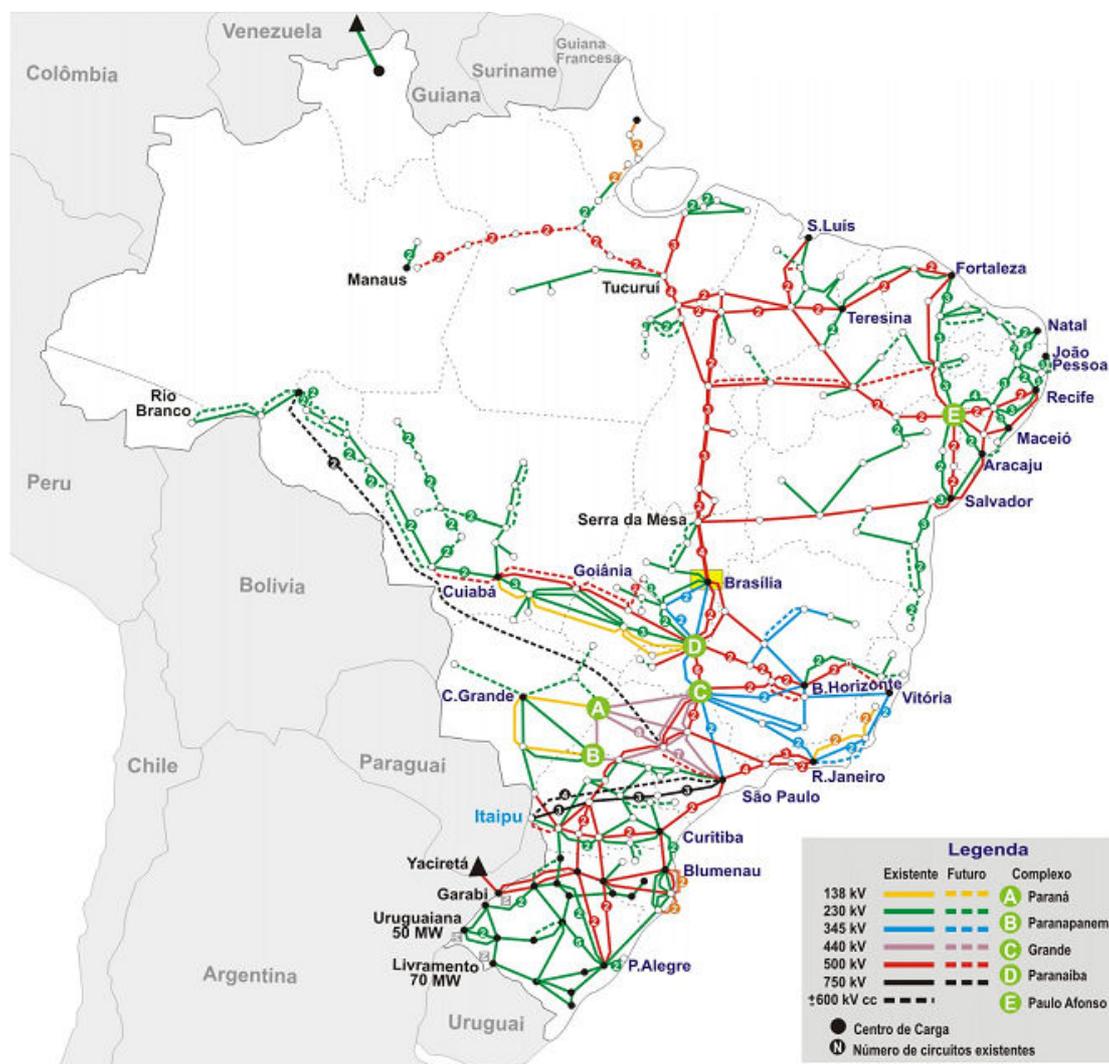


Figura 19 - Linhas de transmissão no Brasil: Horizonte 2012.
Fonte: Operador Nacional do Sistema, 2011.

Com o objetivo de aperfeiçoar o processo de transmissão, foi criado o Sistema Interligado Nacional - SIN. O mesmo é formado por empresas transmissoras de energia elétrica da região Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Mais de 95% do sistema de transmissão elétrica nacional é interligada, sendo que as regiões isoladas encontram-se, em sua maioria, no Norte (ONS, 2011). “As operações de instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN” são controladas e coordenadas pelo ONS, sob fiscalização e regulação da ANEEL.

O sistema de transmissão integrado permite que usinas com déficit em seu nível de reservatório permutem energia com demais usinas instaladas nas diferentes regiões brasileiras. Além desta vantagem, o sistema integrado torna o sistema de transmissão mais estável, confiável e econômico. Existem ainda regiões brasileiras não integradas ao sistema de transmissão, sendo que a maior parte encontra-se na região Norte, onde a geração é predominantemente a partir de termelétricas a diesel (ANEEL, 2011).

2.5.1 Níveis Típicos De Tensão

Os níveis de tensão utilizados variam dependendo do país sob análise, porém normalmente encontra-se entre 220 kV e 765 kV. No Brasil, linhas de transporte de energia elétrica classificadas como de transmissão possuem níveis de tensão igual ou superior a 230 kV, sendo as tensões usuais: 230 kV, 345 kV, 440 kV, 500 kV e 765 kV. As linhas de subtransmissão são sistemas com classe de tensão abaixo de 230 kV. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1985), na NBR 5422, as linhas de distribuição, responsáveis pela distribuição de energia a partir das subestações transformadoras de distribuição, possuem níveis de tensão típicos de 11 kV, 13,8 kV, 21 kV, 24 kV e 34,5 kV.

2.5.2 Linhas De Transmissão Aéreas

Os principais elementos das linhas de transmissão, conforme apresentado na figura 20, são:

- Cabos condutores e acessórios;
- Fundações;
- Aterramentos;
- Estruturas isolantes e de suporte;
- Cabo guarda ou pára-raios.

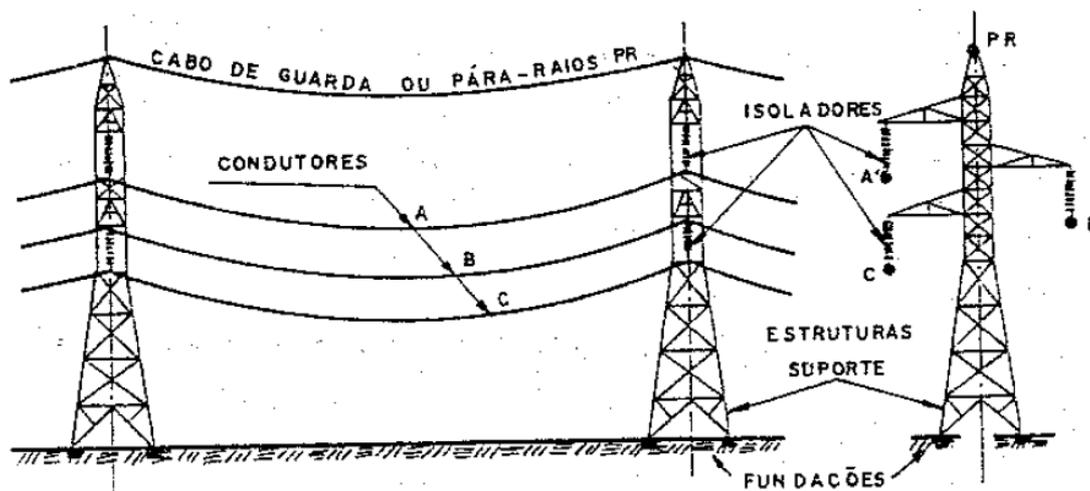


Figura 20 - Principais elementos das linhas de transmissão

Fonte: Projetos Mecânicos das Linhas Aéreas de Transmissão (LABEGALINI et al., 1992, p. 19)

Os condutores podem ser vistos, sob a perspectiva econômica, como os principais elementos da linha de transmissão. Seu dimensionamento está diretamente relacionado com as perdas de energia (efeitos Corona e Joule) e outros efeitos indesejáveis, como radio interferência e ruídos acústicos (LABEGALINI et al., 1992, p. 19).

Os isoladores utilizados em linhas de transmissão são encontrados em materiais sintéticos compostos, vidro temperado e porcelana vitrificada. São três tipos básicos de isoladores utilizados: isoladores de pino, de pedestal ou pilar ou coluna e isoladores de suspensão.

As estruturas de suporte da linha exercem papel de fixação da mesma ao solo. Além disso, permitem a fixação dos condutores através de distâncias adequadas entre si, em relação ao solo e em relação à estrutura.

O cabo guarda tem a função de diminuir ao máximo a incidência de descargas atmosféricas sobre os condutores de transmissão. Em geral, as flechas dos cabos guardas são menores que a dos cabos condutores (LABEGALINI et al., 1992, p. 33).

2.5.3 Configurações Geométricas das Linhas Aéreas

São três as disposições básicas dos condutores em linhas de transmissão: plana horizontal (figura 25), plana vertical (figura 21) e triangular (figura 23). A configuração plana horizontal é utilizada em todos os níveis de tensão,

preferencialmente em circuitos simples. A configuração plana vertical tem o intuito de diminuir a faixa de servidão da linha e é utilizada em circuito simples em vias públicas. Em circuito duplo, representado na figura 22, é utilizado em níveis de tensão até 500 kV. A configuração triangular é empregada para circuitos simples e duplos, conforme figura 24) em todos os níveis de tensão. Nesta configuração, os condutores são dispostos, normalmente, em formação de um triângulo isósceles.

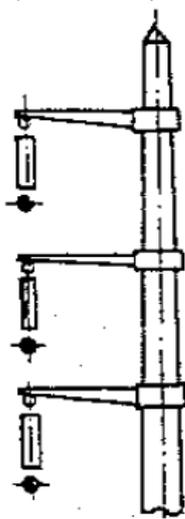


Figura 21: Circuito Simples Vertical.
Fonte: LABEGALINI et al., 1992, p. 73.

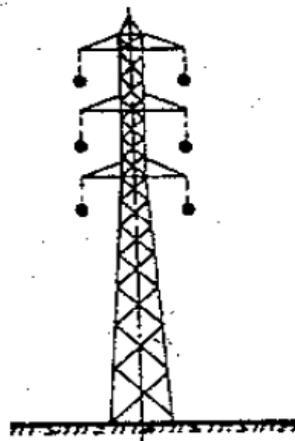


Figura 22 : Circuito Duplo Vertical.
Fonte: LABEGALINI et al., 1992, p. 73.

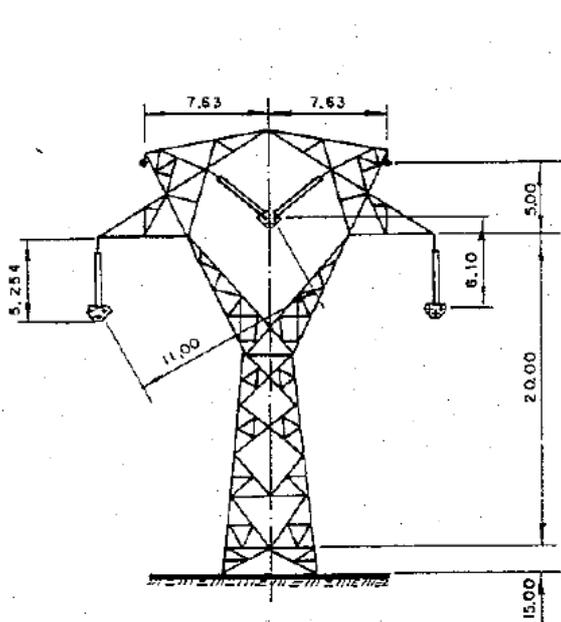


Figura 23: Circuito Simples Triangular.
LABEGALINI et al., 1992, p. 74.

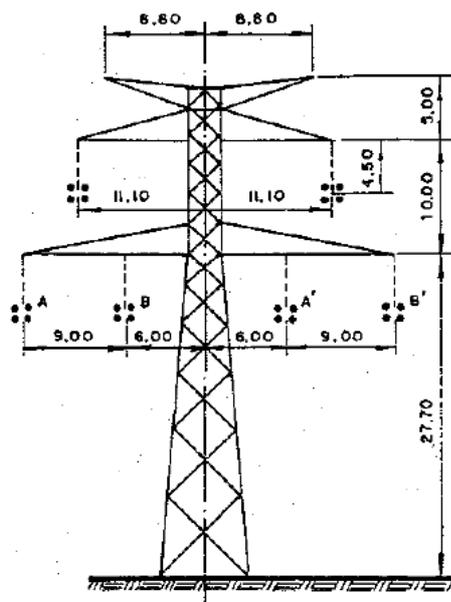


Figura 24: Circuito Duplo Triangular. Fonte:
Fonte: LABEGALINI et al., 1992, p. 74.

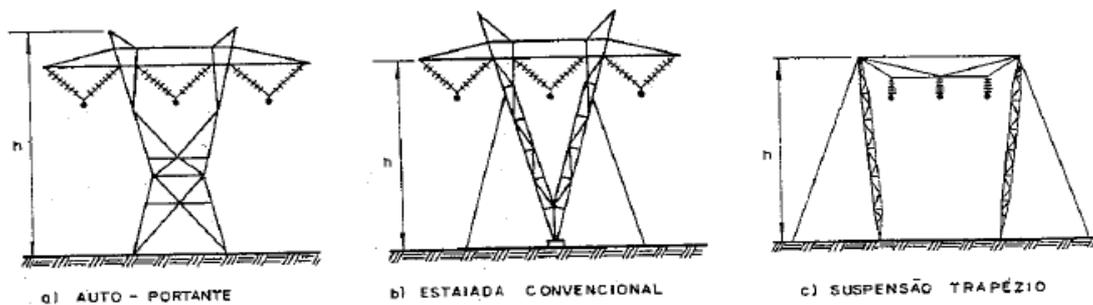


Figura 25- Circuito horizontal.

Fonte: LABEGALINI ET AL., 1992, p. 81.

2.5.4 Faixa de Servidão

A faixa de servidão ou faixa é definida segundo NBR 12712 como “área de terreno de largura definida, ao longo da diretriz do gasoduto situado fora da área urbana, legalmente destinado à sua instalação e manutenção...”. A faixa de domínio é adquirida pelo expropriante enquanto a faixa de servidão permanece com o proprietário, com restrições ao uso.

A faixa de terra ao longo da linha de transmissão necessária para garantir segurança e manutenção é denominada faixa de segurança e segundo a NBR 5422 alguns fatores são determinantes na largura da faixa de segurança. São eles: balanço dos cabos devido à ação do vento, posicionamento das fundações de suportes e efeitos elétricos. Ainda segundo a referida norma, a largura mínima da faixa de servidão, para uma única linha, é dada por:

$$L_f = 2 \cdot (b + \lambda + D) \quad (25)$$

Onde:

b = distância horizontal do eixo do suporte ao ponto de fixação do condutor mais afastado deste eixo, em metros;

λ = soma das projeções horizontais da flecha do condutor e do comprimento da cadeia de isoladores, em metros;

D = no mínimo igual a 0,5m.

A largura da faixa de segurança também fica condicionada à observação de aspectos como níveis de rádio-interferência, interferência em sinais de TV e ruído audível quando se trata de linhas de transmissão com nível de tensão acima de 230 kV.

É também necessário observar o espaço da faixa quanto às benfeitorias permitidas. A NBR 5422 define as distâncias mínimas de segurança e a orientação técnica da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL, 2007) determina a utilização do espaço de acordo com o exposto na figura 26. A área A fica impossibilitada de construção de quaisquer benfeitorias enquanto as áreas B e C permitem benfeitorias específicas. Ainda de acordo com orientação técnica da CPFL, a largura mínima usual para linhas de 69 kV, 88 kV e 138 kV correspondem a 15 m para cada lado do eixo da linha de transmissão. Como observado, a faixa de servidão e de segurança da linha de transmissão constitui tema principal em normas e orientações técnicas de concessionárias de operação de linhas de transmissão.

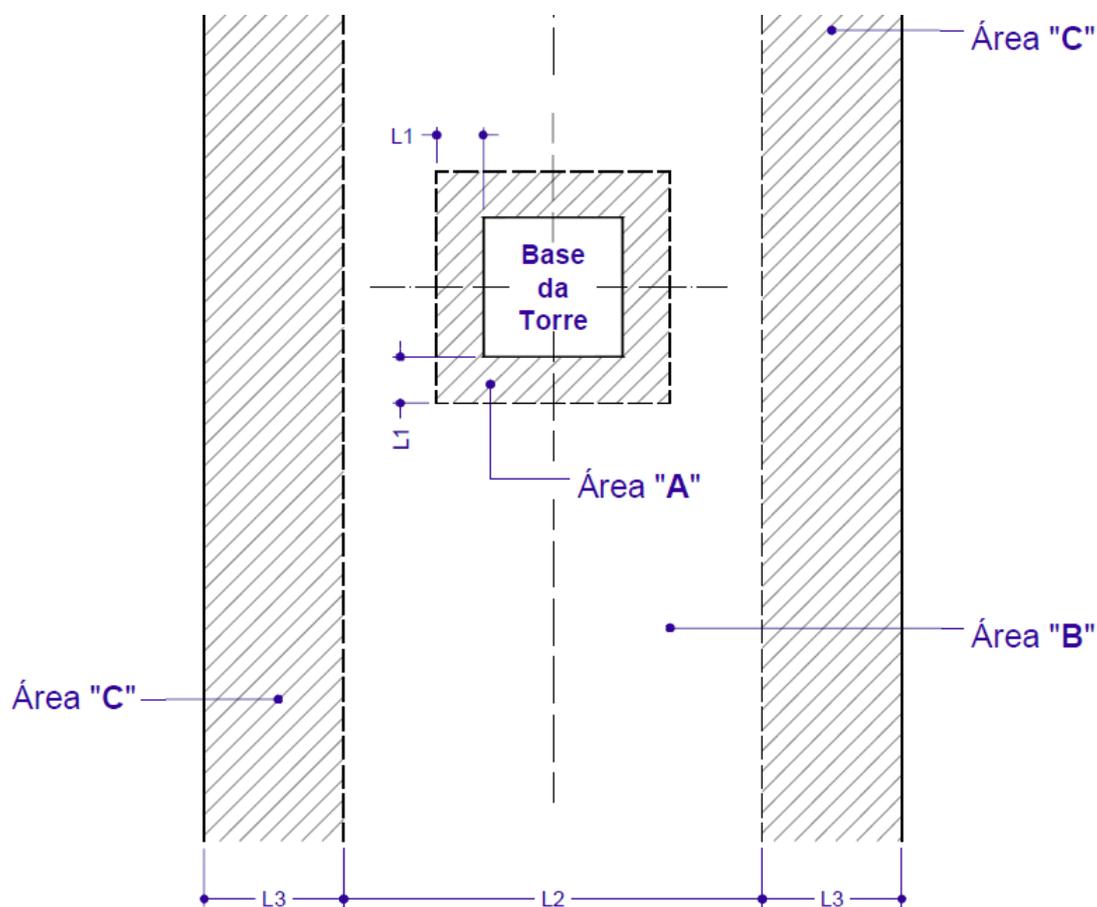


Figura 26- Faixa de servidão.

Fonte: Adaptado de Orientações Técnicas da CPFL, p. 13.

3 MODELO MATEMÁTICO-COMPUTACIONAL

O modelo matemático computacional para cálculo de um sistema físico complexo tem, como principais vantagens, uma maior precisão e um reduzido tempo de análise. Um modelo versátil possibilita simulações de diversos sistemas com facilidade e agilidade. Alterando quaisquer dos parâmetros em estudo, obtém-se sempre a mesma precisão de resultados, o que permite uma comparação mais adequada.

A teoria da indução de tensão em corpos metálicos próximos à linhas de transmissão, por efeito capacitivo e indutivo, foi transcrita em forma de uma linguagem de software de cálculo, desenvolvido em MATLAB® r2010b. O modelo foi desenvolvido de forma que fossem apresentados valores máximos e mínimos de tensão e corrente induzidas para cada um dos efeitos, assim como os valores máximos e mínimos de tensão total, que é a soma dos dois efeitos no oleoduto. São apresentados, também, gráficos do valor do campo elétrico e tensão na seção transversal da faixa de servidão e perfil de tensão induzida ao longo do oleoduto paralelo a linha de transmissão.

O programa é integralmente transcrito no Anexo I deste trabalho, de forma a servir de base para estudos complementares.

3.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

Com o objetivo de validar os resultados obtidos pelo modelo matemático desenvolvido e implementado, serão apresentados os resultados de duas simulações de sistemas verificados em trabalhos referenciados.

Pequenas variações, como as verificadas nas figuras 27 à 31, foram consideradas aceitáveis em virtude de variações de precisão de cálculo e valores de parâmetros não discriminados nos trabalhos em referência.

Cabe salientar que o objetivo dessa seção não é validar o método de cálculo, uma vez que esses métodos já foram validados na literatura referenciada, mas sim o modelo matemático computacional implementado neste estudo.

3.1.1 Efeito Capacitivo

Como detalhadamente explanado na seção 2.1, o cálculo da tensão induzida pelo efeito capacitivo entre a linha e o oleoduto é realizado pelo método de simulação de cargas. A este método é aplicada a consideração de Bessonov (2000) vista na equação (5), a fim de permitir o cálculo do campo elétrico abaixo do nível do solo. Exceto pela consideração do componente tangencial do campo de Bessonov (2000), o restante do cálculo é idêntico ao proposto por Santos (2010), EPRI (2005) e Malik (1989).

Assim sendo, foi simulado no modelo implementado em MATLAB, o sistema proposto por Santos (2010), que resulta da resolução da equação (4), e tem os resultados no gráfico da figura 27. São então comparados os valores aos obtidos pelo modelo computacional nas figuras 28 e 29. Trata-se de um sistema de 138 kV, 60 Hz, em circuito duplo vertical, como o visto na figura 32, com duas configurações de fase distintas. A configuração ABC/ABC é chamada de “alta reatância” em quanto a configuração ABC/CBA é chamada de “baixa reatância”.

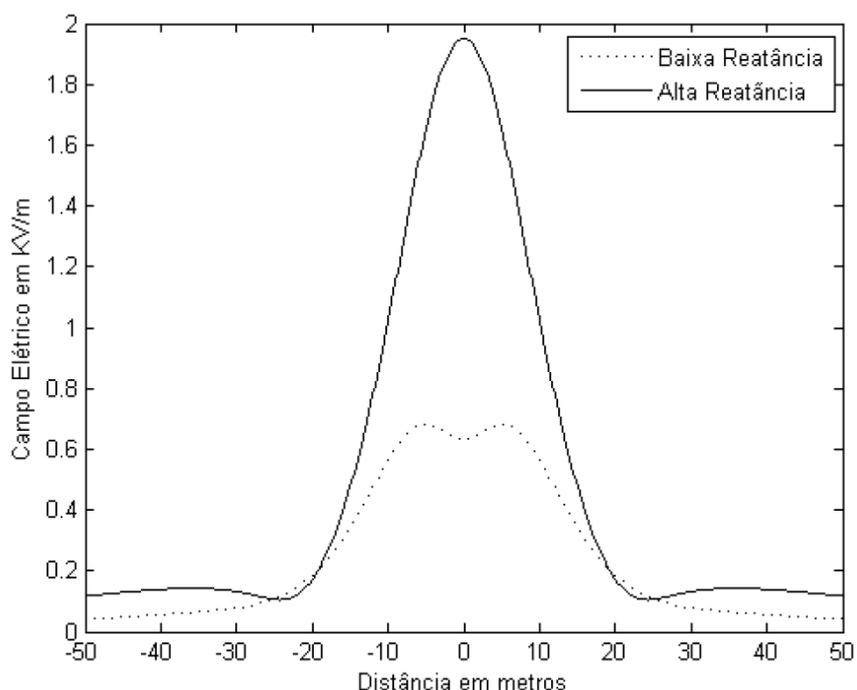


Figura 27 – Campo elétrico no nível do solo devido a uma LT de 138kV, circuito duplo. Fonte: SANTOS, 2010.

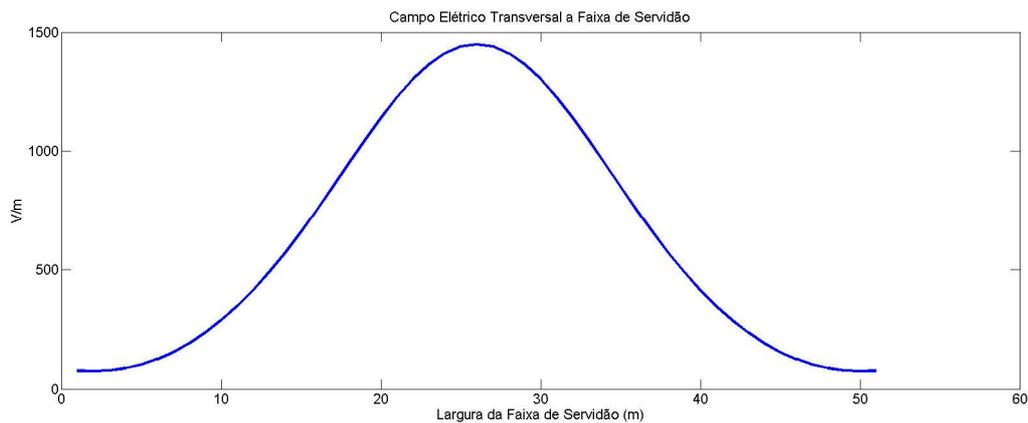


Figura 28 – Campo elétrico no nível do solo devido a uma LT de 138 kV, circuito duplo, ABC/ABC, simulada em MATLAB.

Fonte: Autoria própria (2012).

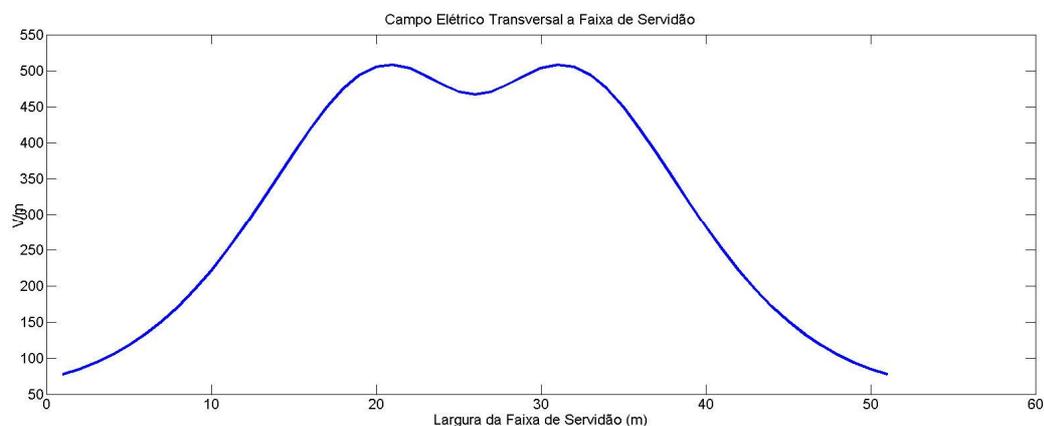


Figura 29 – Campo elétrico no nível do solo devido a uma LT de 138 kV, circuito duplo, ABC/CBA, simulada em MATLAB.

Fonte: Autoria própria (2012).

Como é possível verificar nas figuras 27 à 29 os valores de pico e perfil dos gráficos são muito semelhantes, tanto do ponto de vista de amplitude quanto de distribuição lateral. Dessa forma, o modelo matemático implementado em MATLAB para esse estudo do efeito capacitivo foi considerado aceito para a continuação das demais simulações, cujos resultados serão apresentados nas seções a seguir.

3.1.2 Efeito Indutivo

Como detalhadamente explanado na seção 2.3, o cálculo da tensão induzida pelo efeito indutivo entre a linha de transmissão e o oleoduto é realizado pela aplicação da fórmula de Carson-Clem, apresentada na equação (21).

Assim sendo, foi simulado no modelo implementado em MATLAB, o sistema proposto por BORTELS (2006), por meio das equações (22) e (23) cujo resultado gráfico para a tensão induzida ao longo do comprimento do grupo é apresentado na figura 30. Na figura 31 vê-se os resultados para um sistema idêntico ao testado no modelo de BORTELS (2006). Trata-se de um sistema de 345 kV, 50 Hz, configuração horizontal, com uma extensão de 10 km de paralelismo entre oleoduto e linha de transmissão.

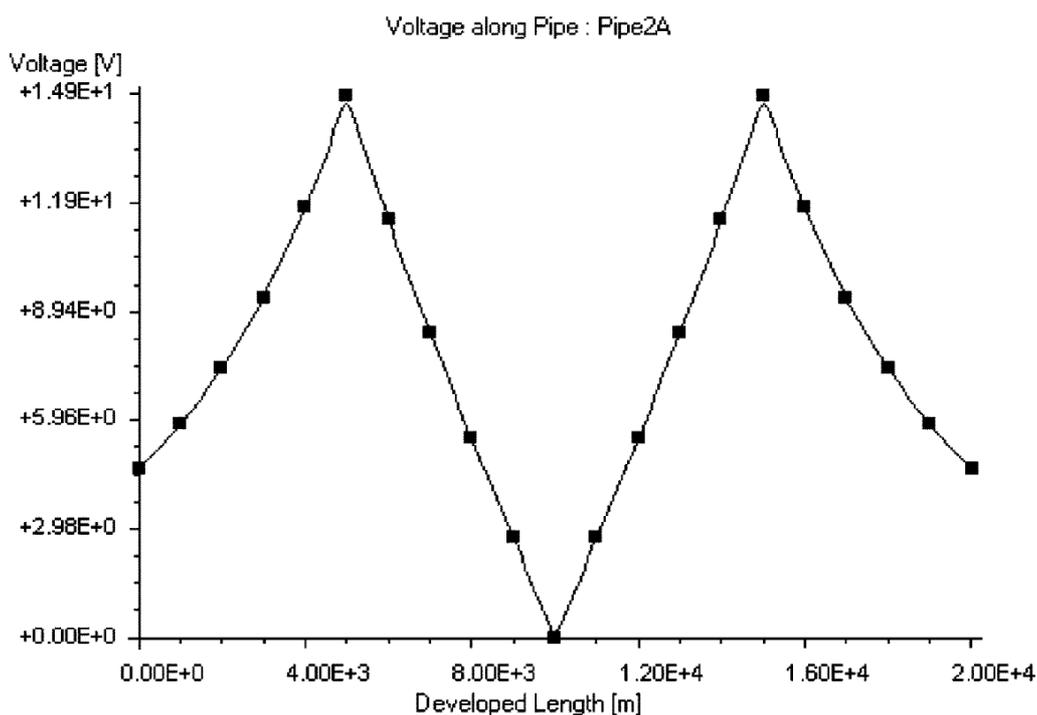


Figura 30 – Tensão induzida ao longo do oleoduto.
Fonte: BORTELS L. et al., 2006.

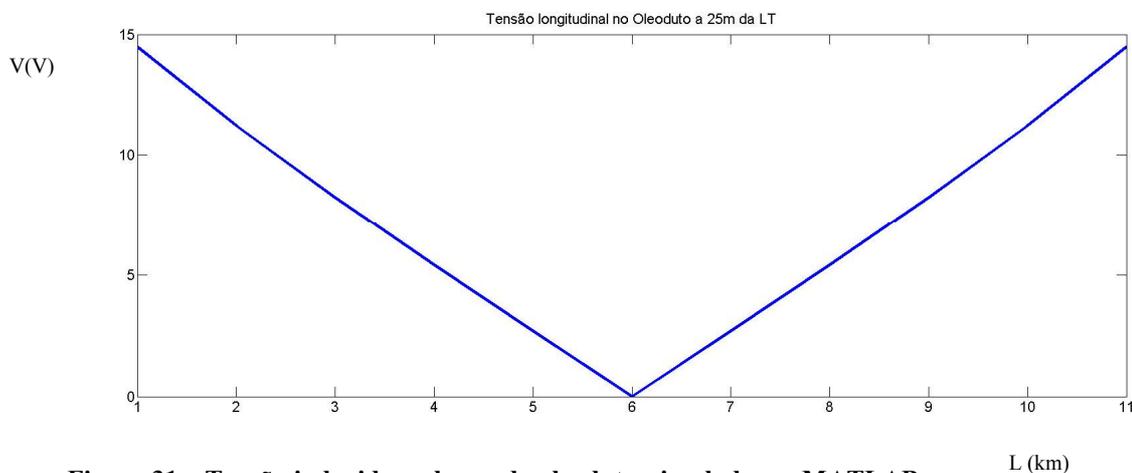


Figura 31 – Tensão induzida ao longo do oleoduto, simulada em MATLAB.
Fonte: Autoria própria (2012).

L (km)

Como é possível verificar nas figuras 30 e 31, os valores de pico e perfil dos gráficos são idênticos, tanto do ponto de vista de amplitude quanto de distribuição lateral. O gráfico da figura 30, considera o trecho de paralelismo, que ocorre entre o intervalo do quilômetro 5 e 15. Dessa forma o modelo matemático implementado em MATLAB por esse estudo para o efeito indutivo foi considerado aceito para a continuação das demais simulações, cujos resultados serão apresentados nas seções a seguir.

3.2 CENÁRIOS DE ANÁLISE E SIMULAÇÃO

Nesta seção serão apresentados e descritos os diversos cenários simulados neste estudo, os valores de parâmetros adotados e as premissas consideradas. Seguem também, resultados em gráficos e tabelas, para os casos considerados.

3.2.1 Parâmetros adotados

Todos os parâmetros de cálculo foram obtidos de literatura referenciada, uma vez que a obtenção ou confirmação desses valores não é escopo deste estudo.

Para a permissividade elétrica relativa do solo (ϵ_{r2}), Pinto (2010, p.25) define valores de 2,4 para solos argilosos, bastante comuns no estado do Paraná, a 15 para solos saturados. No entanto, CIGRE (1995, p.40), BORTELS et al. (2006, p.213) e outros autores costumam adotar o valor de permissividade elétrica relativa do solo de 5 para casos genéricos, valor este que foi adotado como valor padrão.

A resistividade elétrica do solo (ρ), de acordo com QENERGIA (2012), teria um valor adequado para o caso do solo considerado de 100 Ω .m. Portanto, este foi o valor adotado como padrão.

A permissividade elétrica relativa do ar (ϵ_{r1}) foi adotada como 1, conforme considerado por CIGRE (1995) onde é informado que a permissividade elétrica relativa do ar é aproximadamente igual a do vácuo (ϵ_0).

Quanto a resistividade elétrica do aço do oleoduto (ρ_p), foi adotado o valor de $1,7 \cdot 10^{-7}$ Ω .m. Ainda em relação ao aço do oleoduto, este foi considerado com o valor de 300 para permeabilidade magnética relativa (μ_r), conforme Bortels et al (2006, p. 213).

Para o revestimento do oleoduto foram considerados dois tipos de materiais como os mais comumente encontrados e referenciados na literatura, sendo eles o polietileno e o epóxi. TENARIS (2008) recomenda o uso de *fusion bonded epóxi*, cujo valor de resistividade é de $\rho_c = 1,2 \cdot 10^{13} \Omega \cdot m$, ou polietileno em tripla camada, cujo valor de resistividade é de $\rho_c = 10^{15} \Omega \cdot m$, como revestimento isolante para dutos metálicos enterrados.

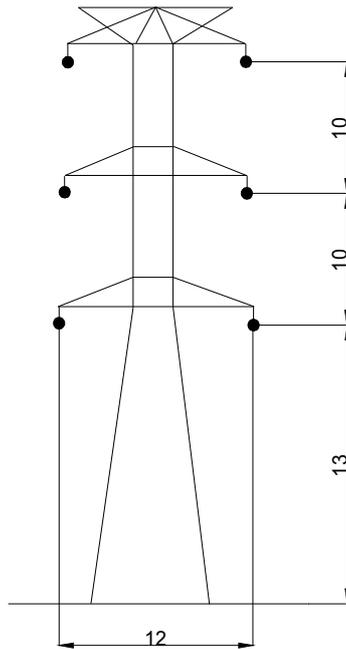
Para o revestimento do oleoduto, a espessura padrão considerada foi de 4 mm, valor verificado em CIGRE (1995).

O oleoduto foi considerado um tubo padrão, de aço A-105, de 24" de diâmetro externo, o que equivale a 609,6 mm, por ser o diâmetro mais comumente encontrado em projetos de grandes oleodutos nacionais.

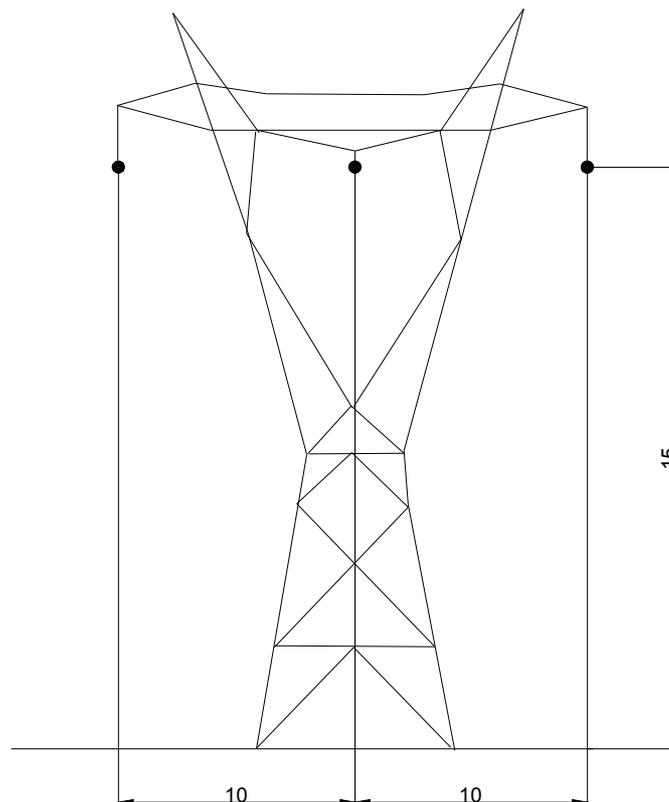
Quanto a linha de transmissão, foram considerados nas simulações 3 níveis de tensão, sendo: 230 kV; 345 kV e 550 kV. A grande maioria das simulações foram realizadas com uma linha de 230 kV, por ser a mais provável de se verificar em uma saída de central termelétricas, local este que foi suposto como sendo o mais provável para ocorrência de um compartilhamento de faixa de servidão e, portanto, um grande trecho de paralelismo entre o oleoduto e a linha de transmissão.

A configuração da linha de 230 kV foi considerada sempre em circuito duplo vertical, enquanto nas demais foram simuladas em circuito simples horizontal. As configurações, com suas respectivas cotas, são representadas nas figuras 32 e 33, cujos valores para as distâncias foram obtidos a partir de CIGRE (1995).

Com relação à corrente elétrica circulante na linha de transmissão em regime permanente foram simulados valores de 200 A, 500 A, 1000 A e 2000 A. No entanto, o valor padrão adotado foi o de 500 A, para a maioria dos casos, por ser um valor de corrente nominal aceitável para uma linha de 230 kV.



**Figura 32 - Linha de circuito duplo vertical utilizado nas simulações com tensão de 230 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).**



**Figura 33 - Linha de circuito simples horizontal utilizado nas simulações com tensão de 345 kV e 550 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).**

3.2.2. Limitações Adotadas para Avaliar a Tensão e Corrente no Sistema Duto Metálico- Linha de Transmissão

Conforme CIGRE (1995,p.5), em sistemas de corrente alternada de 50 à 60 Hz de frequência, é comum afirmar que a corrente que passa pelo corpo humano não é perigosa se não exceder 20 mA, sendo perceptível ao toque a partir de 1 mA. A legislação de diversos países, costuma limitar a corrente máxima que passa pelo corpo humano à valores de 5 à 15 mA, a partir dos quais medidas de proteção são necessárias.

A NBR 15751 afirma que o limite de corrente elétrica de longa duração suportado pelo corpo humano deve ser de 6 mA. Para efeito de análise dos resultados, adotou-se esse valor para comparação (ABNT, 2009, p. 9).

Devido às tensões induzidas pelo acoplamento indutivo, de acordo com a maioria das normatizações adotadas no mundo, medidas de proteção adicional devem ser adotadas quando a tensão induzida no duto metálico atinge valores em torno de 50 à 65 V. Adotou-se para este estudo, o valor de 50 V como referência de comparação de situações simuladas.

3.2.3 Simulações

Foram realizadas simulações onde objetivou-se cobrir o máximo de combinações dos parâmetros que tinham alguma faixa de variação. Dessa forma buscou-se identificar qual a combinação de características de projeto que resultariam em um menor valor de tensão induzida no oleoduto.

Alguns grupos de simulações podem ser identificados como, por exemplo, o grupo onde se avaliou a variação da tensão da linha, ou onde é avaliada a influência da variação da corrente.

A seguir são apresentados os valores de cada parâmetro considerado como padrão em todas as simulações. Em cada simulação o valor que for alterado será discriminado no descritivo da simulação.

- frequência da rede (f): 60 Hz;
- largura da faixa (Lf): 50 m;
- profundidade do oleoduto (H): 2 m;
- diâmetro do duto (D): 24" = 0,6096 m;
- permissividade elétrica relativa do revestimento do oleoduto (ϵ_r): 5;

- permeabilidade magnética relativa do aço do oleoduto (μ_r): 300;
- resistividade do solo (ρ): 100 Ωm ;
- resistividade do aço do oleoduto (ρ_p): $1,7 \times 10^{-7}$ Ωm ;
- resistividade do revestimento (polietileno) do oleoduto (ρ_c): 10^{15} Ωm ;
- espessura do revestimento (δ_c): 4 mm;
- permissividade elétrica relativa do ar (ϵ_{r1}): 1;
- permissividade elétrica relativa do solo (ϵ_{r2}): 5;
- diâmetro dos condutores da linha de transmissão (D): 1,831 cm = 336,4 AWG;
- corrente de fase da linha de transmissão (I): 500 A.

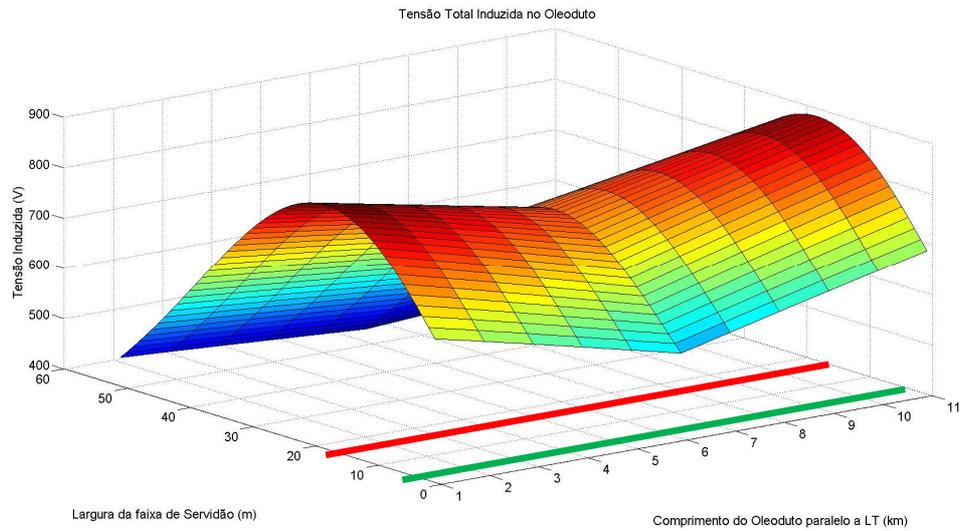
Como mencionado anteriormente, grupos de simulações podem ser identificados. Assim, os resultados e análises de cada simulação serão apresentados em “casos”, conforme a seguir:

CASO 1 – VARIAÇÃO DA TENSÃO DA LINHA DE TRANSMISSÃO

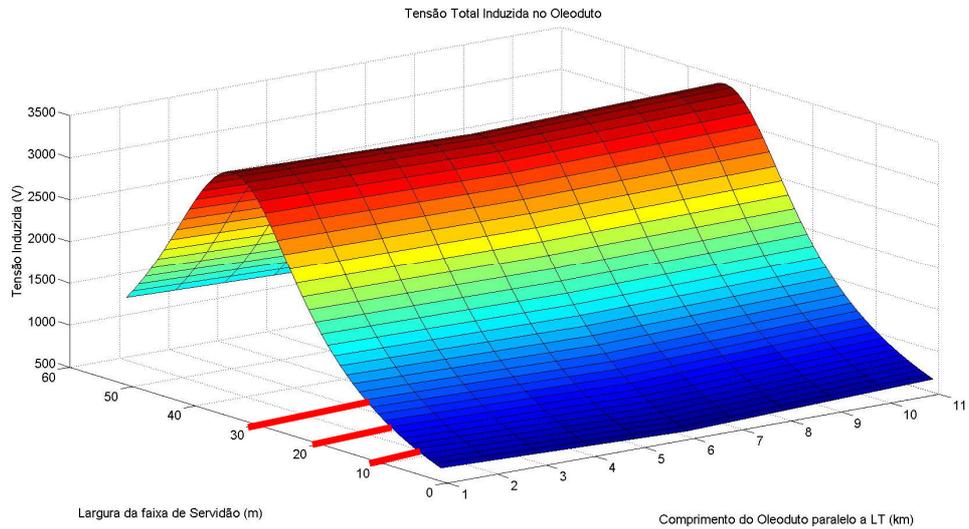
Foram realizadas 3 simulações onde são abrangidas as tensões de 230 kV, 345 kV e 550 kV.

Para a tensão de 230 kV foi considerado circuito duplo vertical, com sequência de fases ABC/CBA, 1 condutor por fase, 500 A de corrente de fase e 10 km de paralelismo entre a linha e oleoduto. Para a tensão de 345 kV foi considerado circuito simples horizontal, 2 condutores por fase, 500 A de corrente de fase e 10 km de paralelismo entre a linha e oleoduto. Para a tensão de 550 kV foi considerada a mesma configuração anterior, alterando-se apenas para 4 condutores por fase.

As figuras 34, 35 e 36, apresentam resultados gráficos para os três cenários simulados. A figura 34 apresenta o perfil de tensão induzida no oleoduto, tanto pelo efeito capacitivo quanto pelo efeito indutivo, pela linha de 230 kV em qualquer ponto da faixa de servidão. Todos os resultados reproduzidos pelo modelo desenvolvido, utilizam valores RMS para tensão e corrente. A figura 35 apresenta o mesmo tipo de resultado para a linha de 345 kV, enquanto que a figura 36 apresenta o resultado da linha de 550 kV. A posição das fases é indicada pelas linhas vermelhas e verdes inseridas nos gráficos.



**Figura 34 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).**



**Figura 35 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 345 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).**

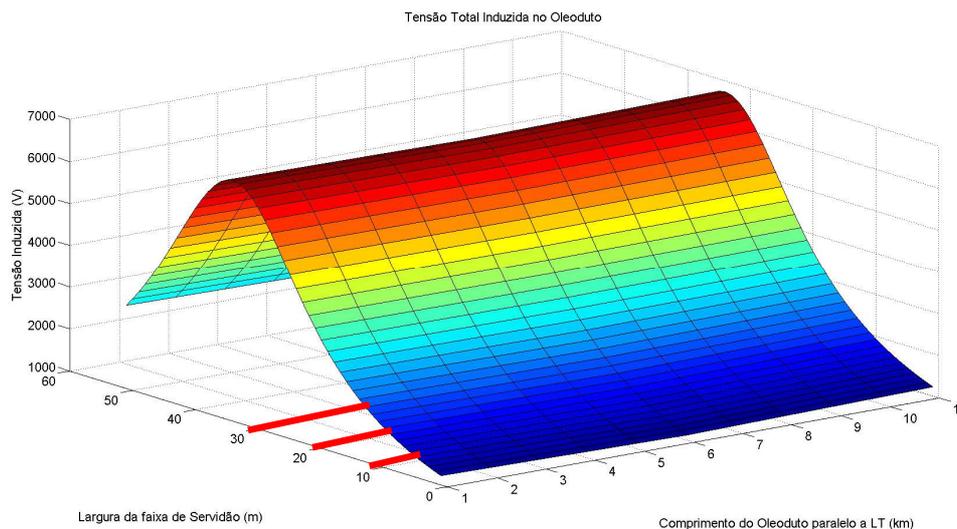


Figura 36 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 550 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).

Conforme se percebe pelos resultados apresentados nas figuras 34 a 36, valores máximos de tensão induzida no oleoduto (região vermelha dos gráficos), são bastante elevados, podendo chegar facilmente a alguns quilovolts. No entanto, conforme se percebe no perfil dos gráficos ao longo do eixo largura x tensão, a escolha apropriada da localização do oleoduto pode evitar valores extremos de tensão.

Dentro dos limites destes resultados gráficos, verifica-se que a região ideal para instalação do oleoduto seria aquela representada pela cor azul.

Outra variável de interesse, além do potencial no duto metálico, é a corrente de curto-circuito que flui dele quando aterrado em um ponto, pois esta indica a corrente de choque no caso de toque por uma pessoa desprotegida.

De acordo com CIGRE (1995), a corrente de curto-circuito pode ser expressa por:

$$I_{cc} = j\omega CLV \quad (26)$$

Esta corrente representa a corrente que passa pelo corpo de uma pessoa em curto circuito oleoduto-terra, sendo, portanto, importante parâmetro para avaliação da segurança.

As figuras 37, 38 e 39 apresentam, respectivamente, as correntes de curto-circuito devido o acoplamento capacitivo, na simulação das linhas de tensão de 230, 345

e 550 kV. Devido o fato do modelo, considerar um paralelismo perfeito entre LT e oleoduto, não há variação ao longo do comprimento do oleoduto para esses valores.

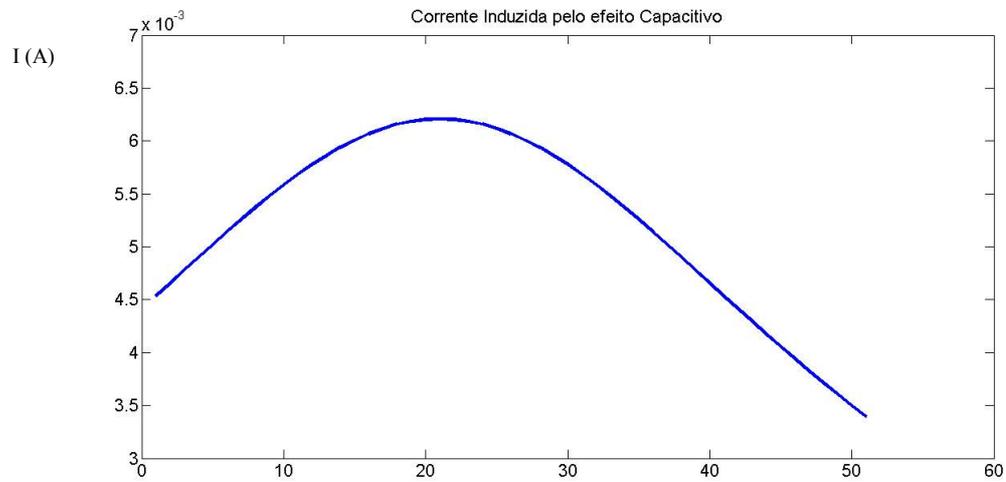


Figura 37 – Perfil de corrente de curto circuito, transversal a faixa de servidão, devido ao efeito capacitivo da linha de 230 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).

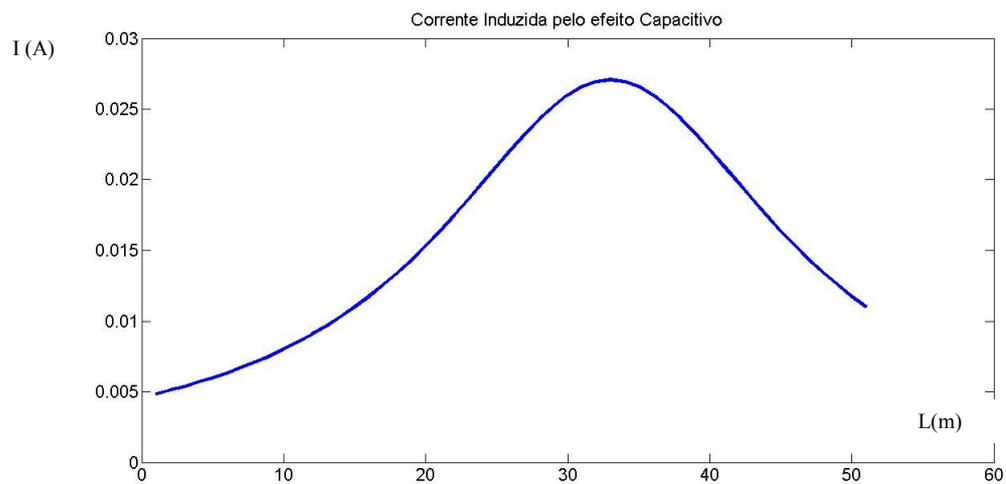


Figura 38 – Perfil de corrente de curto circuito, transversal a faixa de servidão, devido ao efeito capacitivo da linha de 345 kV.
Fonte: Autoria própria (2012).

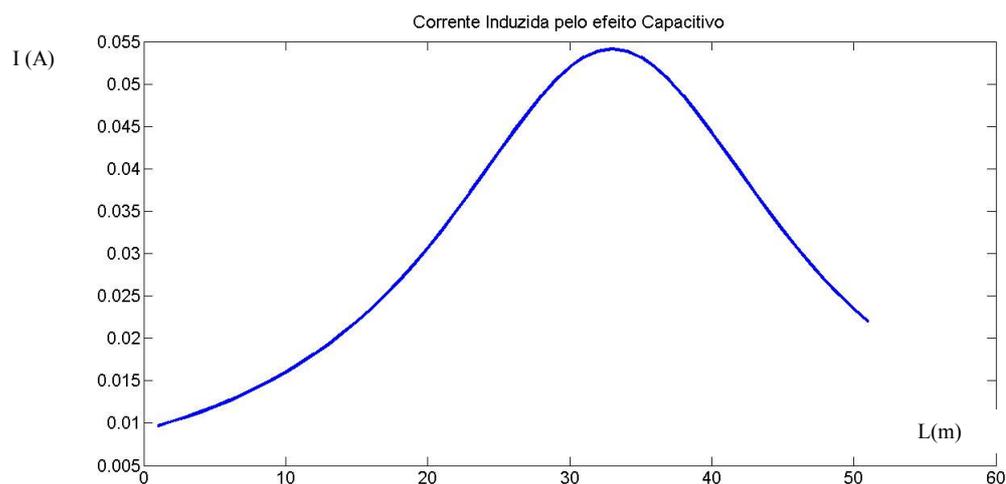


Figura 39 – Perfil de corrente de curto circuito, transversal a faixa de servidão, devido ao efeito capacitivo da linha de 550 kV.

Fonte: Autoria própria (2012).

A tabela 1 apresenta os resultados para as tensões máximas e mínimas, para as três simulações. Também encontram-se na tabela 1, os valores máximos e mínimos para a corrente de curto circuito entre duto metálico e terra.

Tabela 1- Resultados para extremos de tensão e corrente no duto metálico devido acoplamento capacitivo.

Simulação	Tensão da linha de transmissão		
	1 230 kV	2 345 kV	3 550 kV
V_{\max} (V)	777,03	3341,95	6658,58
V_{\min} (V)	424,68	567,51	1130,72
I_{\max} (mA)	6,21	27,06	54,13
I_{\min} (mA)	3,39	4,83	9,67

Fonte: Autoria própria (2012).

Conforme os resultado apresentados na tabela 1, verifica-se que o potencial no duto metálico é de algumas centenas de volts, ou mesmo alguns quilovolts, na faixa considerada. Isto por si só não indicaria um risco as pessoas, mas aliado ao fato de que correntes de curto circuito elevadas são também verificadas, percebe-se, que medidas de proteção adicionais para risco elétrico no oleoduto podem ser necessárias. Percebe-se, também, que para linhas de tensão de 345 kV ou superior, é pouco provável que a corrente de choque seja menor que a admitida.

CASO 2 – NÚMERO DE CONDUTORES POR FASE E SEQUÊNCIA DE FASE

Com o objetivo de verificar qual a influência do número de condutores por fase e a configuração da sequência de fase em um circuito duplo, foram realizadas duas simulações, sendo uma considerando 2 condutores por fase (espaçados de 45 cm), com sequência de fase ABC/CBA, e outra com 1 condutor por fase porém com sequência de fase ABC/ABC.

As figuras 40 e 41 apresentam os resultados dessas simulações para a tensão total induzida, ou seja, a somatória do efeito capacitivo e indutivo. Cabe ressaltar que a referência para comparação é a figura 34, pois é a configuração básica da linha de 230 kV.

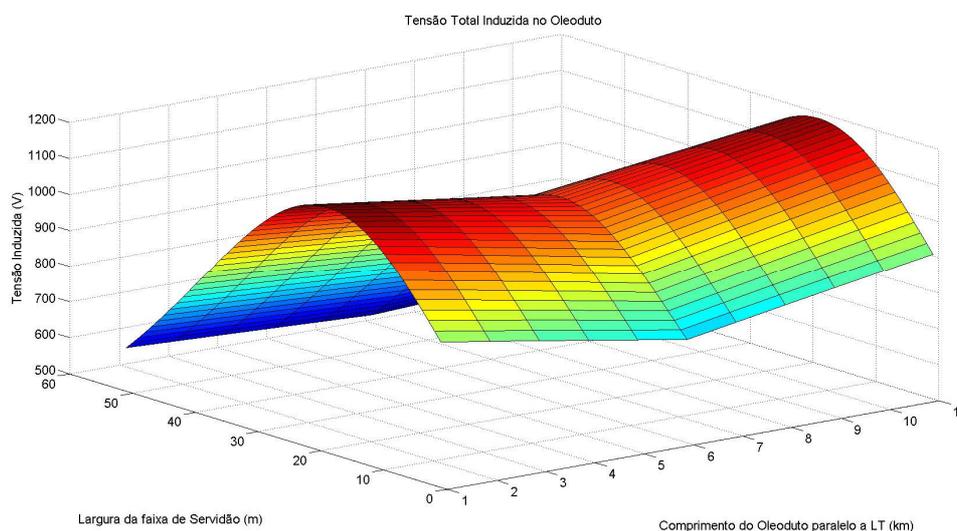


Figura 40 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com 2 condutores por fase.

Fonte: Autoria própria (2012).

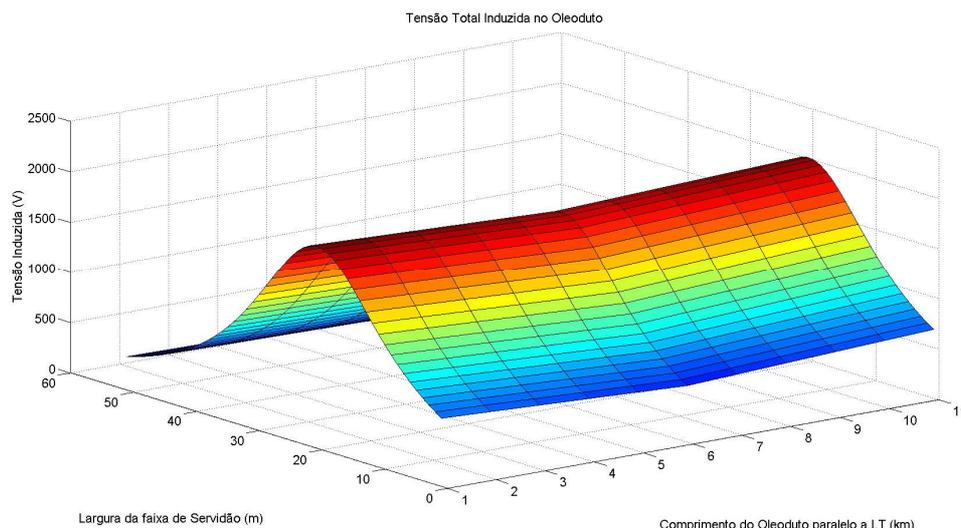


Figura 41 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com sequência de fases ABC/ABC

Fonte: Autoria própria (2012).

A tabela 2 resume os resultados dos três cenários simulados, apresentando os resultados por cada efeito, capacitivo e indutivo.

Tabela 2 – Resultados de tensão máxima e mínima no duto, para a variação de número de condutores e ordem de fases para linha de 230 kV.

Simulação tensão/ tipo de acoplamento	Linha 230 kV		
	1 ABC/CBA - 1 condutor por fase	4 ABC/CBA - 2 condutores por fase	5 ABC/ABC- 1 condutor por fase
V_{max} (V) / (capacitivo)	777,03	1078,49	1900,9
V_{min} (V) / (capacitivo)	424,68	589,44	297,25
V_{max} (V) / (indutivo)	131,96	131,96	131,96
V_{min} (V) / (indutivo)	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2012).

Neste caso somente o efeito capacitivo foi impactado pelas alterações. No caso da simulação 4, onde é proposto uma linha com dois condutores por fase, verifica-se que um numero maior de condutores por fase “cria” uma carga fictícia de dimensões maiores. Essa carga de maior dimensão promove uma alteração na distribuição do campo elétrico de tal forma que se resulta em um maior valor de tensão induzida no oleoduto.

Já na simulação 5, onde é proposto um sistema de sequência de fase ABC/ABC, verifica-se um aumento nos valores de tensão induzida pelo efeito capacitivo devido à diminuição do efeito de cancelamento dos campos quando condutores com diferentes ângulos de fase estão mais próximos uns dos outros. Na sequência ABC/CBA os condutores são distribuídos de tal forma que o condutor de mesma altura terá um defasamento angular. Esse defasamento promove uma redução no efeito capacitivo desse par de condutores, pela soma fasorial destes. Como esse fenômeno é minimizado, na configuração ABC/ABC o efeito capacitivo se mostra mais relevante.

O efeito descrito no parágrafo anterior é facilmente verificado pela diferença do perfil do campo elétrico transversal da faixa de servidão, na profundidade do oleoduto. Os perfis são apresentados nas figuras 42 e 43.

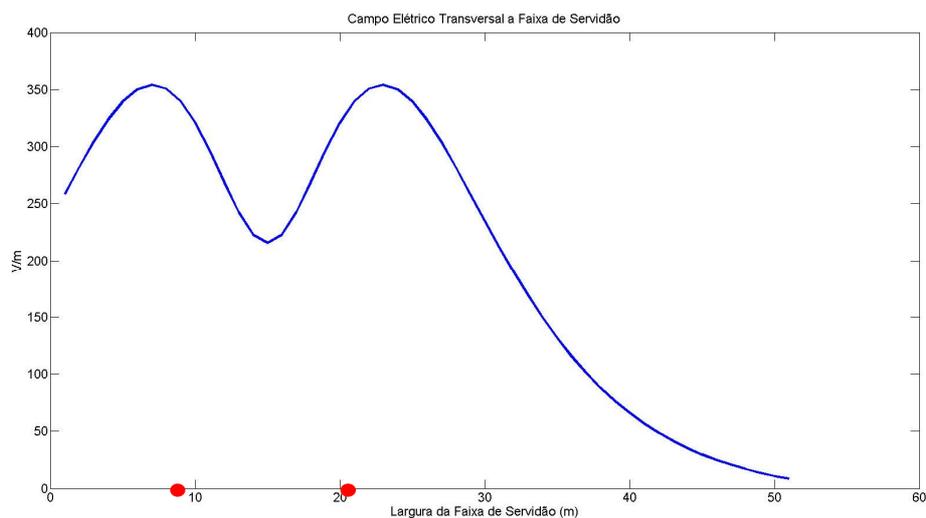


Figura 42 – Campo elétrico transversal a faixa, na profundidade do oleoduto, para a linha de 230 kV com um condutor por fase e sequência ABC/CBA.

Fonte: Autoria própria (2012).

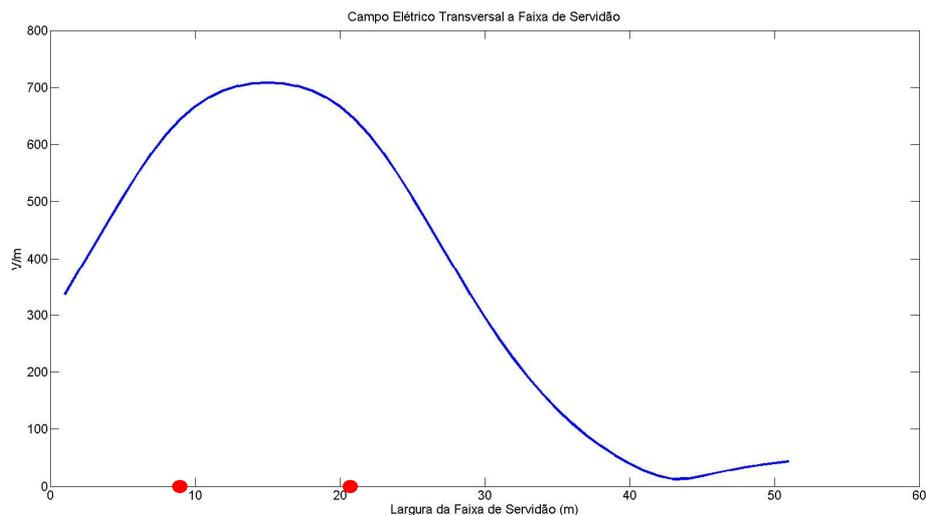


Figura 43 – Campo elétrico transversal a faixa, na profundidade do oleoduto, para a linha de 230 kV com um condutor por fase e sequencia ABC/ABC.
Fonte: Autoria própria (2012).

CASO 3 – COMPRIMENTO DO PARALELISMO

Neste cenário foi alterado o comprimento do oleoduto em paralelo com a linha de 230 kV. Foram simulados trechos de 1 km, 5 km e 10 km.

Conforme descrito no item 2.3, o trecho em paralelismo deve ser, tanto o comprimento onde ocorre o paralelismo entre oleoduto e linha de transmissão, como também o trecho entre duas juntas isolantes. Juntas isolantes são equipamentos utilizados na construção de oleodutos para separação elétrica de trechos do oleoduto. Sua aplicação principal é no sistema de proteção catódica.

Através das equações 22 e 23, é possível obter-se valores para tensão e corrente induzidas, para qualquer ponto no oleoduto em paralelismo.

A figura 44 apresenta o resultado da simulação da tensão induzida no oleoduto pelo acoplamento indutivo para um paralelismo de 1 km. As figuras 45 e 46 apresentam, respectivamente este resultado para o mesmo sistema, com paralelismo de 5 e 10 km respectivamente.

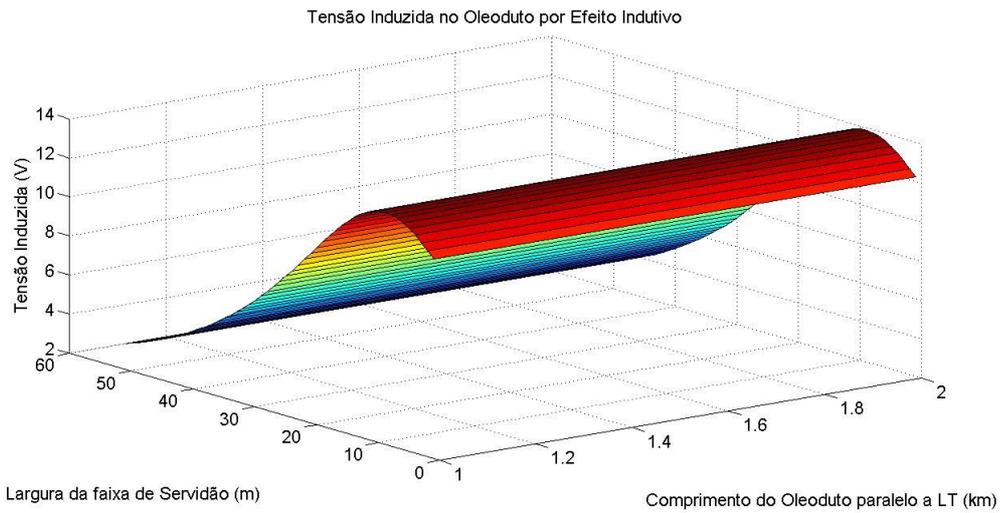


Figura 44 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um paralelismo de 1 km.
Fonte: Autoria própria (2012).

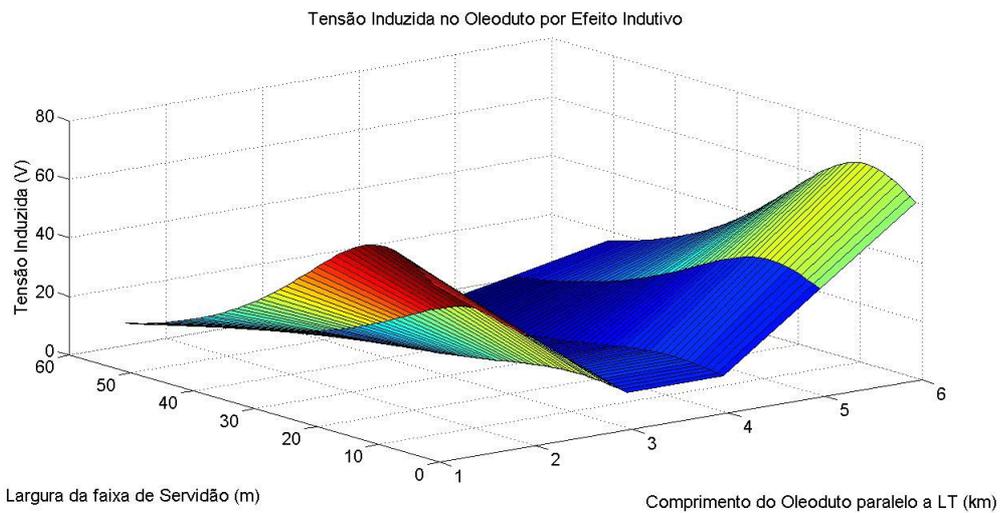


Figura 45 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um paralelismo de 5 km.
Fonte: Autoria própria (2012).

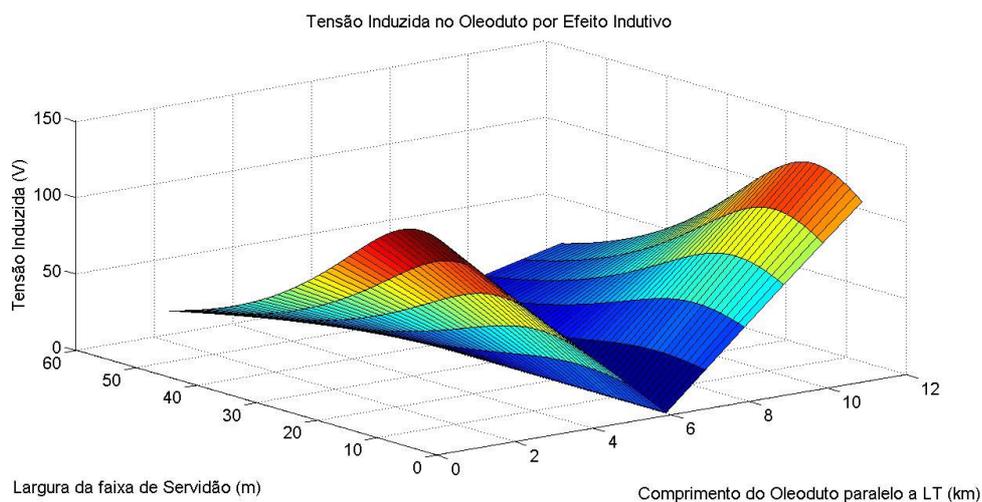


Figura 46 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um paralelismo de 10 km.

Fonte: Autoria própria (2012).

A tabela 3 exibe os valores máximos e mínimos para tensões e correntes no oleoduto devido a força eletromotriz induzida via acoplamento indutivo.

Tabela 3- Tensões e correntes devido o acoplamento indutivo, para a variação do comprimento de paralelismo.

Simulação	Comprimento de paralelismo		
	6 1 km	7 5 km	8 10 km
V_{\max} (V)	13,88	68,16	131,96
V_{\min} (V)	3,318	3,27	0
I_{\max} (A)	1,33	6,57	12,72
I_{\min} (A)	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2012).

Conforme os resultados apresentados nos gráficos das figuras 44, 45 e 46, e nos resultados da tabela 3, pode-se perceber, que as tensões e correntes induzidas aumentam à medida que cresce o trecho de paralelismo.

É provável que situações onde se apresente risco elétrico às pessoas, ocorram em trechos onde o paralelismo seja de alguns quilômetros.

CASO 4 – CORRENTE DE FASE DA LINHA

Semelhante ao caso anterior, o valor da corrente de fase da linha foi alterado para verificar o impacto desta variação na tensão induzida no oleoduto.

É conhecido que o valor da corrente em uma linha de transmissão varia constantemente em decorrência das alterações de carga que ocorrem ao longo de um dia de operação. No entanto, as simulações deste cenário foram consideradas válidas, pois no projeto de uma linha de transmissão, um valor ou faixa de valores, é objetivo para a linha em projeto. Dessa forma, espera-se que a linha opere em tempo considerável nesse valor de corrente.

As figuras 47, 48 e 49 apresentam os resultados dessas simulações quanto a tensão induzida no oleoduto devido o acoplamento indutivo entre os sistemas em paralelismo. Os resultados são para correntes de fase na linha de transmissão, com valor de, respectivamente, 200 A, 1000 A e 2000 A.

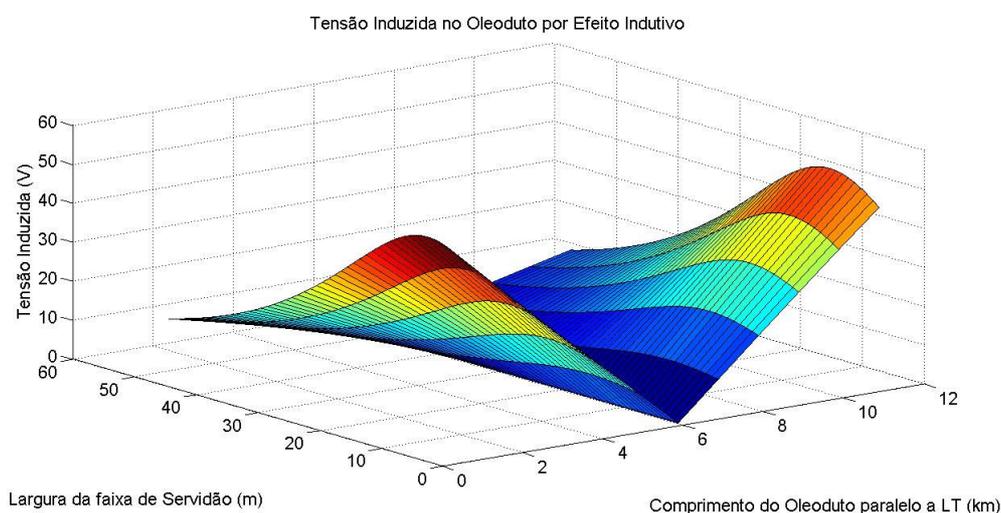


Figura 47 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com corrente de fase de 200 A.

Fonte: Autoria própria (2012).

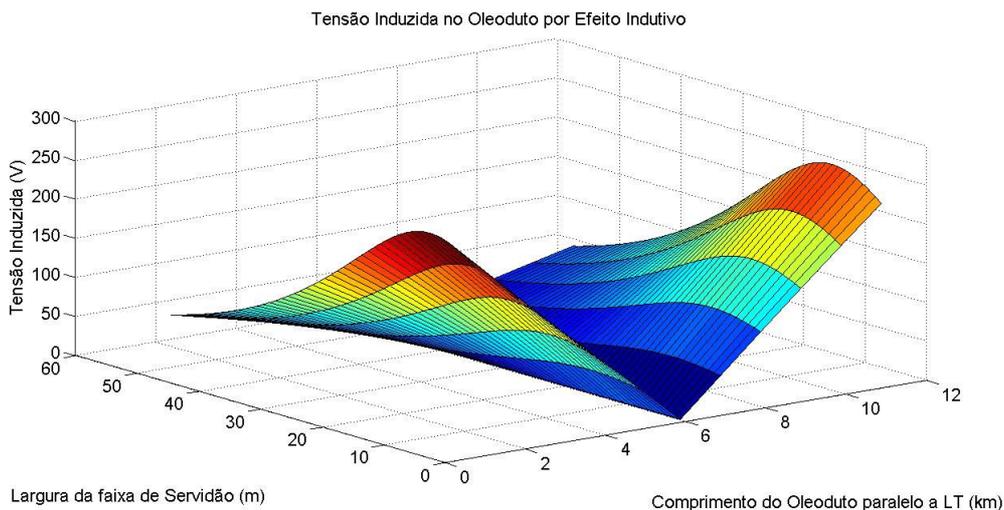


Figura 48 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com corrente de fase de 1000 A.
Fonte: Autoria própria (2012).

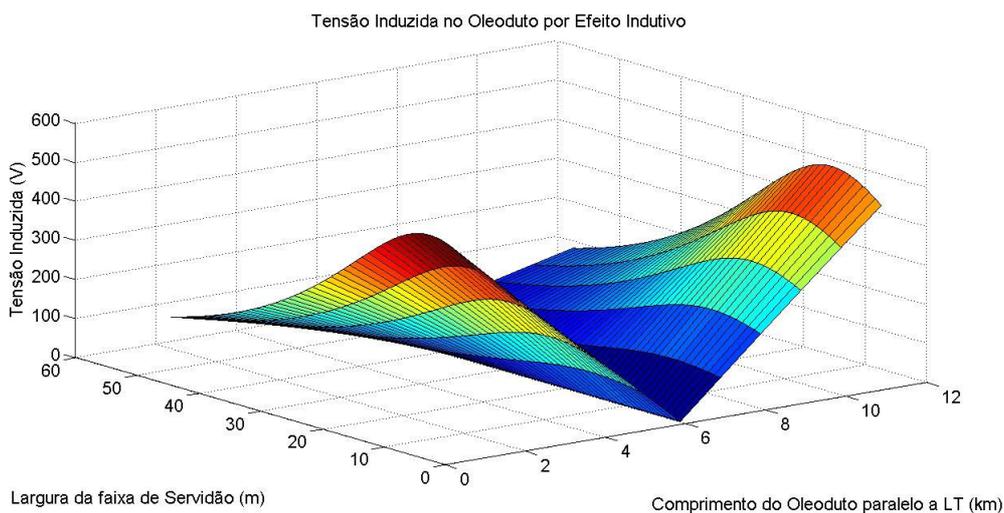


Figura 49 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com corrente de fase de 2000 A.
Fonte: Autoria própria (2012).

A tabela 4 resume os resultados dos três cenários simulados e o cenário considerado como referência (com corrente de linha no valor de 500 A), apresentando valores máximos e mínimos para tensão e corrente, do acoplamento indutivo entre linha de transmissão e oleoduto. Estes valores são observados em toda a região abrangida pelas simulações realizadas com a variação do parâmetro corrente de linha.

Tabela 4- Resultados para a tensão induzida no oleoduto para variados valores de corrente de regime permanente.

Simulação	Corrente de fase na linha de transmissão			
	9 200 A	8 500 A	10 1000 A	11 2000 A
V_{\max} (V)	52,78	131,96	263,93	527,87
V_{\min} (V)	0	0	0	0
I_{\max} (A)	5,09	12,72	25,44	50,88
I_{\min} (A)	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria (2012).

Percebe-se, através dos valores de corrente e tensão máximos na tabela 4, que o aumento de corrente nas fases da linha de transmissão provoca um aumento diretamente proporcional de corrente e tensão no oleoduto de aço. Isto ocorre devido o modelo apresentar o efeito de indução magnética como uma proporcionalidade linear em função da corrente, conforme a equação (21), conhecida como fórmula de Carson-Clem.

Nos gráficos das figuras 44 a 49, é possível visualizar a variação da força eletromotriz induzida através do perfil do gráfico tensão x largura da faixa, onde se apresenta a curva com fácil visualização dos extremos de máxima tensão induzida no oleoduto. A variação de fem induzida se dá de acordo com a equação (21).

Embora o modelo matemático aqui proposto trate apenas do caso particular de uma linha de transmissão em regime permanente, percebe-se pela variação dos resultados para o acréscimo de corrente que, em situação de curto circuito trifásico. Um comportamento similar é esperado, o que pode levar nessas condições, a valores bastante elevados de tensão no oleoduto, e correntes elevadas que podem causar avarias ao sistema de proteção catódica, juntas isolantes, ao metal e ao revestimento, conforme já mencionado por CIGRE (1995, p.19).

3.3 PROPOSTAS DE AÇÕES MITIGADORAS

Considerando os valores de tensão obtidos pelas simulações dos diversos cenários, buscou-se soluções de engenharia que possibilitassem uma diminuição dos valores de tensão induzidas no oleoduto a valores que se mostrem viáveis ao compartilhamento da faixa de servidão por ambas as estruturas.

As soluções propostas nesta seção foram avaliadas apenas do aspecto de engenharia e de atenuação de efeitos eletromagnéticos. As análises de viabilidade técnico e econômico não são escopo deste estudo.

As ações mitigadoras, analisadas em simulações numérico-computacionais, foram as de adoção de blindagem elétrica através de condutores aéreos aterrados, condutores estes posicionados abaixo das fases da linha de transmissão, substituição do material do revestimento do oleoduto e a adoção de malha de terra acima do oleoduto.

3.3.1 Blindagem Elétrica Através de Condutores Aéreos Aterrados

Literaturas específicas de linhas de transmissão, tais como EPRI (2005), mencionam o método de redução dos valores de campo elétrico e magnético a nível do solo com a adoção de uma blindagem elétrica através da adoção de cabos condutores aéreos e aterrados.

Assim sendo, foi simulada a adoção de um condutor aéreo aterrado abaixo das fases mais baixas. A figura 50 representa a geometria do sistema simulado.

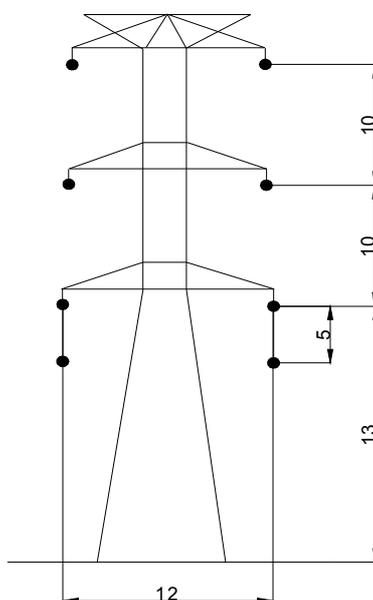


Figura 50 – Linha de circuito duplo vertical com condutores aéreos aterrados.
Fonte: Autoria própria (2012).

Para este estudo foram simulados cabos aéreos aterrados posicionados 5m abaixo das fases mais baixas. Ou seja, na linha de 230 kV com circuito duplo vertical foram simulados condutores posicionados 5 m abaixo das fases C e A e avaliado os resultados dos valores de campo elétrico a nível do solo e tensão induzida no oleoduto.

Foram simulados tanto com 1 condutor abaixo da fase quanto com 2 condutores abaixo das fases, separados por 40 cm. No caso em que há dois condutores abaixo de cada circuito, é considerado que estão em plano horizontal, e o centro deste plano está 5 m abaixo da fase mais próxima do solo na linha de transmissão. Os condutores, para efeito de simulação, foram considerados com a mesma bitola dos cabos da LT.

As figuras 51 e 52 apresentam, respectivamente, os resultados dessas simulações quanto a tensão induzida no oleoduto para 1 condutor aterrado abaixo das fases, e para 2 condutores aterrados abaixo das fases.

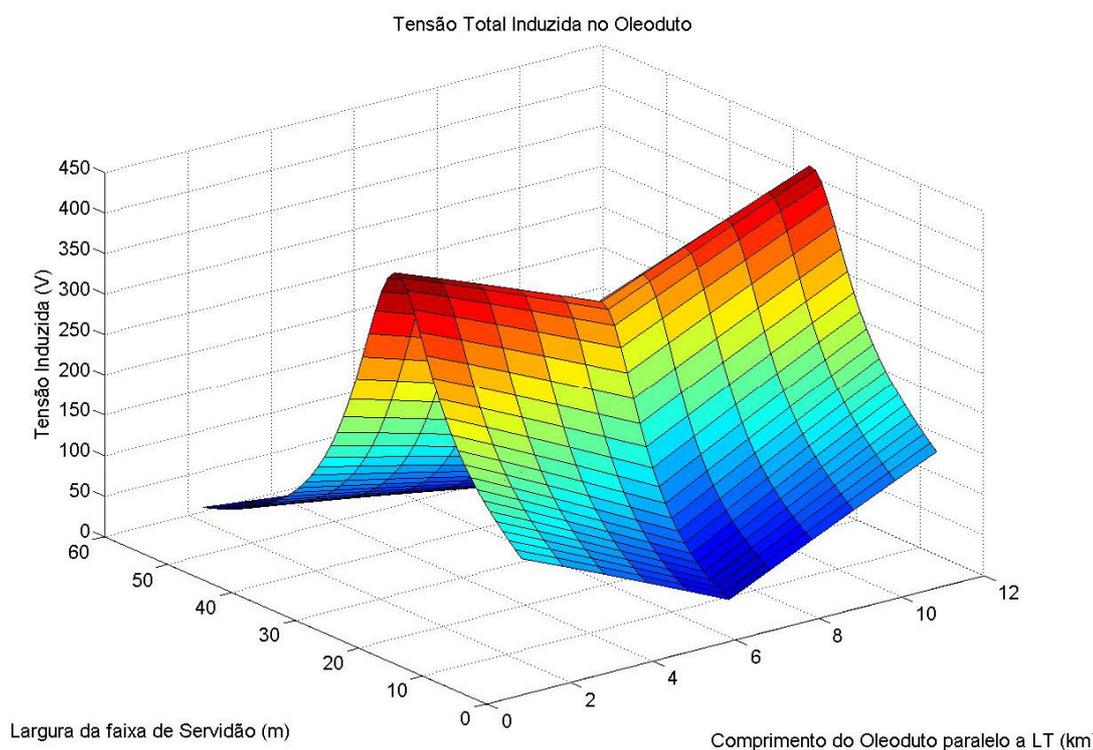


Figura 51 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com um condutor aéreo aterrado 5 m abaixo da fase.

Fonte: Autoria própria (2012).

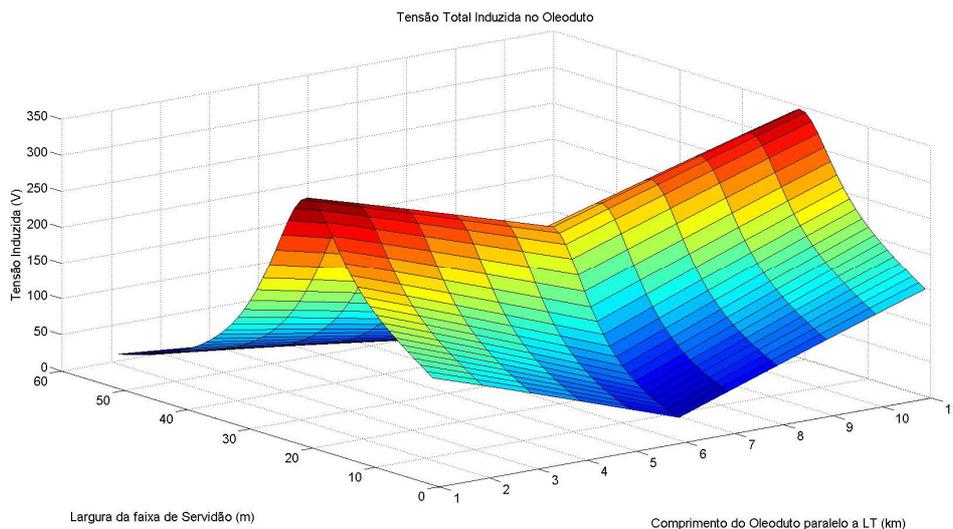


Figura 52 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com dois condutores aéreos aterrados 5 m abaixo da fase.
Fonte: Autoria própria (2012).

Conforme a teoria apresentada no item 2.1.3 e 2.1.4, em face da presença de mais condutores metálicos e paralelos, além do oleoduto e das fases na linha de transmissão, o campo elétrico ao nível do solo deve ser reduzido. Portanto, as tensões induzidas no oleoduto, pelo acoplamento capacitivo com linha de transmissão, são menores como se vê pelos resultados apresentados nas figura 51 e 52. As figuras 53 e 54, apresentam respectivamente, o campo elétrico para o caso de um sistema normal e para um sistema com a adoção de um cabo abaixo de cada circuito. Os pontos vermelhos nas figuras 53 e 54 representam novamente a posição dos circuitos da LT.

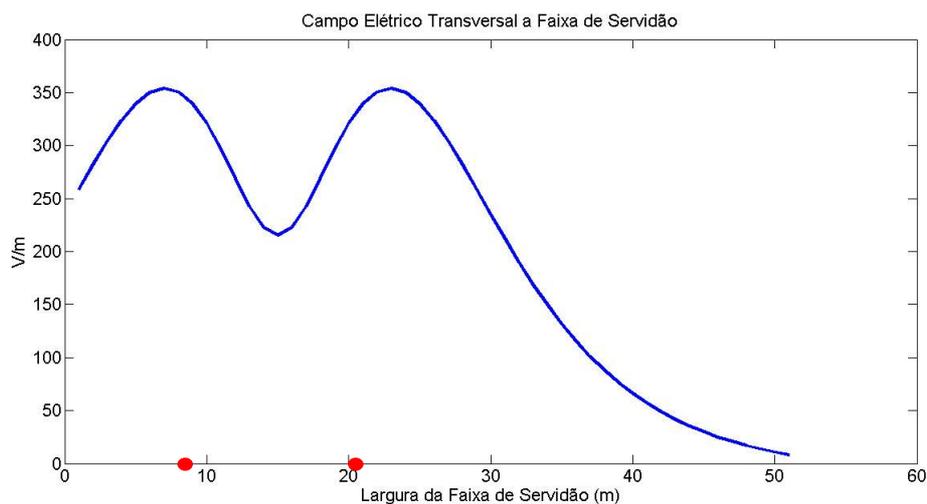


Figura 53 – Campo elétrico devido linha de 230 kV no oleoduto.
Fonte: Autoria própria (2012).

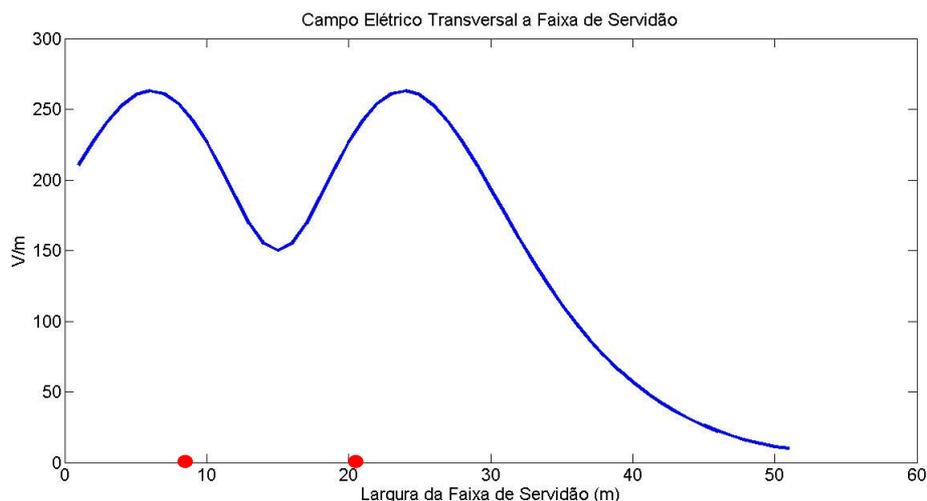


Figura 54 – Campo elétrico devido linha de 230 kV no oleoduto, com 1 condutor abaixo de cada circuito da LT.

Fonte: Autoria própria (2012).

Observa-se que a atenuação do campo elétrico deverá proporcionar uma redução das correntes de curto circuito no acoplamento capacitivo. A figura 55, apresenta a corrente induzida para a situação onde se tem dois condutores abaixo de cada circuito. Comparando-a com a figura 37, que representa a situação sem ação mitigadora, percebe-se considerável redução das correntes, e possibilidade de um projeto de oleoduto mais próximo da linha de transmissão.

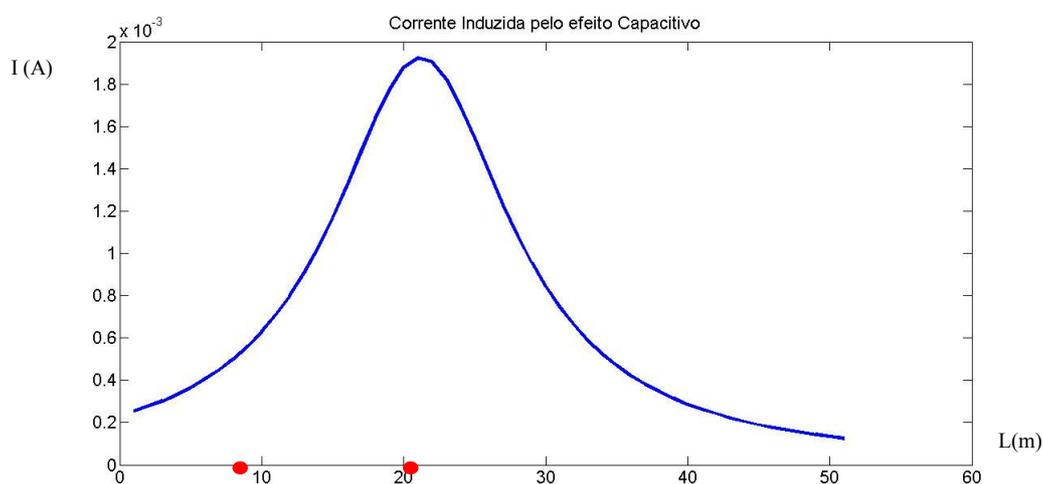


Figura 55 – Corrente de curto circuito no oleoduto devido LT de 230 kV, com 2 condutores abaixo de cada circuito da LT.

Fonte: Autoria própria (2012).

A tabela 5, mostra a variação de tensões e correntes devido o acoplamento capacitivo, antes e depois da adição de condutores para blindagem elétrica.

Tabela 5 - Resultados para potenciais e correntes induzidos no oleoduto antes e após adição de blindagem elétrica por condutores aterrados.

Simulação	Ação mitigadora		
	1 normal	12 com 1 condutor sob fases	13 com 2 condutores sob fases
V_{\max} (V)	777,03	345,51	240,64
V_{\min} (V)	424,68	22,37	15,78
I_{\max} (mA)	6,21	2,76	1,92
I_{\min} (mA)	3,39	0,17	0,12

Fonte: Autoria própria (2012).

3.3.2 Alteração do Material de Revestimento do Oleoduto

Literaturas específicas de projetos de oleodutos, tais como TENARIS (2008), recomendam a utilização de revestimentos de epóxi (*fusion bonded epoxy*) ou em polietileno em tripla camada.

Como mencionado anteriormente, todas as simulações foram realizadas com o revestimento em polietileno. Este tipo de revestimento apresenta um valor mais alto de resistividade elétrica. Essa característica representa uma melhor solução para o sistema de proteção catódica, pois diminui a perda de corrente por pontos não desejados. No entanto, a maior isolamento em relação ao meio externo promove uma maior influência do acoplamento capacitivo, induzindo assim tensões mais elevadas (DIPRA, 1999).

Na busca de soluções que minimizem as tensões induzidas no oleoduto, foi simulada a alteração do revestimento de polietileno para epóxi. O epóxi apresenta uma resistividade elétrica de $1,2 \times 10^{13} \Omega \cdot m$, contra os $10^{15} \Omega \cdot m$ do polietileno.

Essa variação, apesar de apresentar um valor razoável do ponto de vista de resistividade elétrica, resultou em um resultado inexpressivo no valor da tensão induzida no oleoduto. A diferença foi de 0,000098 V na máxima tensão induzida no oleoduto.

Dessa forma, esse tipo de solução mitigadora foi desconsiderada.

3.3.3 Inclusão de Malha de Aterramento Acima do Oleoduto

Com o objetivo de se verificar o efeito da inclusão de uma malha de aterramento paralela a linha e ao oleoduto, realizou-se uma simulação de um sistema como esse. Uma malha de aterramento de 5 condutores de 50 mm^2 , com espaçamento de 1 m entre eles, foi modelada a 5 metros da linha, ou seja, entre a posição 25 e 29 m. A profundidade na qual a malha foi modelada é de 1,5 m, ou seja, 0,5 m acima do oleoduto. Estando todos estes condutores aterrados, são considerados com potencial nulo, para efeito de aplicação do método das cargas.

A presença dessa malha promoveu uma concentração de campo, de tal forma que tem-se um pico de tensão próximo a esta e uma diminuição acentuada por toda a seção transversal da faixa de servidão. Dessa forma, se observa uma redução no valor de tensão induzida no oleoduto.

O perfil de tensão induzida no oleoduto, em qualquer posição da faixa de servidão, é representado pela figura 56.

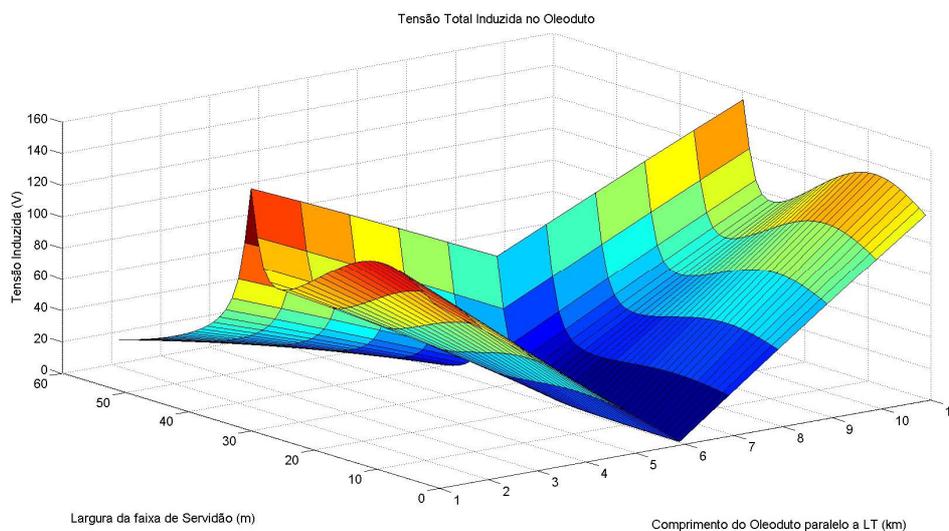


Figura 56 – Tensão induzida ao longo do oleoduto pela linha de 230 kV com malha de aterramento a 5 m da linha e a 1,5 m de profundidade.

Fonte: Autoria própria (2012).

O perfil de corrente induzida pelo efeito capacitivo na seção transversal da faixa, obtido pela equação (26), é apresentado na figura 57. Percebe-se que a houve redução considerável da corrente em relação à situação normal, apresentada na figura 37. A corrente induzida pelo efeito capacitivo, ou corrente de curto circuito, novamente é independente da posição ao longo do comprimento do duto, devido o fato do modelo

considerar uma condição perfeita de paralelismo entre duto metálico e linha de transmissão.

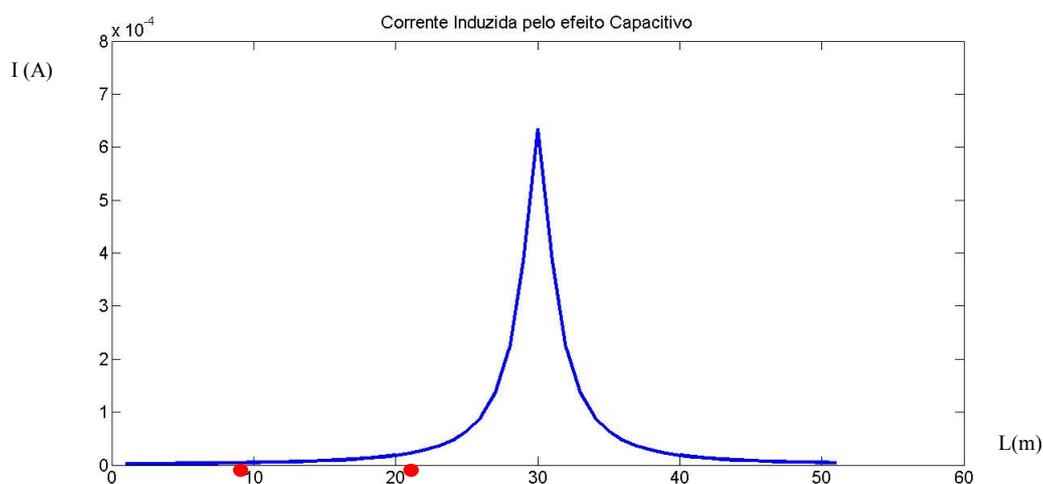


Figura 57 – Tensão induzida pelo efeito capacitivo na seção transversal da faixa de servidão, com malha de aterramento a 5 m da linha e a 1,5m de profundidade.
Fonte: Autoria própria (2012).

A principal observação a ser feita para esse tipo de solução, é que esta promove uma concentração de campo, e por consequência tensão induzida, em uma determinada região da faixa de servidão. Esse efeito propicia que em outros pontos da faixa o oleoduto pode ser instalado com um efeito de tensão induzida minimizado. O motivo deste tipo de resultado, é o mesmo ocorridos para as simulações em 3.3.1, ou seja, os condutores de blindagem elétrica modificam o campo elétrico na posição onde se encontra o duto, reduzindo os efeito capacitivo em questão. A tabela 6 apresenta um resumo dos resultados obtidos através do modelo em MATLAB.

Tabela 6 - Resultados para potenciais e correntes induzidos no oleoduto antes e após adição de blindagem elétrica por condutores aterrados.

Simulação	Ação mitigadora	
	1 normal	14 malha enterrada
V_{\max} (V)	777,03	79,52
V_{\min} (V)	424,68	0,29
I_{\max} (mA)	6,21	0.635
I_{\min} (mA)	3,39	0

Fonte: Autoria própria (2012).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou de forma detalhada os procedimentos de cálculo das interações eletromagnéticas entre uma linha de transmissão e um oleoduto enterrado. Estas interações induzem tensões e correntes no oleoduto, as quais demandam de análise quanto a segurança operacional, tanto de pessoas quanto da instalação, do oleoduto.

Como foi considerado apenas a linha de transmissão em regime normal de operação, basicamente se verificam dois efeitos físicos, que são o acoplamento capacitivo e o indutivo. Conforme os resultados apresentados no capítulo 3, percebe-se que o potencial devido o acoplamento capacitivo entre um oleoduto metálico e uma linha de transmissão é bastante elevado. Além disso, quando se supõe o curto-circuito entre o oleoduto e terra, obtém-se uma corrente muitas vezes superior aos limites admitidos para a segurança de pessoas.

Foram propostas ações que possam mitigar esses efeitos, sendo a que resultou em maior redução foi a hipótese de aplicação de condutores de blindagem elétrica. Esta apresentou solução numérica bastante satisfatória na redução da corrente de curto-circuito, devido à redução do campo elétrico no oleoduto. Contudo recomenda-se que em trabalhos futuros esta proposta seja mais detalhadamente avaliada quanto à viabilidade técnica e econômica deste tipo de medida mitigadora.

Em relação ao acoplamento indutivo entre os sistemas linha de transmissão e oleoduto, demonstrou-se que o comprimento de paralelismo dos dois sistemas e a corrente na linha de transmissão são os fatores preponderantes. Verificou-se pelos cálculos que este efeito pode de fato induzir tensões perigosas à segurança de pessoas em contato com o oleoduto. Além disso, as correntes que escoam devido ao efeito indutivo, tem potencial para provocar avarias em equipamentos do oleoduto, tais como, o sistema de proteção catódica e juntas isolantes, confirmando hipóteses do início deste estudo.

Observa-se que o comprimento do oleoduto é um fator de grande influência na ação da força eletromotriz ao longo de sua extensão, por isso, a adição de juntas isolantes, reduzindo o comprimento de continuidade elétrica do duto metálico, pode ser uma alternativa de mitigação eficaz.

Os resultados gráficos reproduzidos por um modelo matemático-computacional, também se mostram úteis na decisão de projeto, pois se um estudo de

efeitos eletromagnéticos é feito antecipadamente, é possível através dele tomar decisões que dão viabilidade e reduzem os custos do projeto.

Finalmente, sugere-se para trabalhos futuros nesta área do conhecimento, a investigação e modelagem matemática-computacional do acoplamento indutivo em situações de falta da linha de transmissão. Sugere-se também neste caso, o estudo e modelo computacional de acoplamento condutivo, que pode ocorrer em conjunto no caso de uma falta à terra. Propõem-se, ainda, a medição experimental em companhia de gás ou petróleo que tenha instalações próximas à linha de transmissão.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 67 da ANEEL, de 8 de junho de 2004.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2004067.pdf>> acesso em 11 abr. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5422: Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica.** 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12712: Projeto de Sistemas de Transmissão e Distribuição de Gás Combustível.** 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15649: Tubulação para Indústria de Petróleo e Gás Natural.** 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117: Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner).** 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751: Sistemas de Aterramento de Subestações.** 2009.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Indicadores Econômicos.** Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/pec/indeco/Port/ie1-51.xls>>, acessado em 10 abr. 2011.

BESSONOV, L. A. *Eletricidade Aplicada para Engenheiros*, 3. ed. Porto, Portugal: Lopes da Silva, 2000

BORTELS L. et al. **A General Applicable Model for AC Predictive and Mitigation Techniques for Pipeline Networks Influenced by HV Power Lines.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 21, Nº 1, janeiro de 2006.

BURMAN, V. **Transporte Dutoviário de Gás Natural.** Curso de Especialização em Engenharia de Gás Natural. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2004.

CLAYTON P. R., KEITH W. W. AND SYED N. A. **Introduction to Electromagnetic Fields**, WCB/Mc Graw-Hill, 1997.

CPFL. **Orientação Técnica: Ocupação de Faixa de Linha de Transmissão.** 2007. Disponível em: <http://www.cpfl.com.br/LinkClick.aspx?fileticket=Fpa6H6MUvvY%3D&tabid=467&...> < > acesso em 12 set 2011.

CIGRE. **Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines,** 1995.

CORTELETTI, R. C. **Desenvolvimento de Metodologia para Concepção de Traçados de Dutos de Transporte de Gás Natural.** Dissertação de Mestrado. Escola de Minas – UFOP, Ouro Preto, 2009.

DIPRA. **The Effect of Overhead AC Powerlines Paralleling Ductile Iron Pipelines.** Ductile Iron Pipe Research Association, 1999.

DUTRA, A.C.; NUNES, L.P. **Proteção Catódica: Técnica de combate a corrosão,** 3 Edição, 1999.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above,** 2005.

ELETRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **EPRI AC Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above,** 2a. edição, Palo Alto, 1982.

FUCHS, R. D. **Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas.** Vol. 2. Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 1977.

GRCEV, L.; *et. al.* **Induced Voltage in Metallic Pipelines near Power Transmission Lines,** IEEE, Skopje, Macedonia, 2000.

HAYT, W. H., **Eletromagnetismo,** Mc Graw-Hill, 1983.

JOHNK, C. T. A. **Engeneering Electromagnetic Fields and Waves,** Estados Unidos da America, 1988.

LABEGALINI, P. R. *et al.* **Projeto Mecânico das Linhas Aéreas de Transmissão.** 2. ed. Itajubá, 1992.

LIMA. S. Infraestrutura vai investir R\$ 274 bilhões, diz BNDS. **Folha de São Paulo,** São Paulo, 22 fev. 2010. Disponível em:

<<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u697050.shtml>>, acessado em 10 abr. 2011.

MALIK, N. H. **A Review of the Charge Simulation Method and its Applications**, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989.

MARROIG, M. C. *et al.* **Corrosão Associada à Isolamento Térmico de Dutos**. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2003.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Final do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2010, ano base 2009**. Disponível em : <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf> acesso em 10 abr. 2011.

NACE INTERNATIONAL, **Some Safety Considerations for Pipelines Near Overhead**, Nova York, 2005.

NETO, A. O. W. *et al.* **Novo Inibidor de Corrosão para Aplicação em Oleodutos**. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás. 2005.

NÓBREGA, A. C. V. *et al.* **Proposta de um Plano de Monitoramento e Controle de Corrosão para Dutos de Transporte**. 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. 2002.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N-2180: Relatório para a Classificação de Locação de Gasodutos Terrestres**. 2001.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N-2737: Manutenção de Oleoduto e Gasoduto Terrestre**. 2005.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N-2171: Cálculo de Proteção Catódica por Corrente Impressa**. 1985.

NORMA TÉCNICA PETROBRAS. **N-2245: Levantamento de Dados de Campo para Projeto de Proteção Catódica – Dutos Terrestres**. 1998.

NORTH AMERICAN PIPELINES. **Electric Currents of Pipeline Corrosion**, disponível em <http://www.napipelines.com/featured/2009/2009-07-feature-6.html>, em 05/10/2011

ONS. **Carga Própria de Energia.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/historico/carga_propria_de_energia_out.aspx>, acessado em 10 abr. 2011.

ONS. **Glossário de Termos Técnicos.** Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_20/Subm%C3%B3dulo%2020.1_Rev_1.0.pdf>, acessado em 2 set. 2011.

ONS. **Horizonte 2012.** disponível em: http://www.ons.com.br/conheca_sistema/pop/pop_sistema_transmissao.aspx, em 15 out. 2011.

PÁDUA, E. M. M. **Metodologia da Pesquisa: Abordagem Técnico/Prática**, 13^a Edição, 2007.

PINTO G. P. **O Método GPR Aplicado a Localização de Tubulações Utilizadas no Abastecimento de Água na Região Urbana do Município de Belém-Pará.** Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2010.

PPGEE-UFPE. **Eletromagnetismo Avançado.** disponível em <http://www.nomergcpf.xpg.com.br/ee982/aula18.html>, em 02/10/2011

QENERGIA. **Redes de Terra - Resistividade do Solo.** Disponível em : <<http://www.qenergia.pt/148/redes-de-terras---resistividade-do-solo.htm>>, acessado em 23 jan. 2012.

SADIKU M. N. O. **Elementos de Eletromagnetismo.** Companhia Bookman Editora, 3^a. Edição, 2004.

SANTOS, M. G., ET AL. **Influencia de dutos metálicos aéreos na distribuição do campo elétrico gerado por linhas de transmissão operando em regime permanente,** XVIII Congresso Brasileiro de automática, 2010.

SINGER, H.; STEINBIGLER, H.; WEISS, P. **A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields.** Technical University, Munich, Germany. 1973.

SCHIMIEGUEL, C. A.; CASTRO, F. J. R.; PELLICIONI, T. **Estudo do Ambiente Perifético para Inspeção e Mapeamento de Dutos Metálicos Subterrâneos**

SOARES, P. Brasil é o Que menos investe em infraestrutura entre maiores economias. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 22 fev. 2010. Disponível em : <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u697052.shtml>>, acessado em 10 abr. 2011.

SWEDI M. H., JOHAR U. M. **Transmission Line EMF Interference with Buried Pipeline: Essential & Cautions**. International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN , Dhahran, Arábia Saudita, 2003.

TENARIS. **Tubos Para Condução (Line Pipe)**. Catálogo 2008.

ANEXO I

(Programa em MatLab)

```

%.....
%CALCULO COMPLETO
%DUTO COM POSIÇÃO TOTAL
%.....
%%
%Yd=comprimento do duto paralelo a LT, em KM
%Df=Posicao X do oleoduto para grafico 2d
%%
function TensaoDuto=Vd(Yd,Df);
clc;
e0=8.854*10^(-12);
u0=4*pi*10^(-7);
load 'linha.txt'
load 'parametros.txt'
f=parametros(1,1);      %Frequencia da rede (Hz)
Lf=parametros(1,2);    %Largura da faixa (m)
H=parametros(1,3);    %Profundidade do oleoduto (m)
D=parametros(1,4);    %Diametro do oleoduto (m)
er=parametros(1,5);    %Permissividade eletrica relativa do
revestimento do oleoduto
ur=parametros(1,6);    %Permeabilidade magnetica relativa ao oleoduto
ro=parametros(1,7);    %Resistividade do solo
rop=parametros(1,8);   %Resistividade do oleoduto
roc=parametros(1,9);   %Resistividade do revestimento do oleoduto
deltac=parametros(1,10); %Espessura do revestimento do oleoduto
I=parametros(1,11);    %Corrente da linha
e1=parametros(1,12);
e2=parametros(1,13);
[k,l]=size(linha);
ax=[1 0];
az=[0 1];
%Parte 1 - Efeito CAPACITIVO
for (a=1:k)
    if (linha(a,6)==1)
        deq(a,1)=linha(a,5);
        dk(a,1)=deq(a,1)/100;% Transformação de cm para m
        end
        if (linha(a,6)~=1)
            db=(linha(a,7))/sin(pi/(linha(a,6)));
            deq(a,1)=db*((linha(a,6))*(linha(a,5))/db)^(1/(linha(a,6)));
            dk(a,1)=deq(a,1)/100;% Transformação de cm para m
            end
        end
    for (m=1:k)
        for (n=1:k)
            if (m==n)
                Hm=linha(m,2);
                P(m,n)=(1/(2*pi*e0*e1))*log(4*Hm/dk(m,1));
                end
            if (m~=n)
                Simmn=((linha(m,1)-
                linha(n,1))^2+(linha(m,2)+linha(n,2))^2)^(1/2);
                Smn=((linha(m,1)-linha(n,1))^2+(linha(m,2)-
                linha(n,2))^2)^(1/2);
                P(m,n)=(1/(2*pi*e0*e1))*log(Simmn/Smn);
                end
            end
        end
    end
end
%P

```

```

V=zeros(k,1);
for (m=1:k)
    V(m,1)=((linha(m,3))*1000/(3^(1/2)))*exp(-i*(linha(m,4))*pi/180);
end
%V
Q=inv(P)*V;
%Q
Q3=Q*(2*e2/(e1+e2));
if (H>0)
    for (m=1:k)
        a=1;
        for (Xp=0:1:Lf) %definição da precisao de calculo
            AroR=((Xp-(linha(m,1)))*ax)+((H-
(linha(m,2))*az))/(((Xp-(linha(m,1)))^2)+((H-
(linha(m,2)))^2)))^(1/2);
            roR=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2)))^2)^(1/2);
            AroI=((Xp-(linha(m,1)))*ax)+((H-(linha(m,2))*(-
1))*az))/(((Xp-(linha(m,1)))^2)+((H-(linha(m,2)))^2)))^(1/2);
            roI=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2))*(-
1))^2)^(1/2);
            E(a,2*m-1:2*m)=(Q(m,1)/(2*pi*e0*e1))*((AroR/roR)-
(AroI/roI));
            Sk=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2)))^2)^(1/2);
            Ski=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2))*(-
1))^2)^(1/2);
            Vd(a,1)=(Q(m,1)/(2*pi*e0*e1))*log(Sk/Ski);
            a=a+1;
        end
    end
end
if (H<0)
    for (m=1:k)
        a=1;
        for (Xp=0:1:Lf) %definição da precisao de calculo
            AroR=((Xp-(linha(m,1)))*ax)+((H-
(linha(m,2))*az))/(((Xp-(linha(m,1)))^2)+((H-
(linha(m,2)))^2)))^(1/2);
            roR=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2)))^2)^(1/2);
            AroI=((Xp-(linha(m,1)))*ax)+((H-(linha(m,2))*(-
1))*az))/(((Xp-(linha(m,1)))^2)+((H-(linha(m,2)))^2)))^(1/2);
            roI=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2))*(-
1))^2)^(1/2);
            E(a,2*m-1:2*m)=(Q3(m,1)/(2*pi*e0*e2))*((AroR/roR)-
(AroI/roI));
            Sk=((Xp-(linha(m,1)))^2+((linha(m,2))-H)^2)^(1/2);
            Ski=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2))*(-
1))^2)^(1/2);
            Vd(a,1)=(Q3(m,1)/(2*pi*e0*e2))*log(Sk/Ski);
            a=a+1;
        end
    end
end
if (H>0)
    for (Xp=0:1:Lf)
        for (m=1:k)
            Sk=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2)))^2)^(1/2);
            Ski=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2))*(-1))^2)^(1/2);
            V(m,1)=(Q(m,1)/(2*pi*e0*e1))*log(Sk/Ski);
        end
    end
end
end

```

```

if (H<0)
    for (Xp=0:1:Lf)
        for (m=1:k)
            Sk=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2)))^2)^(1/2);
            Ski=((Xp-(linha(m,1)))^2+(H-(linha(m,2))*(-1))^2)^(1/2);
            V(m,1)=(Q3(m,1)/(2*pi*e0*e2))*log(Sk/Ski);
        end
    end

end

[a,b]=size(E);
for (c=1:a)
    Es(c,1)=sum(E(c,1:2:b));
    Es(c,2)=sum(E(c,2:2:b));
    Ermsx(c,1)=((real(Es(c,1)))^2+((imag(Es(c,1))))^2)^(1/2);
    Ermsz(c,1)=((real(Es(c,2)))^2+((imag(Es(c,2))))^2)^(1/2);
    Erms(c,1)=((Ermsx(c,1))^2+(Ermsz(c,1))^2)^(1/2);

end

[a,b]=size(V);
for (c=1:a)
    Vs=sum(V);
end

[a,b]=size(Vd);
for (c=1:a)
    Vdrms(c,1)=((real(Vd(c,1)))^2+(imag(Vd(c,1)))^2)^(1/2);
end

%Es
%Erms
%Vdrms
figure (1)
P1=axes('FontSize',16);
P1=plot(Erms,'linewidth',3);
title('Campo Elétrico Transversal a Faixa de Servidão')
xlabel('Largura da Faixa de Servidão (m)')
ylabel('V/m')

figure (2)
P2=axes('FontSize',16);
P2=plot(Vdrms,'linewidth',3);
title('Tensão Induzida no Oleoduto por Efeito Capacitivo')
xlabel('Largura da Faixa de Servidão (m)')
ylabel('V')

%Parte 2 - Efeito INDUTIVO%
format long
w=2*pi*f;
z11=((rop*u0*ur*w)^0.5)/(pi*D*(2^0.5))+ (u0*w/8);
z12=((rop*u0*ur*w)^0.5)/(pi*D*(2^0.5));
z13=u0*w/(2*pi);
z14=log((3.7*(ro/(w*u0))^0.5)/D);
z1=z11+i*(z12+z13*z14);
y1=((pi*D)/(roc*deltac))+i*(2*pi*f*(e0*er*pi*D/deltac));
gama=(z1*y1)^0.5;

a=0;
for (Xp=0:1:Lf)

```

```

    a=a+1;
    Isc=i*(2*pi*f*(e0*er*pi*D/deltac))*Vd(a,1);
    Iscrms(a,1)=(((real(Isc))^2)+((imag(Isc))^2))^(1/2);
end
%Isc
%Iscrms

a=0;
for (Xp=0:1:Lf)
Y=0;
a=a+1;
    for (y=0:1000:Yd)
        Y=Y+1;
        d1p=(((linha(1,1)-Xp)^2)+((linha(1,2)-H)^2))^(1/2);
        d2p=(((linha(2,1)-Xp)^2)+((linha(2,2)-H)^2))^(1/2);
        d3p=(((linha(3,1)-Xp)^2)+((linha(3,2)-H)^2))^(1/2);
        U=-i*f*(u0*I/2)*(log(d2p*d3p/d1p^2)+i*3^(1/2)*log(d2p/d3p));
        V=(U/(2*gama))*(exp(-gama*((Yd)-y))-exp(-gama*y));
        Vrms(a,Y)=(((real(V))^2)+((imag(V))^2))^(1/2);
    end
end
%Vrms

a=0;
for (Xp=0:1:Lf)
Y=0;
a=a+1;
    for (y=0:1000:Yd)
        Y=Y+1;
        d1p=(((linha(1,1)-Xp)^2)+((linha(1,2)-H)^2))^(1/2);
        d2p=(((linha(2,1)-Xp)^2)+((linha(2,2)-H)^2))^(1/2);
        d3p=(((linha(3,1)-Xp)^2)+((linha(3,2)-H)^2))^(1/2);
        U=-i*f*(u0*I/2)*(log(d2p*d3p/d1p^2)+i*3^(1/2)*log(d2p/d3p));
        I=(U/(2*z1))*(2-exp(-gama*((Yd)-y))-exp(-gama*y));
        Irms(a,Y)=(((real(I))^2)+((imag(I))^2))^(1/2);
    end
end
%Irms

figure(3)
P3=axes('FontSize',16);
P3=surf(Vrms);
title('Tensão Induzida no Oleoduto por Efeito Indutivo')
xlabel('Comprimento do Oleoduto paralelo a LT (km)')
ylabel('Largura da faixa de Servidão (m)')
zlabel('Tensão Induzida (V)')

[a,b]=size(Vrms);
[c,d]=size(Vdrms);

for(e=1:b)
    Vtotal(:,e)=Vdrms+Vrms(:,e);
end
%Vtotal
figure(4)
P4=axes('FontSize',16);
P4=surf(Vtotal);
title('Tensão Total Induzida no Oleoduto')
xlabel('Comprimento do Oleoduto paralelo a LT (km)')
ylabel('Largura da faixa de Servidão (m)')

```

```
zlabel('Tensão Induzida (V)')
```

```
Vtotalmax=max(max(Vtotal))      %tensao total
Vtotalmim=min(min(Vtotal))
Vdrmsmax=max(max(Vdrms))        %tensao por efeito capacitivo
Vdrmsmin=min(min(Vdrms))
Vrmsmax=max(max(Vrms))          %tensao por efeito indutivo
Vrmsmin=min(min(Vrms))
Iscrmsmax=max(max(Iscrms))      %Corrente por efeito Capacitivo
Iscrmsmin=min(min(Iscrms))
Irmsmax=max(max(Irms))          %Corrente por efeito indutivo
Irmsmin=min(min(Irms))
```

```
figure (5)
Vrms2d=Vrms (Df, :);
Vrms2d=Vrms2d';
P5=axes('FontSize',16);
P5=plot(Vrms2d,'linewidth',3);
title('Tensão longitudinal no Oleoduto a 25m da LT')
```

```
figure (6)
P6=axes('FontSize',16);
P6=plot(Iscrms,'linewidth',3);
title('Corrente Induzida pelo efeito Capacitivo')
```

```
figure (7)
P7=axes('FontSize',16);
P7=surf (Irms);
title('Corrente Induzida no Oleoduto pelo efeito Indutivo')
xlabel('Comprimento do Oleoduto paralelo a LT (km)')
ylabel('Largura da faixa de Servidão (m)')
zlabel('Corrente Induzida (A)')
```