UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

LUCIANO GABRIEL DE OLIVEIRA COELHO

CÁLCULO DAS INFLUÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS EM DUTOS TERRESTRES

Niterói
2019

LUCIANO GABRIEL DE OLIVEIRA COELHO

CÁLCULO DAS INFLUÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS EM DUTOS TERRESTRES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Energia Elétrica e de Telecomunicações.

Orientadores
Prof. Guilherme Gonçalves Sotelo, D.Sc.
Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

Niterói
2019

C672c Coelho, Luciano Gabriel de Oliveira
Cálculo das Influências de Linhas de Transmissão Aéreas em Dutos Terrestres / Luciano Gabriel de Oliveira Coelho ; Guilherme Gonçalves Sotelo, orientador ; Antonio Carlos Siqueira de Lima, coorientador. Niterói, 2019.
130 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2019.m.02949501761

1. Sistema de energia elétrica. 2. Duto. 3. Interação eletromagnética. 4. Produção intelectual. I. Sotelo, Guilherme Gonçalves, orientador. II. Lima, Antonio Carlos Siqueira de, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

LUCIANO GABRIEL DE OLIVEIRA COELHO

CÁLCULO DAS INFLUÊNCIAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREAS EM DUTOS TERRESTRES

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Antonio Carlos Siqueira de Lima - Coorientador
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. Dr Sergio Gomes Junior
Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Dr. Rodolfo Antônio Ribeiro de Moura
Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ

Niterói
(ago/2019)

DEDICATÓRIA

Primeiramente, quero dedicar este trabalho a Deus, que orienta e guia meus passos em tudo aquilo que faço. Sem Ele, nada seria possível em minha vida.

Quero dedicar, também, aos meus pais, à minha noiva e a todos aqueles que sempre acreditaram em mim e me incentivaram a concluir este trabalho e alcançar mais um importante degrau em minha caminhada.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por tudo que fez e que continua fazendo para a concretização deste trabalho.

Aos meus pais e à minha noiva pelo apoio e incentivo para que pudesse perseverar e seguir em frente na conclusão desta dissertação.

Aos meus orientadores, Professores Dr. Guilherme Gonçalves Sotelo e Dr. Antonio Carlos Siqueira de Lima, pela seriedade e firmeza em exigir todo o empenho necessário para que este trabalho fosse concretizado.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, da Universidade Federal Fluminense, que puderam passar seus conhecimentos de maneira clara e sólida, contribuindo de forma direta e indireta para a conclusão deste trabalho.

À IEC - Instalações e Engenharia de Corrosão pela oportunidade de desenvolver-me profissionalmente nos pacotes de software da SESTECH utilizados neste trabalho.

Aos colegas de trabalho Eng.º Laerce de Paula Nunes e Fernando Borges Barboza Nascimento pelas contribuições acerca dos desdobramentos dos estudos para avaliação das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários no Brasil e das ilustrações, respectivamente, apresentadas neste trabalho.

Aos amigos que estiveram presentes durante todo o curso e que, de uma forma ou de outra, ajudaram nesta realização.

“Tudo o que a sua mão encontrar para fazer, faça-o com todo o seu coração”.

Jesus Cristo

RESUMO

Sistemas de energia elétrica podem comprometer a integridade de estruturas metálicas de sistemas dutoviários, tais como: gasodutos, oleodutos, minerodutos etc, bem como colocar em risco a segurança do pessoal envolvido nos trabalhos de construção, operação ou manutenção de dutos e de seus equipamentos. Os níveis máximos de tensões indesejáveis em um duto e de tensões de passo e de toque devem estar de acordo com os valores estabelecidos em norma, que determina, ainda, que as avaliações das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários devem ser realizadas por meio de simulação computacional; entretanto, sem apresentar detalhes de como fazer. Ocorre que o número de programas computacionais disponíveis comercialmente é muito limitado e seus valores de licenciamento e renovação anual extremamente dispendiosos, o que pode inviabilizar o atendimento a um possível aumento de demanda gerado pelo o que é exigido normativamente. Nesse contexto, este trabalho apresenta e implementa computacionalmente alguns dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, considerando nos cálculos linhas de transmissão aéreas como sistemas interferentes e dutos terrestres como sistemas interferidos. Um estudo de caso contemplando situações típicas de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários é apresentado neste trabalho, a fim de comparar os resultados obtidos através dos programas computacionais elaborados com os fornecidos pelos métodos empregados em programas computacionais comerciais, bem como ressaltar a importância de dispor em um estudo de todo o traçado do duto interferido, devido às diferenças de resultado quando apenas um trecho do mesmo é considerado; não abordadas no referencial teórico consultado.

Palavras-chave: Sistemas de Energia Elétrica, Sistemas Dutoviários, Influências Indutiva e Condutiva.

ABSTRACT

Electric power systems may jeopardize the integrity of the buried metal structures of pipeline systems, such as: gas pipelines, oil pipelines, ore pipelines etc, as well as endangering personal safety during construction, operation or maintenance of pipelines and their equipment. The maximum levels of undesirable voltages on a pipeline and step and touch voltages must comply with the values specified in standard, which still determines that evaluations of influences from electric power systems on pipeline systems must be performed by means of computer simulation; however, it does not provide details of how to do it. It occurs that the number of commercially available computer programs is very limited and their licensing and annual renewal fees are extremely costly, which may make it impossible to meet to a possible increase in study demand by what is normatively required. In this context, this work presents and computationally implements some of the general methods to estimate the levels of inductive and conductive influences from electric power systems on pipeline systems, considering overhead transmission lines such as interfering systems and buried pipelines as interfered systems. A case study considering typical approach situations between electric power systems and pipeline systems is presented in this work, in order to compare the results obtained through computer programs elaborated with those provided by methods used in commercial computer programs, as well as to emphasize the importance of having all interfered pipeline path in a study, due to differences in results when only its one part is considered; that were not addressed in the in the theoretical reference consulted.

Keywords: Electric Power Systems, Pipeline Systems; Inductive and Conductive Influences.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Ciclo de vida do metal. 3
Figura 2: Metodologia adotada. 7
Figura 3: Influências de sistemas de energia elétrica e seus efeitos em sistemas dutoviários. 10
Figura 4: Influência indutiva. 11
Figura 5: Influência condutiva. 12
Figura 6: Influência capacitiva. 12
Figura 7: Impedâncias do corpo humano em função do caminho da corrente elétrica. 29
Figura 8: Circuito de célula π para um subsegmento ao longo do duto. 31
Figura 9: Sistema considerado na aproximação de Carson-Clem. 36
Figura 10: Verificação da impedância mútua devido à simplificação da fórmula de Carson: (a) em função da distância de separação; (b) em função da frequência. 36
Figura 11: Geometria do problema de Lucca. 37
Figura 12: Sistema considerado por Ametani. 40
Figura 13: Circuitos de célula π para *n* subsegmentos de duto. 43
Figura 14: Elevação de potencial no solo. 44
Figura 15: Conceito de tensão de passo. 49
Figura 16: Conceito de tensão de toque. 49
Figura 17: Arranjo físico das regiões de aproximação entre os sistemas elaborado para o estudo de caso. 55
Figura 18: Silhueta da torre típica de projeto. 58
Figura 19: Sistema de aterramento típico das torres. 58
Figura 20: Croqui do arranjo físico da região de paralelismo. 60
Figura 21: Diagrama de correntes de curto-circuito. 60
Figura 22: Croqui do arranjo físico do caso de cruzamento. 61
Figura 23: Diagrama de correntes de curto-circuito. 61
Figura 24: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$). 63
Figura 25: Caso 02 - Cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$). 63
Figura 26: Considerando a extensão total do duto ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$). 63
Figura 27: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$). 65
Figura 28: Caso 02 - Cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$). 65
Figura 29: Considerando a extensão total do duto ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$). 66
Figura 30: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 68
Figura 31: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 68
Figura 32: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}). 68
Figura 33: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}). 68
Figura 34: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 70
Figura 35: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 70
Figura 36: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}) 70
Figura 37: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 70
Figura 38: Caso 01 - paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 71

Figura 39: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 71
Figura 40: Caso 01 - paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}). 72
Figura 41: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}). 72
Figura 42: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 73
Figura 43: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_SES}). 73
Figura 44: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}). 73
Figura 45: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$ e I_{sh_ATP}). 73
Figura 46: Caso 01 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-17)..... 75
Figura 47: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-17)..... 75
Figura 48: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-17). 75
Figura 49: Caso 02 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-37)..... 76
Figura 50: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-37)..... 76
Figura 51: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-37). 76
Figura 52: Caso 01 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-17)..... 78
Figura 53: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-17)..... 78
Figura 54: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-17). 78
Figura 55: Caso 02 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-37)..... 79
Figura 56: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-37)..... 79
Figura 57: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-37). 79
Figura 58: Fluxograma do programa para cálculo de influência indutiva. 92
Figura 59: Fluxograma do programa para cálculo de influência condutiva. 101
Figura 60: Fluxograma do programa para cálculo de tensão de passo. 106
Figura 61: Curto-circuito monofásico na T-17. 112
Figura 62: Curto-circuito monofásico na T-37. 112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resistência do corpo humano à passagem da corrente elétrica. 30
Tabela 2: Valores aproximados de corrente alternada a 60 Hz que afetam seres humanos. 30
Tabela 3: Resistividade do material de recobrimento (ρ_c). 50
Tabela 4: Casos de aproximação estudados. 56
Tabela 5: Características físicas do duto terrestre. 56
Tabela 6: Pontos de afloramento do duto terrestre. 56
Tabela 7: Características da linha de transmissão aérea. 57
Tabela 8: Dados dos condutores fase e cabo para-raios da linha de transmissão aérea. 57
Tabela 9: Correntes de curto-circuito monofásico na T-17. 60
Tabela 10: Correntes de curto-circuito monofásico na T-37. 61
Tabela 11: Métodos x programas computacionais comerciais / fórmulas consideradas. 62
Tabela 12: Máximas tensões C.A. induzidas no duto interferido ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$). 64
Tabela 13: Desvios Caso 01 - $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$. 64
Tabela 14: Desvios Caso 02 - $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$. 65
Tabela 15: Desvios extensão total - $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$. 65
Tabela 16: Máximas tensões C.A. induzidas no duto interferido ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$). 66
Tabela 17: Desvios Caso 01 - $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$. 67
Tabela 18: Desvios Caso 02 - $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$. 67
Tabela 19: Desvios extensão total - $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$. 67
Tabela 20: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido. 69
Tabela 21: Desvios Caso 01 / extensão total - $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$. 69
Tabela 22: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido. 71
Tabela 23: Desvios Caso 02 / extensão total - $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$. 71
Tabela 24: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido. 72
Tabela 25: Desvios Caso 01 / extensão total - $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$. 72
Tabela 26: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido. 74
Tabela 27: Desvios Caso 02 / extensão total - $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$. 74
Tabela 28: Máximas tensões de passo ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$). 75
Tabela 29: Máximas tensões de passo ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$). 77
Tabela 30: Máximas tensões de passo ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$). 78
Tabela 31: Máximas tensões de passo ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$). 80
Tabela 32: Máximas tensões de passo admissíveis. 81
Tabela 33: Máximas tensões de toque admissíveis. 81
Tabela 34: Desvios parte do traçado x extensão total do duto – influência indutiva. 81
Tabela 35: Desvios parte do traçado x extensão total do duto – influência condutiva. 82

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{rh}	Raio do modelo hemisfério para o pé humano (0,106 m)
a	Separação horizontal entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto (m)
A_e	Área efetiva (m^2)
B	Campo vetorial densidade de campo magnético (Wb/m^2)
C	Fator de redução de tensões de passo e de toque máximas admissíveis
D_d	Diâmetro do duto (m)
D_e	Profundidade de retorno pelo solo equivalente (Ω.m)
$D_{f/pr,d}$	Distância entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto (m)
E	Campo vetorial intensidade de campo elétrico (V/m)
f	Frequência (Hz)
GPR	Elevação de potencial do solo (*Ground Potential Rise*) em relação a um subsegmento remoto de duto (V)
H	Separação vertical entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto (m)
h_1	Altura do condutor fase/cabo para-raios (m)
h_2	Altura do condutor/profundidade do subsegmento de duto (m)
h_c	Espessura da camada de cobertura (m)
$\dot{I}_a$	Fasor da corrente elétrica da fase A (A)
$\dot{I}_b$	Fasor da corrente elétrica da fase B (A)
$\dot{I}_c$	Fasor da corrente elétrica da fase C (A)
$\dot{I}_f$	Fasor da corrente elétrica no condutor fase (A)
I_{chcd}	Corrente máxima de não fibrilação (A)
$\dot{I}_{i_pr}$	Corrente elétrica circulante no i-ésimo vão do cabo para-raios (A)
I_{sh_torre}	Corrente injetada no solo através do aterramento da torre (A)
Im	Parte imaginária de um número complexo
j	$\sqrt{-1}$
J	Densidade de corrente em um volume (A/m^2)
k_s	Constante de propagação do solo
K_{sf}	Coeficiente de blindagem do cabo para-raios (*screening factor*)
P	Expansão assintótica da parte real da correção de Carson

Q	Expansão assintótica da parte imaginária da correção de Carson
r	Coeficiente de correção da expansão assintótica de Carson
R_{12}	Distância entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto (m)
$\bar{R}_{12}$	Distância entre condutor fase/cabo para-raios e a imagem do subsegmento de duto (m)
R_{ch}	Resistência do corpo humano (Ω)
Re	Parte real de um número complexo
r_r	Resistência específica do revestimento do duto (Ω.m)
$\bar{S}$	Distância entre condutor fase/cabo para-raios e a imagem do subsegmento de duto (m)
t	Tempo (s)
$\dot{V}_d$	Fasor da tensão C.A. induzida no subsegmento de duto (V)
$V_{p_máx}$	Tensão de passo máxima admissível (V)
$V_{t_máx}$	Tensão de toque máxima admissível (V)
$x_{at,d}$	Distância entre o aterramento da torre e subsegmento de duto (m)
x'	Ângulo entre condutor fase/cabo para-raios e plano vertical (rad)
x_1	Abscissa do condutor fase/cabo para-raios (m)
x_2	Abscissa do subsegmento de duto (m)
y	Separação horizontal entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto (m)
$\bar{y}$	Condutância de retorno pelo solo [$(\Omega.m)^{-1}$]
y_1	Ordenada do condutor fase/cabo para-raios (m)
y_2	Ordenada do subsegmento de duto (m)
Y_d	Admitância do subsegmento de duto (S)
$Z_{a,d}$	Impedância mútua entre o condutor da fase A e o subsegmento de duto (Ω/km)
$Z'_{a,d}$	Impedância mútua entre o condutor da fase A e o subsegmento de duto, considerando o efeito de blindagem do cabo para-raios (Ω/km)
$Z_{b,d}$	Impedância mútua entre o condutor da fase B e o subsegmento de duto (Ω/km)
$Z'_{b,d}$	Impedância mútua entre o condutor da fase B e o subsegmento de duto, considerando o efeito de blindagem do cabo para-raios (Ω/km)
$Z_{c,d}$	Impedância mútua entre o condutor da fase C e o subsegmento de duto (Ω/km)
$Z'_{c,d}$	Impedância mútua entre o condutor da fase C e o subsegmento de duto, considerando o efeito de blindagem do cabo para-raios (Ω/km)

Z_d	Impedância série do subsegmento de duto (Ω/m)
$Z_{f,d}$	Impedância mútua entre condutor fase e subsegmento de duto (Ω/km)
$Z'_{f,d}$	Impedância mútua entre condutor fase e subsegmento de duto, considerando o efeito de blindagem do cabo para-raios (Ω/km)
$Z_{f,pr}$	Impedância mútua entre condutor fase e cabo para-raios (Ω/km)
$Z_{f/pr,d}$	Impedância mútua entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto (Ω/km)
$Z_{i_pr,d}$	Impedância mútua entre o i-ésimo vão do cabo para-raios e o subsegmento de duto (Ω/km)
Z_{pr}	Impedância própria do cabo para-raios (Ω/km)
$Z_{pr,d}$	Impedância mútua entre o cabo para-raios e subsegmento de duto (Ω/km)
Z_s	Impedância de retorno pelo solo (Ω.m)
γ	Constante de propagação [$(m)^{-1}$]
δ_r	Espessura do revestimento do duto (m)
ε_0	Permissividade elétrica do espaço livre (8,854 x 10^{-12} F/m)
ε_r	Permissividade elétrica relativa do revestimento do duto (p.u.)
λ	Condutividade do solo (S/cm^3)
θ	Ângulo entre condutor fase/cabo para-raios e a imagem do condutor/profundidade do subsegmento de duto (rad)
μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre (4π x 10^{-7} H/m)
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do duto (p.u.)
ρ_1	Resistividade do solo (Ω.m)
ρ_c	Resistividade da camada de cobertura (Ω.m)
ρ_d	Resistividade do duto (Ω.m)
ρ_r	Resistividade do revestimento do duto (Ω.m)
ρ_s	Resistividade do solo (Ω.m)
σ_s	Condutividade do solo [$(\Omega.m)^{-1}$]
Φ	Potencial elétrico (V)
ω	Frequência angular (rad/s)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
Cigre	*Conseil International des Grands Réseaux Électriques*
CSM	*Charge Simulation Method*
FDM	*Finite Difference Method*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronic Engineers*
ISO	*International Organization for Standardization*
MNA	*Modified Nodal Analysis*
NACE	*National Association of Corrosion Engineers*
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
TLOSSY	*Lossy Transmission Line*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO 1
1.2. SITUAÇÃO PROBLEMA 3
1.3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO 4
1.4. OBJETIVOS DO TRABALHO 5
1.4.1. Objetivo geral 5
1.4.2. Objetivos específicos 6
1.5. DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA 6
1.6. METODOLOGIA 7
1.7. PRODUÇÃO CIENTÍFICA 8
1.8. CONTRIBUIÇÕES 8
1.9. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO 9
2. INFLUÊNCIAS DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DUTOVIÁRIOS: ESTADO DA ARTE 10
2.1. INFLUÊNCIAS PRODUZIDAS POR SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA 10
2.2. VISÃO GERAL SOBRE A BIBLIOGRAFIA NA ÁREA 13
2.2.1. Literatura nos últimos anos 14
2.3. SEGURANÇA DE PESSOAS 27
3. MÉTODOS GERAIS PARA SE ESTIMAR OS NÍVEIS DE INFLUÊNCIA 31
3.1. INFLUÊNCIA INDUTIVA 31
3.1.1. Cálculo da impedância série e admitância do duto 32
3.1.1.1. Impedância série 32
3.1.1.2. Admitância 32
3.1.2. Impedância mútua entre linha de transmissão aérea e duto terrestre 33
3.1.2.1. Fórmula aproximada de Carson-Clem 34
3.1.2.2. Fórmula aproximada de Lucca 36
3.1.2.3. Fórmula aproximada de Ametani 39
3.1.3. Cálculo da tensão C.A. induzida 43
3.2. INFLUÊNCIA CONDUTIVA 43
3.3. AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DUTOVIÁRIOS 45
3.3.1 Critérios adotados 45
3.3.1.1. Condição de operação normal 45
3.3.1.2. Condição de curto-circuito 45
3.3.1.3. Avaliação da segurança de pessoas 45
3.3.2. Dados necessários à elaboração dos estudos 46
3.3.2.1. Sistema dutoviário 46
3.3.2.2. Sistema de energia elétrica 46
3.3.2.3. Pontos de aproximação 47
3.3.2.4. Definição dos arranjos físicos entre os sistemas 47
3.3.3. Determinação de tensões de passo e de toque 47

3.3.3.1. Regime de operação normal 48
3.3.3.2. Condição de curto-circuito 48
3.3.4. Programas computacionais comerciais 50
3.3.4.1. SESTLC Pro 51
3.3.4.2. Right of Way Pro (ROW) 51
3.3.4.3. CDEGS 52
3.3.4.4. Elsyca IRIS 52
3.3.4.5. Programas computacionais para uso próprio 53
4. ESTUDO DE CASO 54
4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS 54
4.2. SITUAÇÕES DE APROXIMAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS 55
4.2.1. Casos de aproximação estudados 55
4.3. DADOS CONSIDERADOS NO ESTUDO DE CASO 56
4.3.1. Sistema interferido 56
4.3.2. Sistema interferente 57
4.4. SIMULAÇÃO DOS CASOS 58
4.4.1. Metodologia adotada 58
4.4.2. Caso 01 - Paralelismo 59
4.4.3. Caso 02 - Cruzamento 60
5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E ANÁLISE 62
5.1. RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES 62
5.1.1. Influência indutiva 62
5.1.1.1. Influência indutiva para resistividade do solo de 100 Ω.m 63
5.1.1.2. Influência indutiva para resistividade do solo de 1000 Ω.m 65
5.1.2. Influência condutiva 67
5.1.2.1. Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$) 68
5.1.2.2. Caso 02 - cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$) 69
5.1.2.3. Caso 01 - paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$) 71
5.1.2.4. Caso 02 - cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$) 73
5.1.2.5. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 01, $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$) 74
5.1.2.6. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 02, $\rho = 100\ \Omega.\mathrm{m}$) 76
5.1.2.7. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 01, $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$) 77
5.1.2.8. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 02, $\rho = 1000\ \Omega.\mathrm{m}$) 79
5.1.3. Avaliação de riscos de tensões de passo e de toque 80
5.1.3.1. Máximas tensões de passo e toque admissíveis 80
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS 81
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 83
6.1. CONCLUSÕES 83
6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 86
APÊNDICE 92
APÊNDICE A. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS ELABORADOS 92
A.1. Cálculo da influência indutiva 92
A.2. Cálculo da influência condutiva 101

A.3. Cálculo da tensão de passo 106
APÊNDICE B. CURTOS-CIRCUITOS MODELADOS NO ATPDRAW 112
B.1. Curto-circuito monofásico na T-17 112
B.2. Curto-circuito monofásico na T-37 112

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Nas últimas décadas, o aumento da concentração de sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários se tornou uma preocupação entre empresas dos respectivos setores e órgãos competentes, pois a proximidade de ambos resulta em tensões indesejáveis nas estruturas interferidas (gasodutos, oleodutos, minerodutos etc), que colocam em risco a integridade das mesmas e, por conseguinte, podem levar a falhas devido ao surgimento de processos corrosivos decorrentes de danos causados ao revestimento externo destas estruturas. Impedir que processos de corrosão venham a ocorrer em estruturas que constituem sistemas dutoviários é de extrema importância, pois, além dos custos que resultam da deterioração dos materiais, é primordial evitar acidentes (NUNES; DUTRA, 2011). A corrosão é uma das principais causas de falhas e de necessidades de manutenção, uma vez que geram paradas não programadas, perdas de produção, elevados custos com reparos e aumento dos riscos ambientais e de segurança operacional, podendo, sobretudo, causar grandes desastres (NUNES; DUTRA, 2011).

Ainda segundo Nunes e Dutra (2011), estatísticas mais antigas reportam que um quarto da produção mundial de aço é destinado à reposição de perdas causadas pela corrosão. Nos Estados Unidos, um relatório do ano de 1966 do *National Bureau of Standards* indicou que este percentual havia subido para 40%. Desde então, nas últimas cinco décadas, diversos estudos foram realizados analisando a importância dos problemas de corrosão segundo dois aspectos principais. O primeiro é o econômico, considerando que o custo da corrosão atinge valores muito elevados. O segundo é a preservação das reservas de recursos minerais, pois, sendo a corrosão um processo espontâneo, esta consome constantemente os metais, havendo a necessidade de produção adicional para reposição do que sofre deterioração.

Em 1969, o pesquisador britânico T.P. Hoar, da Universidade de Cambridge, liderou um grupo, a pedido do governo inglês, para avaliar o custo da corrosão no país. Assim, conclui-se que as estimativas eram, à época, de £ 1,365 bilhão, ou seja, 3,5% do PIB. Com base neste índice, Hoar estimou um montante de £ 2,5 bilhões, para o ano de 1974 (NUNES; DUTRA,[1] 2011 apud HOAR, 1976, p.1-18). A partir daí, este índice tem sido adotado em diversos países, para se estimar o custo anual atribuído à corrosão.

[1] NUNES, Laerce P.; DUTRA, Aldo C. Proteção Catódica: Técnica de Combate à Corrosão. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 372 p. p. 5.

Estudo semelhante foi realizado nos Estados Unidos, em 1975, pelo *National Bureau of Standards*, juntamente com o *Battele Columbus Laboratories*, que revelou, em 1978, um custo referente à corrosão de US$ 70 bilhões naquele ano, o que correspondia a 4,2% do PIB Americano. Em 1999, iniciou-se um novo trabalho, desta vez pelo *CC Technologies Laboratories* com apoio da *Nace International - The Worldwide Corrosion Authority*, chegando em 2001 ao valor de US$ 276 bilhões, representando cerca de 3,1% do PIB.

No Brasil, tem-se utilizado o índice de Hoar, 3,5% do PIB, para estimar o custo anual da corrosão (NUNES; DUTRA, 2011), o que corresponde algo próximo de R$ 238 bilhões, em valores atuais. Por si só, estes números são suficientes para demostrar o quão importantes são os problemas relacionados à corrosão. Tanto que a norma técnica ABNT NBR 16563-1:2016 foi elaborada com o intuito de estabelecer os procedimentos para determinar os níveis de influência e as medidas para controlar e mitigar os impactos em sistemas dutoviários, provenientes de sistemas interferentes, visando adequar as estruturas aos limites de segurança pessoal e estrutural. No entanto, sem apresentar detalhes de como fazer; apenas indicando que a avaliação dos níveis de influência deve ser realizada por simulação computacional.

A norma técnica ABNT NBR 16563-1:2016 caracteriza os sistemas interferentes como sendo redes de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em corrente alternada com tensão superior a 600 V_{ef}. O que veio a ampliar significativamente a necessidade de realização de estudos para avaliar as influências em sistemas interferidos, pois, até então, os estudos limitavam-se aos casos envolvendo sistemas interferentes com tensão igual ou superior a 69 kV, conforme o regulamento técnico ANP Nº 2/2011. Sucede que, para estimar as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, existe um número muito restrito de ferramentas computacionais (programas comerciais com elevados custos de licenciamento e renovação anual), o que pode inviabilizar o atendimento a um possível aumento de demanda gerado pelo o que é exigido em norma (NBR 16563-1:2016).

Nesse contexto, o presente trabalho é baseado no levantamento bibliográfico do referencial teórico relacionado à avaliação de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários. Como resultado, foram obtidos os principais conceitos sobre o tema em questão e alguns dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência em dutos terrestres causados por linhas de transmissão aéreas, bem como elaboradas simulações computacionais aplicando o cálculo dos mesmos em estudo de caso.

1.2. SITUAÇÃO PROBLEMA

Desde que o homem começou a extrair minério da natureza para a fabricação de metais, a corrosão tem sido o maior problema causador da deterioração dos mesmos, e, anualmente, a indústria tem perdas significativas de produção, devido a problemas associados a processos de corrosão (NUNES; DUTRA, 2011). Considerando que as reações de corrosão são todas reações espontâneas, conclui-se que este fenômeno nada mais é do que um produto do determinismo termodinâmico, devolvendo o metal à sua condição inicial de minério ao liberar energia, o que corresponde, assim, ao inverso dos processos metalúrgicos, nos quais fornecem energia para a obtenção do metal, conforme a Figura 1.

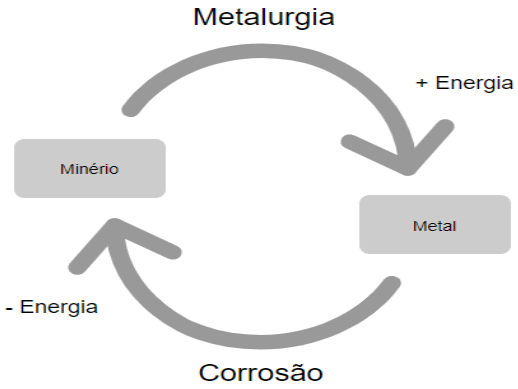

Figura 1: Ciclo de vida do metal.
Fonte: Adaptada de Nunes e Dutra (2011).

Desta forma, para que se tenha um metal em estado de equilíbrio, i.e., imune ao ataque de processos de corrosão, é necessário que seja fornecida continuamente a este uma quantidade suplementar de energia, e é nisto que consiste basicamente a técnica de combate à corrosão denominada proteção catódica. Se limitando à sua área de atuação, a proteção catódica elimina completamente possíveis processos corrosivos que venham a ocorrer, desde que o metal esteja dentro do critério de proteção adotado, sendo fundamental para isso a garantia de integridade do revestimento externo do duto terrestre protegido. Por outro lado, além de danos nos revestimentos externos de dutos terrestres interferidos, as influências de sistemas de energia elétrica podem causar corrosão em sistemas dutoviários, caso as correntes contínuas fornecidas por seus respectivos sistemas proteção catódica forem excedidas pelas correntes alternadas que circulam nos mesmos, devido às tensões C.A. induzidas por sistemas de energia elétrica (DAWALIBI; SOUTHEY, 1989; ABDEL-GAWAD *et al*., 2015).

No que se refere às tensões C.A. induzidas em dutos por linhas de transmissão aéreas, há, basicamente, dois tipos de fenômenos. O primeiro ocorre quando o duto interferido

está acima do solo e próximo ao circuito de potência. Nesse caso, a influência produzida ou acoplamento capacitivo entre o duto e a linha de transmissão aérea, como contextualizado aqui, é o maior causador da tensão C.A induzida. Esse acoplamento é responsável por induzir uma tensão transversal entre o duto e o solo. No segundo caso, quando o duto interferido se encontra enterrado no solo, o acoplamento é essencialmente via a corrente de retorno pelo solo gerada pelas correntes longitudinais nos condutores fase de um dado circuito de transmissão. Em outras palavras, no caso de um duto terrestre, o mesmo torna-se um caminho para as correntes induzidas no solo pelo circuito de potência. É um acoplamento dominantemente induzido, visto que o efeito das correntes de deslocamento no solo é normalmente desconsiderado no caso de fenômenos à frequência industrial.

Conforme preconizam o regulamento técnico ANP Nº 2/2011 e as normas técnicas ABNT NBR ISO 15589-1:2016 e NBR 16563-1:2016, em locais onde é verificada a proximidade entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários devem ser investigados os níveis de influência em dutos interferidos, mantendo seus efeitos dentro dos critérios estabelecidos para a integridade de instalações e para a segurança de pessoas, com o objetivo de possibilitar o compartilhamento de faixas e/ou travessias entre ambos os sistemas. Estes efeitos ocorrem basicamente devido às influências indutiva e condutiva causadas por sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, existindo, ainda, a influência capacitiva, desconsiderada no presente trabalho, uma vez que a mesma está presente apenas em situações de aproximação envolvendo dutos aéreos (NACE SP0177-2014).

1.3. RELEVÂNCIA DO TRABALHO

Em entrevista com o Eng.º Laerce de Paula Nunes, Presidente da Associação Brasileira de Corrosão, o mesmo descreve o início dos desdobramentos dos estudos para avaliação das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários no Brasil, objetivando a garantia de integridade de dutos interferidos e da segurança de pessoas:

> Ao final da década de 1930, o Brasil era um país essencialmente agrário, com a maioria esmagadora da sua população vivendo no campo, e pouquíssimos veículos circulavam pelas precárias estradas brasileiras.
> No período de 1930 a 1950, iniciou-se um processo de industrialização no país e, consequentemente, houve grandes migrações de pessoas do meio rural para as cidades, o que aumentou a demanda por energia elétrica e, também, por combustíveis para acionar a frota de veículos em franco crescimento.
> Na década de 1950, houve um aumento considerável da industrialização com a implantação de grandes indústrias no Brasil, especialmente as montadoras de automóveis e caminhões. Este período coincidiu, também, com a criação da

> Petrobras, em 1953.
> Na década seguinte, anos 1960, já se observava a construção dos primeiros dutos de grande porte e de linhas de transmissão de tensões elevadas. Foi nesta época que se construíram os oleodutos Rio - Belo Horizonte (ORBEL), São Sebastião - Cubatão (OSBAT) e São Sebastião - Paulínia (OSPLAN).
> No ano de 1972, engenheiros da Cia. Energética de São Paulo – CESP – procuraram a Petrobras, com o objetivo de compartilhar a faixa do Oleoduto OSBAT para a instalação de uma linha de transmissão de alta tensão. Então, foi solicitado à CESP que apresentasse um estudo acerca das influências e dos possíveis efeitos causados pela linha de transmissão a ser construída, após os quais, desistiram do pretendido compartilhamento.
> No ano de 1973, a Petrobras necessitou construir um duto para derivados de petróleo entre a sua estação de tancagem em Barueri - SP e Utinga, em Santo André, no ABC Paulista, e a única possibilidade viável seria o compartilhamento de faixa com linhas de transmissão de alta tensão da concessionária de distribuição de São Paulo à época, Light – Serviços de Eletricidade S/A. Para os estudos, foi trazido da França um especialista da *Électricité de France*, Pierre Glomot, que recomendou o aterramento de toda a tubulação.
> A partir daí, engenheiros brasileiros começaram a elaborar sistematicamente tais estudos, principalmente no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL –, tendo sido feita na década de 1980 a primeira tentativa de normalizar o assunto.
> Com a urbanização cada vez maior, o incremento do transporte de óleo e gás, entre outros, e o constante aumento da demanda de energia elétrica, passou a haver cada vez mais a ocorrência de compartilhamento de faixas, tendo, para isso, a necessidade de realização dos estudos em questão, a fim de assegurar a integridade dos dutos interferidos e garantir a segurança das pessoas envolvidas na operação e manutenção dos mesmos. Atualmente, nenhum duto ou linha de transmissão é projetado e construído sem que estes estudos sejam realizados (informação verbal)[2].

Visto a grande necessidade exposta de se investigar as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, o presente trabalho se justifica no sentido de contribuir com o meio acadêmico, buscando apresentar um tema relevante, e com a sociedade, diante de um panorama de constate expansão dos referidos sistemas, que exige cada vez mais a realização de estudos para garantir a segurança e integridade de pessoas e de estruturas.

1.4. OBJETIVOS DO TRABALHO

1.4.1. Objetivo geral

Dada à situação problema apresentada no item 1.2, o presente trabalho tem como objetivo geral apresentar alguns dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva causados por sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, considerando nos cálculos linhas de transmissão áreas e dutos terrestres, durante a operação normal e na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão.

[2] Entrevista concedida por NUNES, Laerce P. **Entrevista I**. [ago. 2018]. Entrevistador: Luciano Gabriel de Oliveira Coelho. Rio de Janeiro, 2018.

1.4.2. Objetivos específicos

Além do objetivo geral, proposto no item anterior, o presente trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico do referencial teórico e apresentar os principais conceitos relacionados à avaliação de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, indicando, especificamente, alguns dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva em dutos terrestres causados por linhas de transmissão aéreas;
- Elaborar programas computacionais, aplicando os métodos gerais apresentados nos cálculos, a fim de estimar os níveis de influência indutiva e condutiva em um duto terrestre, durante a operação normal e na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão, respectivamente;
- Estimar os níveis de influência indutiva e condutiva em um duto terrestre, através de estudo de caso contemplando situações típicas de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, empregando programas computacionais comerciais e os programas elaborados pelo autor deste manuscrito; e
- Comparar e analisar os resultados obtidos com os programas computacionais elaborados com os fornecidos pelos métodos empregados em programas comerciais largamente utilizados na área de estudo em questão.

1.5. DELIMITAÇÃO DO PROBLEMA

O escopo do presente trabalho delimita-se em apresentar o referencial teórico relacionado à avaliação das influências indutiva e condutiva de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, considerando como sistema interferente uma linha de transmissão aérea e como sistema interferido um duto terrestre, não abrangendo a influência capacitiva, uma vez que esta se encontra presente apenas nos casos que envolvem linhas de transmissão aéreas e dutos aéreos, de acordo com a norma técnica NACE SP0177-2014.

Com relação às simulações computacionais para estimar os níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, através de estudo de caso, o presente trabalho abrange as influências indutiva e condutiva em um duto terrestre, durante a operação normal e na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão, respectivamente, conforme indicado nos objetivos específicos na seção 1.4.2. A influência

indutiva, na condição de curto-circuito monofásico na linha de transmissão, e, por conseguinte, a diferença de potencial elétrico aplicada ao revestimento do duto não são considerados no estudo de caso. O presente trabalho não pretende, também, apresentar os aspectos ligados a medidas mitigadoras que se façam necessárias à garantia de integridade de estruturas e de segurança de pessoas, tampouco propor melhorias para as práticas existentes realizadas na área. Todavia, apesar de não fazerem parte da presente abordagem, podem ser consideradas em trabalhos futuros, em continuação desta dissertação.

1.6. METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho inicia a pesquisa a partir do levantamento bibliográfico dos trabalhos que possibilitem alcançar os objetivos gerais e específicos em questão. Para isso foi realizada uma pesquisa de referências publicadas englobando os principais conceitos, teorias e modelos sobre a avaliação de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários e dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência em dutos terrestres causados por linhas de transmissão aéreas. A Figura 2 apresenta graficamente a metodologia proposta para atingir os objetivos do trabalho.

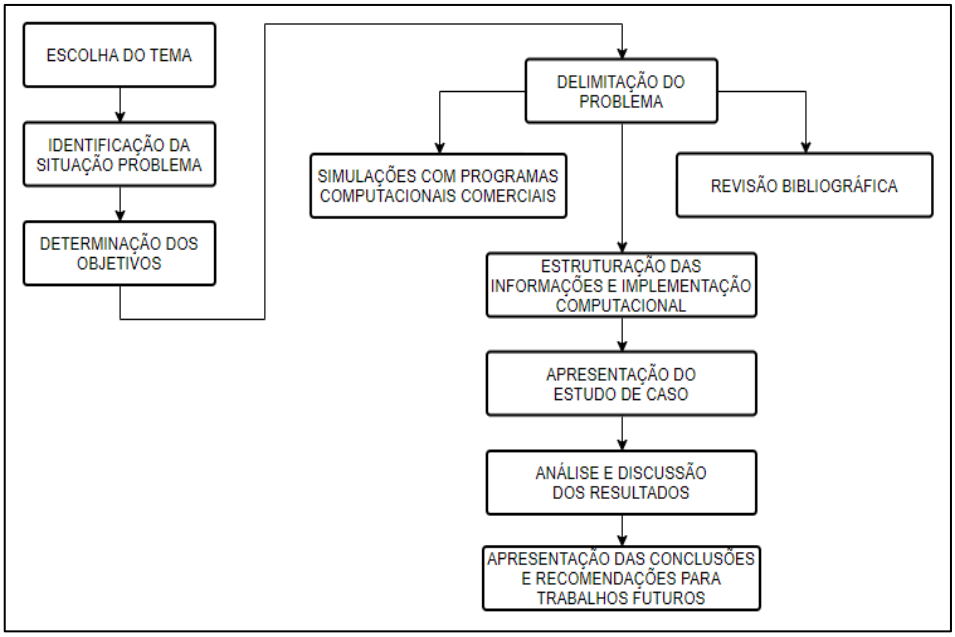

Figura 2: Metodologia adotada.

1.7. PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Referente à produção científica relacionada a esta dissertação, pode-se citar as seguintes publicações:

- COELHO, L.; SOTELO, G.; LIMA, A.; BARROS, M. T. AC induced voltage differences due to buried pipelines length under analysis. Electric Power Systems Research, em fase de submissão.

  Neste trabalho, busca-se ressaltar a importância de dispor de todo o traçado do duto interferido em um estudo, pois o mesmo estaria sujeito à corrosão, caso medidas mitigadoras não sejam indicadas em virtude de resultados para níveis de tensão C.A. induzida abaixo, porém, próximos do valor máximo admissível de 15 V_{ef}, em uma avaliação considerando apenas um trecho do duto.

- COELHO, L.; FERREIRA, V. H.; SOTELO, G.; LIMA, A. Prediction of electric power systems influences on pipeline systems using artificial neural networks. VII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE). Maio 2018.

  O trabalho em questão aborda a aplicação de um modelo de rede neural artificial (RNA) para predição de tensões aplicadas a dutos que cruzam com linhas de transmissão, em caso de curto-circuito monofásico nas mesmas, utilizando uma rede *feedforward* de múltiplas camadas com o algoritmo de treinamento *backpropagation*.

  Os parâmetros que se alteram em condições de falta envolvendo a terra em linhas de transmissão, em avaliações de situações de aproximação com dutos terrestres, são considerados como valores de entrada da RNA implementada: correntes de curto-circuito; resistividade do solo; ângulo de cruzamento; e distâncias de separação de torres adjacentes a um ponto de cruzamento; a fim de fornecer na saída da rede os respectivos valores máximos de tensão aplicados a revestimentos de dutos interferidos, como alternativa a ser considerada para classificar os casos críticos a serem avaliados.

1.8. CONTRIBUIÇÕES

Além de apresentar alguns dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, visto que a

norma técnica ABNT NBR 16563-1:2016 dispõe que para avaliação destas influências deve-se realizar simulação computacional, mas não especifica como fazer, o presente trabalho visa contribuir, ainda, mostrando as diferenças de se considerar nas avaliações parte do traçado de um duto nas respectivas regiões de aproximação com uma linha de transmissão e toda a extensão do mesmo; circunstâncias não abordadas no referencial teórico consultado.

Dessa forma, foi possível identificar que, na eventualidade de se levar em conta apenas um trecho do duto interferido em uma avaliação, o mesmo estaria sujeito ao surgimento de processos de corrosão, caso os resultados para os níveis de tensão C.A. induzida fiquem abaixo, porém, próximos do limite de 15 V_{ef} estabelecido nas normas técnicas ABNT NBR 16563-1:2016 e NACE SP0177-2014, e, em função disso, medidas de mitigação não fossem especificadas.

Adicionalmente, buscou-se conceber o presente trabalho de modo a permitir que a base de conhecimento nele contida possa ser útil em trabalhos futuros, possibilitando o desenvolvimento de novas aplicações.

1.9. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além do presente capítulo; com a finalidade de apresentar os aspectos introdutórios sobre o tema abordado (contextualização, situação problema e relevância do trabalho), os objetivos gerais e específicos, a delimitação do problema, a metodologia empregada e as contribuições, de forma a apresentar de maneira clara e objetiva o enfoque do trabalho; o presente documento está organizado, ainda, em outros cinco capítulos, conforme abaixo:

No capítulo 2 são apresentados os principais conceitos sobre o tema em questão e uma visão geral da literatura na área.

O capítulo 3 apresenta o levantamento bibliográfico do referencial teórico relacionado à avaliação de influências indutiva e condutiva de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários.

O capítulo 4 apresenta o estudo de caso contemplando situações típicas de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários.

No capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos no estudo de caso, comparando os valores apresentados pelos programas computacionais elaborados com os fornecidos pelos métodos empregados em programas computacionais comerciais.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do presente trabalho, com base nos resultados obtidos no estudo de caso, e as recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. INFLUÊNCIAS DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DUTOVIÁRIOS: ESTADO DA ARTE

Ao longo das últimas décadas, diversos trabalhos a respeito das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários foram realizados buscando-se introduzir formas de calcular as tensões indesejáveis em sistemas interferidos. Este capítulo tem a finalidade de apresentar os principais conceitos sobre o tema em questão e uma visão geral da literatura na área.

2.1. INFLUÊNCIAS PRODUZIDAS POR SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Ainda que a natureza física relacionada às influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários possa ser explicitada através de leis, fenômenos e conceitos de eletromagnetismo conhecidos, a análise prática dos efeitos causados em sistemas dutoviários interferidos tende a ser um problema de grande complexidade que requer a aplicação de modelos que possam reproduzir, com a maior fidelidade possível, o que, de fato, vem a ocorrer em situações de proximidade entre ambos os sistemas. De maneira conceitual, as influências produzidas por sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários são comumente caracterizadas por três tipos principais, devido à natureza específica de cada uma, sendo estas denominadas influências indutiva, condutiva e capacitiva, conforme ilustrado na Figura 3.

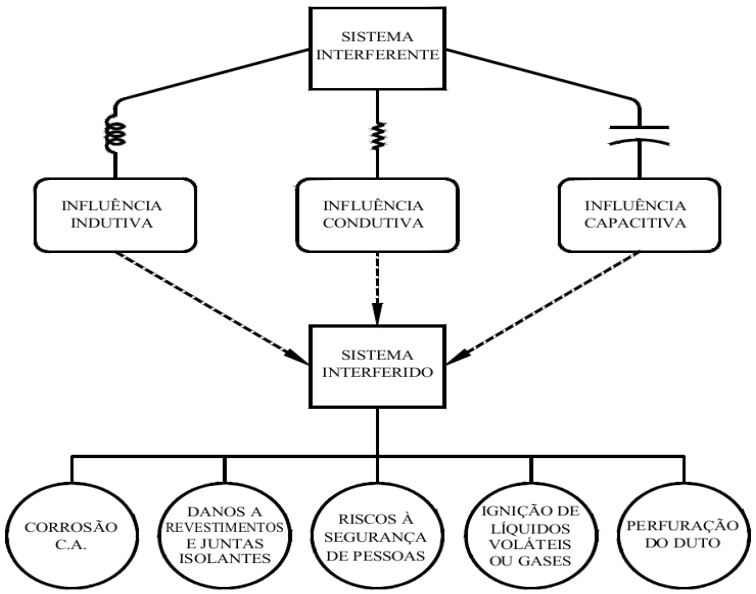

Figura 3: Influências de sistemas de energia elétrica e seus efeitos em sistemas dutoviários.
Fonte: Adaptada de SDG&E – NV5 (2016).

A influência indutiva pode ser descrita através da Lei de Indução de Faraday, devido aos efeitos decorrentes da variação no tempo da densidade de fluxo magnético do campo ***B***, produzidos pelas correntes que circulam nos condutores de uma linha de transmissão, como indicado na Figura 4. Como efeito, dado o campo elétrico ***E*** induzido que circunda uma linha de transmissão, bem como ao respectivo potencial elétrico Φ distribuído ao longo da mesma, ocorre a formação de forças eletromotrizes (FEMs) induzidas que causam a circulação de correntes em dutos interferidos que correm paralelos ou cruzam com linhas de transmissão, gerando tensões C.A. induzidas entre os mesmos e a terra local (CIGRE WORKING GROUP 36.02, 1995). Os principais parâmetros neste tipo de influência são: níveis de corrente circulando nos condutores; separação entre as instalações; comprimento de exposição; e correntes nos circuitos de blindagem (para-raios das linhas de transmissão, contrapesos contínuos etc).

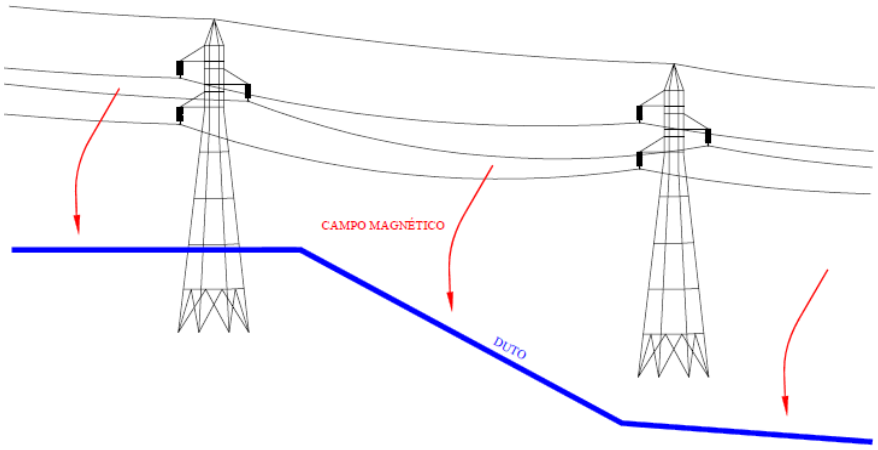

Figura 4: Influência indutiva.

A influência condutiva está ligada às perturbações provocadas pelo campo elétrico ***E*** gerado e pelas distribuições de densidade de corrente ***J***, devido à corrente que flui para o solo na ocorrência de um curto-circuito envolvendo a terra em uma linha de transmissão, através dos sistemas de aterramento das torres adjacentes a um ponto de aproximação com um duto terrestre, provocando a elevação do potencial na interface solo/revestimento do duto interferido, nas imediações do ponto de falha, conforme a Figura 5. Se essa elevação resultar em uma diferença de potencial superior ao valor máximo suportado pelo revestimento, podem ocorrer danos ao mesmo e falhas no duto, pois a tensão aplicada a uma tubulação pode resultar em corrosão (EPRI/A.G.A., 1987). Os principais parâmetros da influência condutiva são: níveis das correntes injetadas no solo; resistividade do solo; ângulo de cruzamento; e separação entre duto e pontos de injeção de corrente.

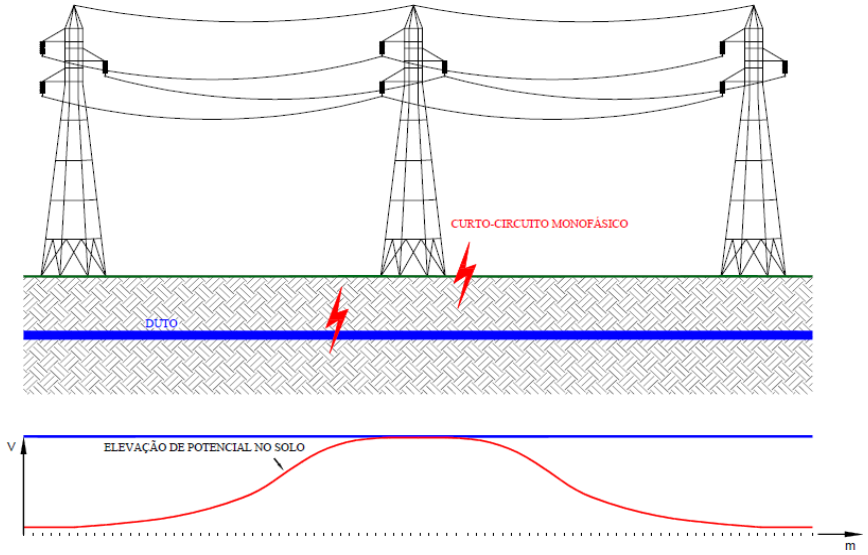

Figura 5: Influência condutiva.

Ressalta-se que, apesar de não fazer parte do escopo do presente trabalho, conforme mencionado nos itens 1.2 e 1.5, existe ainda a influência capacitiva de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, indicada na Figura 6, que ocorre em função do campo elétrico ***E*** gerado no entorno de uma linha de transmissão devido à tensão entre seus condutores, como resultado da capacitância entre ambos os sistemas. Contudo, apenas dutos aéreos próximos a linhas de transmissão aéreas estão suscetíveis à influência capacitiva, devido ao efeito de blindagem da terra contra os campos elétricos (NACE SP0177-2014). Os principais parâmetros da influência capacitiva são: níveis de tensão entre condutores; separação entre as instalações; geometria das estruturas envolvidas; e aterramento dos dutos.

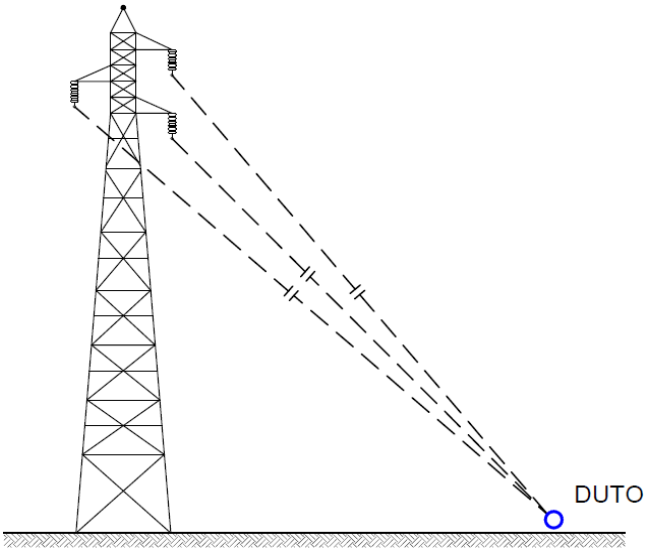

Figura 6: Influência capacitiva.

2.2. VISÃO GERAL SOBRE A BIBLIOGRAFIA NA ÁREA

Como é de grande conhecimento nos meios científico e acadêmico, muitos trabalhos foram realizados nas primeiras décadas do século passado, no sentido de buscar resolver o cálculo de impedâncias próprias e mútuas de condutores de sistemas de energia elétrica, através de modelos exatos e fórmulas aproximadas para condutores paralelos infinitamente longos, com base em métodos estritamente analíticos, diante dos meios de solução disponíveis à época.

Desta forma, inúmeros cientistas e pesquisadores analisaram o problema e contribuíram com a produção de extenso referencial teórico, sendo Carson (1926) e Pollaczek (1926) os pioneiros a contribuir com as bases para o cálculo da influência indutiva entre condutores paralelos em um meio condutor, através de formulações amplamente conhecidas considerando o retorno pelo solo, ao passo que, posteriormente, aproximações dessas formulações foram sendo apresentadas para solução do problema.

Carson (1926) apresentou uma solução para o problema da propagação de ondas ao longo de um sistema de transmissão composto por um condutor aéreo paralelo à superfície do solo que, anteriormente, era substituído por um sólido semi-infinito plano e homogêneo, dada à impossibilidade existente de se desenvolver uma solução, em sua totalidade, do real problema. Antes, também, a condução heterogênea do solo e as irregularidades na superfície do mesmo não eram consideradas, bem como o cálculo de distúrbios indutivos em sistemas de energia elétrica próximos.

Pollaczek (1926) apresentou um conjunto de expressões na forma de integrais em termos de funções de Bessel para a análise em duas partes do campo elétrico gerado por uma corrente elétrica em um condutor infinitesimalmente fino, quando comparado com o caminho de retorno pelo solo. Uma parte em função da corrente elétrica que circula no próprio condutor e outra devido à corrente elétrica de retorno pelo solo, considerando as imperfeições do mesmo. As expressões resultantes em questão, juntamente com a curva de resposta obtida, possibilitaram o cálculo do campo elétrico para diferentes valores de distância de separação, de frequência e de resistividade do solo.

Em relação à influência condutiva de sistemas de energia elétrica, Stefanesco *et al*. (1930) apresentaram os fundamentos para análise das correntes elétricas que fluem para o solo, em decorrência de falhas em sistemas elétricos envolvendo a terra, e, por conseguinte, a elevação de potenciais em camadas de solo horizontais, homogêneas e isotrópicas. Através de um método baseado na generalização da função de Bessel de primeira espécie para cada um

dos referidos tipos de camada, independentemente da quantidade, resistividade específica e espessura, foi possível determinar a distribuição de potenciais em cada uma delas.

Sunde (1949) abordou os métodos fundamentais de análise dos efeitos relacionados ao retorno pelo solo na transmissão de energia elétrica e nas comunicações, bem como os princípios básicos referentes às medidas de proteção contra distúrbios causados em circuitos, encontrados em inúmeros trabalhos realizados, que se referem a diversos aspectos ligados às áreas de sistemas de potência e de comunicação. Parâmetros como aterramento elétrico, corrosão, resistividade do solo, descargas atmosféricas e influência indutiva foram investigados, demonstrando a relevância de se estudar os fenômenos associados ao retorno pelo solo em sistemas de transmissão de energia elétrica e sistemas de comunicação, devido às preocupações causadas pela diversidade de sistemas em conjunto.

2.2.1. Literatura nos últimos anos

A partir dos anos de 1970, as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários passaram a preocupar, de forma mais incisiva, empresas dos respectivos setores, institutos de pesquisa e órgãos competentes, tendo uma quantidade significativa de estudos e trabalhos de pesquisa sido realizada nas últimas décadas. Desdobramentos foram realizados, tanto em relação às técnicas quanto aos métodos, para se estimar as tensões impostas a um duto interferido e de que maneira estas poderiam ser eliminadas e/ou reduzidas. Tudo isto com a finalidade de garantir a integridade de dutos e a segurança de pessoas, nos quais um panorama sobre algumas das contribuições realizadas em relação ao tema de estudo do presente trabalho é apresentado nos parágrafos a seguir.

Wait (1972) apresentou uma solução para o problema do valor limite da propagação eletromagnética ao longo de um condutor dielétrico infinitesimalmente fino revestido, paralelamente à interface entre dois semi-espaços condutores homogêneos. A partir de uma equação modal geral derivada para a constante de propagação da corrente de transmissão no condutor, demonstrou-se que a presença da interface ar/solo modifica significativamente a constante de propagação, bem como que, em certos casos, sua taxa de atenuação pode ser elevada em relação a um meio infinito.

Nakagawa *et al*. (1973) desenvolveram um método, segundo eles, mais criterioso e geral para o cálculo da impedância de retorno pelo solo de linhas de transmissão aéreas, em comparação com as técnicas apresentadas por (CARSON, 1926; WISE, 1934). Considerando, particularmente, como caminho de retorno pelo solo três camadas com resistividades,

permissividades e permeabilidades distintas, os resultados obtidos demostram os efeitos produzidos pelas diferentes características na aplicação do método implementado. Observou-se que o solo com diferentes camadas de resistividade gera impacto considerável nas impedâncias de aterramento e alterações nas formas de onda resultantes do caso de solo homogêneo, sendo a profundidade de uma camada um elemento de grande significância para o valor da impedância em um solo multicamadas.

As tensões induzidas em sistemas dutoviários devido à proximidade com sistemas de energia elétrica foram estimadas por (TAFLOVE; DABKOWSKI, 1979), utilizando a teoria de linha de transmissão elétrica, através de circuitos equivalentes de Thévenin para segmentos de dutos, bem como para decompor componentes de geometrias complexas de linhas de transmissão. Desta forma, foi possível a utilização de calculadoras de mão programáveis para o cálculo das características elétricas de dutos, dos circuitos de Thévenin e dos níveis de indução. Posteriormente, Dabkowski e Taflove (1979) realizaram testes em campo com um duto próximo a uma linha de transmissão, e fizeram um paralelo entre os cálculos realizados através da teoria elaborada na parte I e os níveis de influência indutiva obtidos nas medições. Os resultados esperados de tensão C.A. induzida para os pontos ao longo do duto e a intensidade de todos os picos apresentaram ótima conformidade com os valores medidos.

Dawalibi (1980) apresentou um método analítico para o cálculo da intensidade de corrente de curto-circuito monofásico e sua respectiva distribuição, considerando todas as características das estruturas dos sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários envolvidas. Sem necessidade de quaisquer aproximações, tampouco simplificação dos cálculos, o método apresentado buscava estimar, da forma mais precisa possível, as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários vizinhos.

Com base na fórmula de Carson, Déri e Tevan (1981) apresentaram a fundamentação matemática e a interpretação física do método heurístico proposto por Dubanton, no qual sugere para o cálculo de impedâncias próprias e mútuas de linhas de transmissão aéreas, considerando o retorno pelo solo, fórmulas diretas com base na hipótese de que a corrente de retorno pelo solo está concentrada em um plano que se encontra a uma suposta profundidade complexa. Posteriormente, Déri *et al*. (1981) indicaram que as equações apresentadas, a princípio, por Dubanton e, posteriormente, publicadas por (GARY, 1976), sem as devidas demonstrações, referem-se analiticamente à fórmula de Carson, avaliando de forma numérica os respectivos desvios obtidos na modelagem do plano do retorno de corrente em solo homogêneo que, em grande parte, são relativamente pequenos (próximos de zero). Com o objetivo de apresentar um modelo de retorno de corrente em solo homogêneo, abordaram a

ideia de um plano de corrente ideal, localizado em uma profundidade complexa análoga à considerada para ondas planas, de forma que as imagens condutoras possam ser aplicadas para condições de retorno do solo, em expressões com pouca complexidade para se obter impedâncias próprias e mútuas, caracterizando o plano complexo em questão como uma superfície de espelhamento.

Kouteynikoff (1983) apresentou um estudo quanto às regulamentações que tratam das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários nos países membros do CIGRE, pelo *Study Committee* 36 (*Power System Electromagnetic Compatibility*). O estudo teve a finalidade de comparar e revisar os instrumentos que estabelecem as condições de exposição de sistemas dutoviários interferidos às influências de sistemas de energia elétrica. Foi possível identificar que, à época, apenas 12 países possuíam requisitos legais necessários ao compartilhamento de faixa entre ambos os sistemas, porém, faltando uniformidade entre os mesmos e que nem todos os países membros tratavam com igual relevância o problema em questão. Os critérios definidos se diferenciam consideravelmente entre si, e inúmeras e variadas eram as técnicas aplicadas para reduzir os níveis de influência, buscando garantir a integridade de dutos e a segurança de pessoas.

Dawalibi e Niles (1984) aplicaram métodos analíticos aprimorados para a análise das consequências decorrentes da condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão, onde são apresentadas técnicas de cálculo desde as mais simples até as mais elaboradas. Realizando comparações entre as técnicas em questão, face aos cenários de teste considerados, os resultados aproximados para o cálculo da corrente de curto-circuito em uma dada estrutura da linha de transmissão – como uma parcela das contribuições de corrente de curto-circuito das subestações terminais –, poderiam ser obtidos através da abordagem simplificada com o uso de uma calculadora, enquanto que para a aplicação de cálculos mais complexos seria necessário o uso de computador.

Diante de exigências de entidades governamentais de que sistemas de energia elétrica e sistema dutoviários compartilhassem uma mesma faixa, devido à tendência de se melhorar o aproveitamento dos recursos de terras, Nelson (1986) apresentou um estudo sobre as correntes e tensões C.A. induzidas em dutos que compartilham faixas com linhas de transmissão, considerando o duto interferido como um circuito elétrico, a fim de modelar as influências geradas pelo sistema interferente, no qual pode concluir que o duto interferido recebe maior influência por correntes de sequência zero.

Com base nos métodos descritos nos projetos de pesquisa realizados pelo *Electric Power Research Institute* – EPRI – e pela *American Gas Association* – A.G.A. –, entre os

anos de 1970 e 1980, que tiveram como objetivo analisar a influência indutiva em sistemas dutoviários interferidos através de expressões analíticas práticas apresentadas por (TAFLOVE; DABKOWSKI, 1979), Dawalibi e Pinho (1986) desenvolveram uma ferramenta computacional para análise das influências indutiva e condutiva em um sistema dutoviário, devido à ocorrência de falhas no sistema de energia elétrica interferente, a fim de assegurar a integridade do duto interferido, bem como a segurança de pessoas.

Frazier *et al*. (1986) apresentaram um programa computacional para análise detalhada das tensões e correntes indesejáveis que sistemas de energia elétrica induzem em sistemas dutoviários e ferroviários, resultantes da indução magnética ou eletrostática de circuitos de linhas de transmissão, durante a operação normal e quando da ocorrência de curto-circuito. Demostraram que as condições que levam ao problema entre os sistemas envolvidos dependem dos parâmetros de excitação, das suscetibilidades dos sistemas e da interação eletromagnética entre as instalações existentes em uma faixa compartilhada.

Dawalibi (1986a) abordou os conceitos fundamentais e o respectivo desenvolvimento analítico referentes aos campos eletromagnéticos de baixa frequência criados por um condutor de corrente imerso em um meio de extensão infinita e em um semi-espaço condutor. Foi demonstrado que a intensidade do campo magnético em um condutor enterrado diminui progressivamente à medida que o ângulo do condutor com a superfície horizontal aumenta, bem como que o campo magnético não está presente em condutores verticais enterrados. Também, que uma interrupção nos condutores horizontais e oblíquos alteram significativamente os campos magnéticos acima do solo e os potenciais em sua superfície.

Dawalibi (1986b) apresentou uma continuação do trabalho anterior sobre a intensidade dos campos eletromagnéticos, evidenciando que, em redes formadas por condutores cilíndricos localizados de forma aleatória em solo homogêneo ou de duas camadas e, ainda, por condutores aéreos, os campos eletromagnéticos podem ser utilizados para detectar condutores interrompidos, através da injeção de corrente em um ponto central e em quatro pontos na extremidade da rede. Comprovou-se que os respectivos pontos de injeção de corrente, a frequência e a configuração da rede exercem influência sobre campos magnéticos, correntes longitudinais, correntes de fuga e potenciais no solo.

Em 1987, o CIGRE *Study Committee* 36 realizou uma pesquisa internacional relacionada às questões envolvendo a proximidade entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, bem como os respectivos dispositivos legais em diversos países. Os resultados deixaram claro que o tema se tornara cada vez mais relevante, visto que correntes de operação normal e de curto-circuito de linhas de transmissão aumentavam à medida que os

sistemas elétricos se expandiam em tamanho e potência, em virtude da crescente demanda de energia elétrica.

Dessa forma, a pesquisa constatou a necessidade de um guia contendo informações gerais sobre o tema e, por consequência, o (CIGRE WORKING GROUP 36.02, 1995) comprometeu-se em colaborar com o *Study Committee* 36 para a elaboração deste guia. O propósito foi de apresentar os tipos de influência e os respectivos níveis máximos admissíveis, métodos simplificados de se estimar os mesmos e de medição em campo, bem como formas de mitigar os efeitos nocivos de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários.

Jacquet e Moore (1988) apontaram os problemas relacionados à corrosão de sistemas dutoviários que podem ocorrer devido à tensão C.A. induzida durante a operação normal de linhas de transmissão próximas aos mesmos. Ainda, apresentaram novos métodos de cálculo para avaliação e mitigação dos possíveis efeitos da elevação de potencial do solo, especialmente no que diz respeito à ionização do mesmo, causada pela circulação de correntes durante a ocorrência de faltas envolvendo a terra em uma linha de transmissão.

Dawalibi e Southey (1989) apresentaram um pacote de ferramentas computacionais, ECCAPP (*Electromagnetic and Conductive Coupling Analysis of Powerlines to Pipelines*), percursor de programas computacionais atuais, sendo originado no programa de pesquisa do (EPRI/A.G.A., 1987). O referido pacote de software foi desenvolvido com a finalidade de estimar prováveis situações de influência em sistemas dutoviários com múltiplos dutos. No entanto, sua utilização não foi viável, devido à grande quantidade de segmentos exigida na modelagem dos dutos, sendo principalmente proibitivo considerando a avaliação na condição de curto-circuito. Contudo, Dawalibi e Southey (1990) utilizaram posteriormente um conjunto de curvas empregadas em projetos para demostrar uma análise paramétrica das consequências provocadas pelas características do meio e das estruturas envolvidas sobre as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários. Apontaram que condutores enterrados podem vir a ser bastante eficientes quando utilizados como medidas mitigadoras, a fim de reduzir os níveis de tensão aplicados a um duto, durante a ocorrência de falha em uma linha de transmissão.

Sobral *et al*. (1991) demonstraram que o cálculo das influências de sistemas de energia elétrica sobre um único circuito de comunicação ou um único duto, originadas por um curto-circuito monofásico em uma única linha de transmissão próxima, pode se tornar menos complexo utilizando o método desacoplado proposto em (SOBRAL *et al*., 1988a, 1988b). O método em questão consiste em um conjunto de procedimentos que possibilita determinar um circuito equivalente reduzido, em geral de 10 a 60 vezes do esquema inicial, no qual permite

modelar as influências indutiva e condutiva de linhas de transmissão sobre circuitos de comunicação ou dutos terrestres. Possibilitando, ainda, ser generalizado e aplicado ao cálculo das influências que afetam diferentes circuitos de comunicação ou dutos, na condição de falha envolvendo a terra em uma linha de transmissão.

Dabkowski e Frazier (1987) desenvolveram um modelo analítico simplificado para calcular a resistência de uma falha no revestimento de um duto devido à tensão aplicada ao mesmo, na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão. Em princípio, a eficiência do modelo foi avaliada através de segmentos de dutos revestidos submetidos a descargas capacitivas, a fim de demostrar que a resposta de um duto e de seu revestimento a níveis de tensão mais elevados, em virtude de um curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão, pode ser determinada pela condução nos pontos de falha no revestimento.

Abdel-Salam e Al-Shehri (1994) desenvolveram um método para estimar as tensões C.A. induzidas em dutos e cercas metálicas sob linhas de transmissão, baseado no Método de Simulação de Cargas (CSM, na sigla em inglês), que considera os distúrbios do campo e potencial elétrico por efeito da existência das referidas estruturas abaixo de uma linha de transmissão. Foi estabelecido um paralelo entre os resultados obtidos nos cálculos de tensão induzida na cerca e os que foram previamente medidos. As tensões C.A. induzidas nos dutos foram verificadas em campo e comparadas com valores estimados através dos cálculos, a fim de serem analisadas sob o ponto de vista da indução de campo elétrico em objetos próximos a linhas de transmissão.

Southey *et al*. (1994) apresentaram um novo tipo de medida mitigadora que, além de reduzir de maneira eficiente e com baixo custo os níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários a valores dentro dos critérios de integridade de dutos e de segurança de pessoas, protege catodicamente o duto interferido. Contudo, demonstraram através de simulações computacionais que o bom desempenho deste novo método de mitigação depende fundamentalmente de um modelo preciso do solo na região de aproximação.

Yang e Xu (1996) estudaram as alterações do campo magnético produzido por condutores de linhas de transmissão subterrâneas, devido à presença de um duto próximo aos mesmos, bem como avaliaram os resultados obtidos nos cálculos sem considerar a presença de um duto nas proximidades. Foi utilizada uma técnica com base na Série de Fourier e um método iterativo para definir a permeabilidade variável de um duto e tratar as propriedades não lineares do mesmo, a fim de demonstrar que um duto próximo a uma linha de transmissão

pode modificar consideravelmente o campo magnético gerado pela mesma. Apontaram que tal fato deve ser levado em consideração quando se deseja investigar as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, em compartilhamentos de mesma faixa.

Grcev (1996) apresentou um modelo computacional para análise de transitórios em condutores aéreos e enterrados, baseado na teoria do campo eletromagnético e no método das imagens modificado, com o objetivo de avaliar as perturbações de tensão em grandes sistemas de aterramento. A validação do modelo foi realizada comparando os resultados das simulações computacionais com as medições realizadas em campo, aplicando o mesmo ao cálculo de tensões transitórias em relação ao terra remoto de grandes malhas de aterramento. Sendo possível, ainda, calcular impedâncias e tensões induzidas transitórias, de correntes longitudinais e de fuga e de campos eletromagnéticos.

Djogo e Salama (1997) propuseram uma técnica para calcular as correntes e as tensões em casos de paralelismo envolvendo dutos e eletrodos enterrados, no qual se baseia no modelo de linha de transmissão com perdas (TLOSSY, na sigla em inglês). A técnica desconsidera a ideia de representar o seccionamento de um duto através do circuito Thévenin para derivar um quadripolo do circuito π equivalente para cada seção de duto. Foram feitas modificações à maneira através da qual este problema era abordado nos métodos similares existentes. Adicionalmente, utilizando o método modal, uma matriz generalizada do circuito equivalente do quadripolo para um sistema de eletrodos enterrados também é derivada, bem como analisado um cenário típico de eletrodos enterrados não paralelos a uma linha de transmissão.

Satsios *et al*. (1997) investigaram o campo eletromagnético bidimensional, quase estacionário, de uma linha de transmissão sob falha, tendo nas proximidades a existência de: duto terrestre; cabos de mitigação; e solo multicamadas. Solucionaram numericamente a respectiva equação difusa através do método dos elementos finitos (MEF), utilizando os resultados obtidos, juntamente com a lei de Faraday, para o cálculo do potencial vetorial magnético. A análise paramétrica demostrou que o campo eletromagnético e, por conseguinte, as tensões C.A. induzidas em um duto interferido, são influenciados de maneira expressiva pela resistividade da primeira camada do solo e sua profundidade, das resistividades de suas diferentes camadas e da configuração dos cabos utilizados como medidas mitigadoras.

Posteriormente, Satsios *et al*. (1998) apresentaram uma nova aplicação do MEF, em conjunto com a lei de Faraday. Dessa vez, para estimar as correntes em uma linha de transmissão sob falha e, por conseguinte, as respectivas tensões C.A. induzidas em um duto terrestre paralelo à mesma. Foi utilizada uma malha bidimensional de elementos finitos para a

solução do problema, levando em consideração diferentes situações envolvendo a resistividade de solo não homogêneo e a geometria da linha de transmissão, bem como assumindo que a falha na linha ocorra distante da região de aproximação com o duto interferido, o que torna a influência condutiva desprezível.

Dawalibi *et al*. (2000) pesquisaram sobre os níveis de tensões de passo e de toque para certos cenários característicos de compartilhamento de faixa de servidão, durante a operação normal e quando da ocorrência de curto-circuito em uma linha de transmissão. O objetivo foi de buscar meios de garantir a segurança de pessoas e as condições operativas de dutos, visto que as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários podem constituir uma ameaça para ambos. Foi demonstrada a eficácia das medidas mitigadoras apresentadas para reduzir os riscos de tensões perigosas para dutos e pessoas expostos às influências de sistemas de energia elétrica nas proximidades.

Aplicando o método de elementos finitos, em conjunto com a lei de Faraday e uma análise típica de circuitos, Christoforidis *et al*. (2001) apresentaram um método híbrido aprimorado, com o objetivo de estimar as tensões e correntes induzidas em um duto com falhas no revestimento externo, paralelo a uma linha de transmissão sob falha. Considerou-se na aplicação do método a falha distante do vão de aproximação com o duto interferido, de modo que a influência condutiva fosse desprezível. Assim, obteve-se uma análise bidimensional demonstrando que, para baixos valores de resistência, os resultados indicam que as falhas nos revestimentos se comportam como medidas mitigadoras para as tensões C.A. induzidas nos dutos. Contudo, desta forma, as correntes mais elevadas que escoam para o solo podem colocar em risco a integridade dos dutos.

Gabillard *et al*. (2001) apresentaram estudos realizados em laboratório e experiências em campo que possibilitaram a definição dos principais parâmetros relacionados aos riscos de corrosão C.A., com o objetivo de se evitar que os mesmos venham a ocorrer em dutos interferidos. Foram analisados processos corrosivos identificados em dutos revestidos com polietileno protegidos por proteção catódica, porém, sujeitos aos efeitos nocivos da influência indutiva de sistemas de energia elétrica, a fim de ratificar a importância de se definir formas de avaliar as ameaças à integridade de dutos e de mitigar as mesmas.

Southey *et al*. (2001) apresentaram importantes fundamentos para avaliar qual extensão de cabos para controle de gradiente é necessária como medida mitigadora para um duto sujeito à influência indutiva de um sistema de energia elétrica em operação próximo ao mesmo. Neste caso, foram avaliadas a relevância de cada uma das variáveis consideradas, frente às tensões C.A. induzidas e à eficiência de mitigação, tais como: corrente de operação;

comprimento de exposição; separação entre as instalações; cruzamentos entre as estruturas envolvidas; silhueta das torres da linha de transmissão; arranjo de cabos contrapeso; e resistividade do solo.

Elhirbawy *et al*. (2003) realizaram o cálculo e a análise dos campos eletromagnéticos oriundos de sistemas de energia elétrica, através do método das diferenças finitas (FDM, na sigla em inglês), sobretudo na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão. Foi apresentando um modelo de testes para avaliar as influências de linhas de transmissão em um duto terrestre, no qual os resultados foram obtidos a partir de medições dos campos elétricos e magnéticos no duto interferido, no sentido de investigar as respectivas consequências das influências causadas pelas linhas. Foram realizadas, ainda, simulações computacionais para análise dos efeitos em questão e definição das medidas mitigadoras necessárias à integridade de dutos e à segurança de pessoas.

Christoforidis *et al*. (2003) abordaram o uso de elementos finitos, em conjunto com a lei de Faraday e a análise típica de circuitos, para estimar os níveis de tensão e de corrente induzidas em um duto com falhas no revestimento, devido à condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão próxima. As aproximações entre ambas as instalações com formatos irregulares foram convertidas em paralelismos e as falhas no revestimento do duto assumidas como sendo resistências elétricas. Foi adotado o local da falha na linha de transmissão fora da zona de influência, de modo que a influência condutiva fosse desprezível.

Christoforidis *et al*. (2005a) apresentaram um novo método utilizando elementos finitos, juntamente com a análise típica de circuitos, para estimar as tensões e correntes induzidas em um duto, no qual os resultados obtidos apontaram conformidade com os que foram apresentados anteriormente. Características significativas, como a resistência do revestimento do duto, arranjo do sistema de aterramento das torres e resistividade do solo foram analisadas, possibilitando a criação de curvas úteis em estudos desta aérea.

Em seguida, Christoforidis *et al*. (2005b) investigaram a influência de um solo heterogêneo, com diversas camadas horizontais e verticais de resistividade, demonstrando ser um parâmetro que influi significativamente nos níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários. Utilizou-se para estimar os níveis de influência indutiva o método dos elementos finitos, em conjunto com a análise típica de circuitos, no qual os resultados obtidos ressaltaram a importância de se conhecer da forma mais precisa possível os valores de resistividade do solo local, para que haja a possibilidade de prever, com o menor erro possível, os níveis de influência causados por linhas de transmissão. Indicaram, também,

que deve-se proceder às medições de resistividade do solo em pontos afastados da faixa de servidão e em profundidades apropriadas.

Tsiamitros *et al*. (2005, 2008) investigaram a influência de um solo multicamadas nas impedâncias dos condutores de linhas de transmissão subterrâneas, bem como nos transitórios de tensão e de corrente. Foi apresentando um método criterioso para o cálculo do campo eletromagnético, no caso de condutores de linhas de transmissão subterrâneas em um solo modelado em duas camadas, no qual as expressões analíticas para impedâncias próprias e mútuas dos condutores são derivadas. Assim, através de uma nova estratégia de integração, as integrais semi-infinitas consideradas no método são calculadas de forma consistente e eficaz, numericamente falando, utilizando o método de elementos finitos.

Petrache *et al*. (2005) apresentaram uma revisão sobre métodos teóricos para o cálculo das correntes e tensões induzidas por raios em cabos enterrados, onde o estudo das respectivas perturbações induzidas exige calcular o campo elétrico gerado pela descarga atmosférica ao longo dos condutores. Demostraram que é possível estimar de forma precisa o campo elétrico que permeia horizontalmente no solo, através da fórmula simplificada de (COORAY, 2001), e, ainda, que as expressões de (POLLACZEK, 1926) e (SUNDE, 1949) se relacionam, na ocasião em que a corrente de deslocamento não é considerada, sendo apresentada uma análise de diferentes formas de estimar a impedância do solo.

Metwally e Heidler (2005) apresentaram uma simulação computacional para estimar as influências de sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, durante a operação normal de uma linha de transmissão e sob descargas atmosféricas diretas e indiretamente na mesma, através do método dos Momentos associado ao modelo de linha de transmissão. Foram investigados os efeitos da aplicação de cabos para-raios adicionais sob os condutores fase da linha e as diferentes formas de onda de corrente presentes, buscando cobrir todo espectro possível previsto para uma descarga, a fim de atender aos limites de segurança. Os resultados demostraram que os cabos para-raios extras apresentam benefícios, tais como: diminuição dos campos elétricos e magnéticos na frequência da rede no nível do solo; utilização dos mesmos como cabos óticos para telecomunicações, devido à menor probabilidade de serem atingidos por descargas; redução das tensões nos isoladores da linha de transmissão durante descargas atmosféricas; e mitigação das tensões C.A. induzidas em dutos interferidos.

Bortels *et al*. (2006) apresentaram uma ferramenta computacional para simulação de técnicas preditivas e medidas mitigadoras para as influências de sistemas de energia elétrica sobre sistemas dutoviários, no qual é capaz de trabalhar com diferentes cenários de estudo,

sem limites para o número de linhas de transmissão, de dutos, de sistemas de aterramento, de revestimentos e de resistividades do solo. Para o cálculo da força eletromotriz (FEM), foi considerando um método numérico que possibilita aplicar individualmente para cada segmento de duto parâmetros específicos, como: diâmetro; revestimento; resistividade do solo etc. Ressaltaram que a formulação utilizada para o cálculo de FEMs induzidas em dutos deve ser cautelosamente aplicada, em particular nos casos em que linha de transmissão e duto se encontram mais distantes.

Ismail (2007) apresentou a aplicação do método de simulação de cargas para modelar condutores de uma linha de transmissão e dutos, a fim de simular as influências dos sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários. Foram estudados os efeitos no caso de um único duto, assumindo diferentes diâmetros, localizado em uma posição central em relação ao arranjo das estruturas em uma faixa compartilhada, bem como considerando dois dutos paralelos, separados por certa distância. O objetivo foi de verificar o tamanho da faixa que, de fato, deve ser adquirida para que ambos os sistemas possam compartilhá-la com segurança, tendo como prioridade a menor largura possível, através da análise da distribuição dos níveis de campo elétrico acima e abaixo da superfície do solo.

Cotton *et al*. (2007) analisaram as tensões C.A. induzidas em um duto terrestre paralelo a uma linha de transmissão, durante surtos de manobra ou ocorrência de descargas atmosféricas incididas na mesma, através da modelagem de circuitos com base no acoplamento da frequência às transformadas de Fourier direta e inversa. Foi investigada a importância de se trabalhar com um modelo que considera por completo a linha de transmissão e o duto interferido, bem como o nível de tensão C.A. induzida no mesmo, em função da extensão do paralelismo entre ambas as instalações e da resistividade do solo local.

Kopsidas e Cotton (2008) aprimoraram o trabalho anterior modelando o arco gerado entre um cabo para-raios e um condutor fase, denominado "*backflashover*", de uma torre de linha de transmissão próxima a um duto, permitindo com que a influência condutiva ocorra simultaneamente às influências indutiva e capacitiva. Foi apresentado o impacto de descargas atmosféricas e surtos em dutos aéreos e enterrados paralelos a uma linha de transmissão, considerando diferentes comprimentos de paralelismo e resistividades do solo. Demostraram que dutos aéreos são mais suscetíveis aos efeitos de transitórios e que, ao passo que o comprimento crítico de paralelismo entre as estruturas envolvidas tenha sido alcançado, o aumento de sua extensão não provoca tensões C.A. mais elevadas.

Uribe (2008) apresentou um algoritmo preciso e eficaz para a avaliação da integral de acoplamento de (POLLACZEK, 1926), que não possui solução analítica de forma fechada,

para o cálculo das impedâncias mútuas entre condutores aéreos e enterrados. Os resultados obtidos foram aplicados na avaliação numérica de fórmulas aproximadas apresentadas por (LUCCA, 1994), (WEDEPOHL; WILCOX, 1973) e *Comité Consultatif International Téléphonique et Télégraphique*.

Papadopoulos *et al*. (2010) apresentaram um método generalizado para o cálculo do efeito do percurso de retorno à terra nas impedâncias e admitâncias de linhas de transmissão subterrâneas, derivado de uma resolução criteriosa das equações do campo eletromagnético. Expressões para os termos de correção de impedâncias próprias e mútuas foram obtidas e as integrais semi-infinitas em questão resolvidas através do método de integração numérica em (PAPAGIANNIS *et al*., 2005). Foi realizada a análise e a comparação do comportamento quanto à propagação de apenas um condutor isolado e de uma configuração característica de cabo de núcleo único trifásico com os resultados obtidos por meio de outras técnicas.

Dando continuidade ao trabalho anterior, Papadopoulos *et al*. (2011) examinaram a influência de um solo multicamadas nas admitâncias e impedâncias de linhas de transmissão subterrâneas, no qual os parâmetros referentes às camadas do solo foram considerados em um método criterioso para o cálculo do campo eletromagnético. Desta forma, obtiveram-se novas expressões, e os resultados obtidos através do método apresentado para a propagação modal foram aplicados na simulação de respostas em alta frequência, no estado estacionário.

Zou *et al*. (2011) apresentaram um algoritmo de rápida execução e grande eficiência para calcular a integral de (POLLACZEK, 1926), a fim de determinar com precisão a impedância de retorno pelo solo de condutores enterrados, através da aproximação da cauda da referida expressão por uma soma de várias integrais exponenciais. Foi demonstrado que não ocorre o efeito do "truncamento" para a integral de Pollaczek na natureza, e que a impedância de retorno pelo solo exerce uma função significativa para a impedância própria de um condutor enterrado.

Lucca (2011) apresentou um método numérico para avaliar as tensões e correntes induzidas em um duto terrestre, devido às influências indutiva e condutiva de uma linha de transmissão sob falha, através de dois passos: o primeiro considerando uma linha de transmissão com cabos para-raios com retorno pelo solo sem a presença do duto interferido e o segundo levando em consideração a existência do mesmo.

Qi *et al*. (2012) propuseram um método que considera um modelo horizontal para o solo, com base nas equações vetoriais do dipolo elétrico horizontal, tendo em vista que as características de sistemas multicondutores, por exemplo, linhas de transmissão áreas e dutos enterrados, bem como outras estruturas, possuem especial relevância nas análises de

compatibilidade eletromagnética dentro e entre sistemas de proteção contra sobretensão, no que diz respeito aos parâmetros de impedância e admitância. No método apresentado, a formulação de impedâncias de retorno pelo solo é derivada através das condições de interface e de contorno do campo elétrico e do campo magnético.

Gouda *et al*. (2013) apresentaram um estudo a respeito das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, utilizando o método de análise de fontes distribuídas para estimar os níveis de influência indutiva gerada por uma linha de transmissão aérea em um duto terrestre, durante o regime de operação normal da mesma. Foram comparados os resultados obtidos com os valores das medições realizadas em campo, demostrando boa aproximação entre os mesmos. Adicionalmente, utilizou-se o programa ATP para simular a linha de transmissão na condição de falha, a fim de estimar a influência condutiva, considerando os efeitos dos parâmetros envolvidos, como a resistividade do solo e as distâncias de separação entre os sistemas.

Micu *et al*. (2013) abordaram as influências de sistemas de energia elétrica em dutoviários sob aspectos relevantes que, segundo os autores, não haviam sido analisados e demandavam estudos, apesar de muitos trabalhos anteriores terem apontado parâmetros que interferem significativamente nos níveis de influência, bem como apresentado métodos para estimá-los e mitigá-los. A exemplo disso, as influências causadas por linhas de transmissão de circuito duplo em dutos, tomando como base carregamentos diferentes entre os circuitos, deslocamento de fase, sequência de fases e carregamento desequilibrado, a fim de fornecer um detalhamento útil para a avaliação de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários.

Qi *et al*. (2013) apresentaram o uso de modelos de parâmetros concentrados e distribuídos para modelagem do sistema de aterramento das torres de uma linha de transmissão e avaliação da influência indutiva em um duto interferido. Utilizou-se, também, o método dos Momentos para estimar a influência condutiva em duto próximo à uma linha de transmissão sob falha, investigando como interferem os níveis de contribuição de corrente de curto-circuito das subestações terminais, a localização da falha na linha de transmissão, o comprimento de exposição e a distância de separação entre as estruturas envolvidas, a resistividade do solo, as resistências de aterramento das torres e a resistividade do revestimento externo do duto nos níveis de tensão imposta ao revestimento do mesmo. Foi demonstrado que, em relação aos cálculos de resistência de aterramento das torres, os resultados obtidos através do método de parâmetros concentrados têm maior precisão em relação aos apresentados pelo método de parâmetros distribuídos.

Lucca (2016) propôs uma forma de estimar os danos causados ao longo do tempo em revestimentos externos de dutos interferidos, devido às influências de sistemas de energia elétrica ou ferroviários próximos aos mesmos. Foi apresentada uma lei empírica para caracterizar a deterioração da resistência do revestimento do duto no solo, bem como demostrada a importância de se considerar este assunto nas avaliações das referidas influências em sistemas dutoviários. Ressaltou-se que, de praxe, não se leva em conta o tema abordado e que, sob certas condições, a vida útil de um duto pode ser consideravelmente reduzida, em alguns casos, em dezenas de anos, devido aos níveis de influência.

2.3. SEGURANÇA DE PESSOAS

Conforme abordado na seção anterior, as aproximações entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, sejam elas casos de paralelismo e/ou de cruzamento entre linhas de transmissão e dutos terrestres, tornou-se algo constante, não só no Brasil como também em outras partes do mundo. Em todos os casos, tensões indesejáveis podem ser transmitidas de linhas de transmissão para dutos, através das influências indutiva e condutiva, em situações de aproximação entre ambas as estruturas, e, neste caso, tensões induzidas podem aparecer no duto interferido.

O nível de tensão aplicado a um duto pode ir de dezena a centenas de volts durante a operação de uma linha de transmissão e chegar a milhares de volts durante um curto-circuito monofásico, o que pode colocar em risco a integridade dos dutos envolvidos e, por conseguinte, a segurança de pessoas.

Tensões acima de 15 V durante a operação normal de linhas de transmissão devem ser consideradas perigosas, por oferecer risco de choque elétrico, pois ao atravessar uma carga de resistência próxima ao do corpo humano, por exemplo, 1.500 Ω, produziriam uma circulação de corrente de 10 mA, e medidas mitigadoras devem ser tomadas para reduzir os níveis de tensão perigosos, de acordo com a norma técnica NACE SP0177-2014. Sob certas circunstâncias, uma análise mais conservativa poderia sugerir um valor ainda mais baixo.

As análises acerca dos efeitos relacionados a choque elétrico tiveram início com Ferris *et al*. (1936) e, posteriormente, explorados por Dalziel e Lagen (1941), o que levou a um melhor entendimento da importância da avaliação de situações previstas quando um indivíduo é submetido a um dado potencial elétrico, que por sua vez podem acarretar em riscos à sua integridade física, devido à corrente circula por seu corpo. Esta percepção se refletiu nos trabalhos que deram origem às normas de segurança vigentes e aos respectivos

critérios estabelecidos nas mesmas. No que diz respeito à análise das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, é primordial verificar a existência de possíveis riscos de choque elétrico ao público em geral e ao pessoal envolvido nos serviços de operação e manutenção que, eventualmente, entrem em contato direto com dutos e/ou seus equipamentos nos pontos de afloramento dos mesmos (tensão de toque), ou sejam submetidos à tensão de passo nos vãos de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários.

Ferris *et al*. (1936) verificou que o choque elétrico pode desestabilizar o ritmo dos batimentos cardíacos, provocando fibrilação ventricular sem causar danos ao tecido do coração, porém, levando a óbito um indivíduo em poucos minutos. Este efeito cardíaco veio a ser um meio de estabelecer a corrente máxima que uma pessoa poderia suportar de forma segura, por curtos períodos. Para tanto, foram submetidos diversos animais de diferentes espécies, com tamanhos compatíveis a de um homem, a situações distintas de frequência das correntes, de caminhos pelo corpo e de duração, a fim de determinar os limiares de fibrilação.

Dalziel *et al*. (1941) apresentaram um estudo com base em experimentos realizados em 120 homens, a fim de investigar os efeitos de pequenas correntes elétricas à frequência de 60 Hz que, embora não sejam capazes de deixar um indivíduo inconsciente ou de leva-lo à morte, são suficientes o bastante para provocar contrações musculares involuntárias, trazendo riscos à integridade física de pessoas. O estudo foi motivado pelo grande número de equipamentos elétricos com eletrodos expostos, por exemplo, máquina de solda elétrica, cerca elétrica, armadilha elétrica para insetos etc, que, por sua vez, causam acidentes fatais de usuários. Desta forma, ressaltou-se a importância do aprofundamento dos conhecimentos acerca dos efeitos causado ao homem por choque elétrico.

Embora sua elaboração ser motivada por outra área, seu escopo se adequa a situações semelhantes no que tange a segurança de pessoas envolvidas nos trabalhos junto a sistemas dutoviários, por abordar os cuidados necessários para se evitar os riscos de choque elétrico. Trata-se da recomendação ITU-T K.33 (10/96), que consolidou os trabalhos realizados anteriormente, estabelecendo os valores admissíveis de tensão elétrica submetidos a indivíduos que entrem contato com circuitos de sistemas de telecomunicações expostos à influência indutiva, decorrente de falhas em linhas de transmissão. Tendo sido elaborada com base na experiência que fora adquirida por operadoras da referida área ao longo de décadas, bem como considerando outras informações relevantes, como dados biológicos, possíveis percursos da corrente elétrica através do corpo, impedâncias no circuito etc.

A Figura 7 indica as porcentagens de impedância do corpo humano para os caminhos

da corrente elétrica pelo mesmo, em relação ao circuito mão-a-mão. Os valores à esquerda ou únicos referem-se às impedâncias dos caminhos das correntes de uma mão para uma respectiva parte do corpo, e à direita são indicadas as impedâncias referentes aos caminhos das correntes entre as duas mãos e as partes correspondentes do corpo.

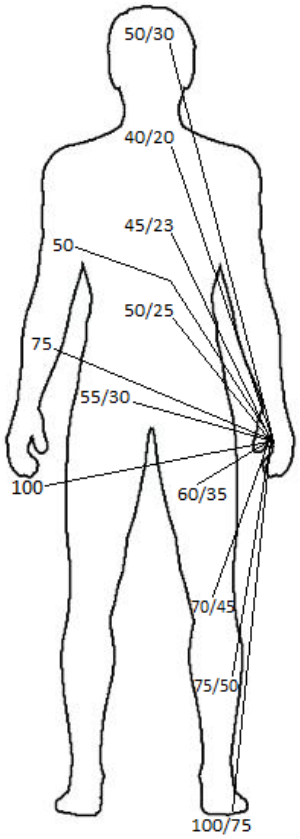

Figura 7: Impedâncias do corpo humano em função do caminho da corrente elétrica.
Fonte: Inspirada na recomendação ITU-T K.33 (10/96).

Conforme mencionado anteriormente, a norma técnica NACE SP0177-2014 salienta que medidas devem ser tomadas para reduzir os riscos de choque elétrico e contribuir com a segurança de pessoas envolvidas na construção, na operação ou na manutenção de sistemas dutoviários, por estarem expostas aos perigos das tensões C.A. nessas estruturas. De acordo com a referida norma, a gravidade do risco depende de diversos fatores, como níveis de tensão, condições do corpo e da pele, duração da exposição e intensidade e caminho da corrente elétrica pelo corpo humano, sendo a intensidade da corrente elétrica, em parte, resultado da resistência elétrica do caminho realizado pelo corpo humano. As Tabelas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os valores estimados de resistência do corpo humano e de corrente elétrica com seus respectivos efeitos.

Tabela 1: Resistência do corpo humano à passagem da corrente elétrica.

Condição	Valor (Ω)
Pele seca	10^5 a $6x10^5$
Pele molhada	10^3
Caminho da mão ao pé	400 a 600
Caminho de orelha a orelha	~ 100

Tabela 2: Valores aproximados de corrente alternada a 60 Hz que afetam seres humanos.

Corrente (mA)	Efeitos
1 ou menos	Nenhuma sensação de choque.
1 a 8	Sensação de choque – não doloroso; controle muscular não perdido; indivíduo pode sair à vontade.
8 a 15	Choque doloroso – controle muscular não perdido; indivíduo pode sair à vontade.
15 a 20	Choque doloroso – controle muscular perdido; indivíduo não pode sair.
20 a 50	Choque doloroso – contrações musculares severas; respiração com dificuldade.
50 a 100	Fibrilação ventricular – morte como consequência, caso não seja realizada massagem cardíaca imediatamente.
100 a 200	Desfibrilador deve ser aplicado para restaurar o batimento cardíaco normal. Respiração provavelmente interrompida.
200 ou mais	Queimaduras graves – contrações musculares severas; músculos do peito apertam o coração e param durante o choque. Desfibrilador deve ser aplicado para restaurar o batimento cardíaco normal. Respiração provavelmente interrompida.

3. MÉTODOS GERAIS PARA SE ESTIMAR OS NÍVEIS DE INFLUÊNCIA

3.1. INFLUÊNCIA INDUTIVA

Um método clássico comumente empregado para calcular a influência indutiva em dutos terrestres causada por linhas de transmissão aéreas é a análise de fontes distribuídas descrita em (TAFLOVE; DABKOWSKI, 1979; DABKOWSKI; TAFLOVE, 1979), na qual a influência indutiva pode ser considerada como uma fonte de tensão distribuída V_d ao longo de cada subsegmento de um duto interferido, com V_d resultando a partir do campo elétrico longitudinal paralelo ao mesmo. Com relação a subsegmentos de dutos, geralmente, para estimar as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, um duto interferido é dividido em segmentos de acordo com seus vértices. No entanto, para maior precisão dos resultados, cada segmento de duto pode ser dividido ainda em subsegmentos, a fim de permitir que a avaliação de influências de sistemas de energia elétrica seja realizada através de uma abordagem mais uniforme (DAWALIBI; SOUTHEY, 1989), eletricamente falando, conforme adotado no presente trabalho.

Generalizando a partir do circuito de célula π representado na Figura 8, as tensões C.A. induzidas em cada subsegmento do duto interferido devido à influência indutiva podem ser estimadas através de (CIGRE WORKING GROUP 36.02, 1995).

$$\dot{V}_d = \dot{I}_f Z_{f,d} \, . \tag{3.1}$$

Tal que $\dot{V}_d$ é o fasor da tensão C.A. induzida no subsegmento de duto, em V; $\dot{I}_f$ o fasor da corrente elétrica no condutor fase, em A; $Z_{f,d}$ a impedância mútua entre condutor fase e subsegmento de duto, em Ω/km.

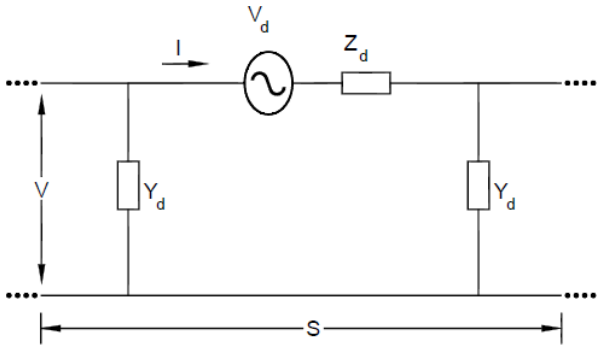

Figura 8: Circuito de célula π para um subsegmento ao longo do duto.

3.1.1. Cálculo da impedância série e admitância do duto

De acordo com (CIGRE WORKING GROUP 36.02, 1995), as impedâncias série e admitâncias de subsegmentos de dutos terrestres podem ser aproximadas usando as expressões (3.2) e (3.3). A exceção de dutos sem revestimento externo ou revestidos com camadas isolantes com baixos valores de resistência específica r_r ($r_r = \rho_r \delta_r$).

3.1.1.1. Impedância série

$$Z_d = \frac{\sqrt{\rho_d \mu_0 \mu_r \omega}}{\pi D_d \sqrt{2}} + \frac{\mu_0 \omega}{8} + j\left(\frac{\sqrt{\rho_d \mu_0 \mu_r \omega}}{\pi D_d \sqrt{2}} + \frac{\mu_0 \omega}{2\pi} \ln \frac{3{,}7\sqrt{\rho_s \omega^{-1} \mu_0^{-1}}}{D_d}\right). \quad (3.2)$$

3.1.1.2. Admitância

$$Y_d = \frac{\pi D_d}{\rho_r \delta_r} + j\omega \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r \pi D_d}{\delta_r}. \quad (3.3)$$

Tal que Z_d é a impedância série do subsegmento de duto, em Ω/m; ρ_d a resistividade do duto, em Ω.m; μ_0 a permeabilidade magnética do espaço livre (4π x 10^{-7} H/m); μ_r a permeabilidade magnética relativa do duto, em p.u.; ω a frequência angular, em rad/s; D_d o diâmetro do duto, em m; ρ_s a resistividade do solo, em Ω.m; ρ_r a resistividade do revestimento do duto (Ω.m); δ_r a espessura do revestimento do duto, em m; ε_0 a permissividade elétrica do espaço livre (8,854 x 10^{-12} F/m); ε_r a permissividade elétrica relativa do revestimento do duto, em p.u.

Expandindo $\dot{I}_f$ dado em (3.1) para um sistema elétrico trifásico, como no caso de uma linha de transmissão aérea com correntes $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$ circulando em seus condutores fase, e, ainda, $Z_{f,d}$ como as respectivas impedâncias mútuas entre os referidos condutores e um subsegmento do duto terrestre $Z_{a,d}$, $Z_{b,d}$ e $Z_{c,d}$, a tensão C.A. induzida em cada subsegmento do duto interferido pode ser estimada por:

$$\dot{V}_d = \dot{I}_a Z_{a,d} + \dot{I}_b Z_{b,d} + \dot{I}_c Z_{c,d}. \quad (3.4)$$

Tal que $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$ e $\dot{I}_c$ são os fasores das correntes elétricas das fases A, B e C, respectivamente, em A; $Z_{a,d}$, $Z_{b,d}$ e $Z_{c,d}$ as impedâncias mútuas entre os condutores das fases

A, B e C e subsegmento de duto, respectivamente, em Ω/km.

Considerando que a linha de transmissão possui aterramento de forma segmentada pelo cabo para-raios e que a corrente elétrica no mesmo não é zero, como no caso de condição de falha envolvendo a terra, a fonte de tensão distribuída $\dot{V}_d$ pode ser estimada em cada subsegmento ao longo do duto interferido através de:

$$\dot{V}_d = \dot{I}_a Z'_{a,d} + \dot{I}_b Z'_{b,d} + \dot{I}_c Z'_{c,d} + \sum_{i=1}^{n} \dot{I}_i Z_{i_pr,d} \ .\ \dot{I}_i > 0 \tag{3.5}$$

Sendo $Z'_{f,d}$ em (3.1) dado por:

$$Z'_{f,d} = Z_{f,d} \times K_{sf} \ . \tag{3.6}$$

Tal que $Z'_{a,d}$, $Z'_{b,d}$ e $Z'_{c,d}$ são as impedâncias mútuas entre os condutores das fases A, B e C e subsegmento de duto, respectivamente, considerando o efeito de blindagem do cabo para-raios, em Ω/km; $\dot{I}_{i_pr}$ a corrente elétrica no i-ésimo vão do cabo para-raios, em A; $Z_{i_pr,d}$ a impedância mútua entre o i-ésimo vão do cabo para-raios e o subsegmento de duto, em Ω/km; K_{sf} é o coeficiente de blindagem do cabo para-raios (*screening factor*), admissional.

Tal que K_{sf} é calculado através de:

$$K_{sf} = 1 - \frac{Z_{f,pr}}{Z_{pr}} \times \frac{Z_{pr,d}}{Z_{f,d}}. \tag{3.7}$$

Tal que $Z_{f,pr}$ é a impedância mútua entre condutor fase e cabo para-raios, em Ω/km; Z_{pr} a impedância própria do cabo para-raios, em Ω/km; $Z_{pr,d}$ a impedância mútua entre o cabo para-raios e subsegmento de duto, em Ω/km.

3.1.2. Impedância mútua entre linha de transmissão aérea e duto terrestre

Em análises utilizando métodos analíticos, as impedâncias mútuas entre condutores fase/cabos para-raios de linhas de transmissão aéreas e subsegmentos de dutos terrestres são geralmente estimadas com base nas fórmulas amplamente conhecidas de (CARSON, 1926;

POLLACZEK, 1926), nas quais consideram o efeito de retorno pelo solo. As fórmulas aproximadas tipicamente aplicadas na maioria dos casos são apresentadas nas subseções a seguir.

3.1.2.1. Fórmula aproximada de Carson-Clem

Considerando exclusivamente os termos iniciais das expansões assintóticas P e Q de correção do efeito de retorno pelo solo no modelo de (CARSON, 1926), a fórmula aproximada apresentada em (CIGRE WORKING GROUP 36.02, 1995), denominada fórmula de Carson-Clem, é empregada para estimar as impedâncias mútuas entre condutores fase/cabos para-raios de linhas de transmissão aéreas e subsegmentos de dutos terrestres, partindo de (3.8)

$$Z_{f/pr,d} = j2\omega.\log\left(\frac{D_e}{D_{f/pr,d}}\right) + 4\omega\int_0^\infty \left(\sqrt{\mu_0^2 + j} - \mu_0\right) e^{-(h_1+h_2)\mu} \cos x'\,\mu_0\, d\mu_0\,, \qquad (3.8)$$

tal que, conforme Carson

$$J(p,q) = J = \int_0^\infty \left(\sqrt{\mu_0^2 + j} - \mu_0\right) e^{-p\mu} \cos q\,\mu_0\, d\mu_0\,, \qquad (3.9)$$

sendo

$$J = P + jQ\,, \qquad (3.10)$$

substituindo (3.10) em (3.8)

$$Z_{f/pr,d} = j2\omega.\log\left(\frac{D_e}{D_{f/pr,d}}\right) + 4\omega(P + jQ)\,, \qquad (3.11)$$

tal que P e Q são obtidos por:

$$P = \frac{\pi}{8} - \frac{1}{3\sqrt{2}} r\cos\theta + \frac{r^2}{16}\cos 2\theta\left(0{,}6728 + \log\frac{2}{r}\right) + \frac{r^2}{16}\theta\,\text{sen}\,2\theta\,, \qquad (3.12)$$

$$Q = -0{,}0386 + \frac{1}{2}\log\left(\frac{2}{r}\right) + \frac{1}{3\sqrt{2}} r\cos\theta\ . \tag{3.13}$$

Resolvendo (3.12) e (3.13) e substituindo em (3.11), obtém-se a seguinte fórmula aproximada:

$$Z_{f/pr,d} = \frac{\mu_0\omega}{8} + j\frac{\mu_0\omega}{2\pi}\ln\left(\frac{D_e}{D_{f/pr,d}}\right). \tag{3.14}$$

D_e é dado por:

$$D_e = 658{,}37\sqrt{\rho_s/f}\ . \tag{3.15}$$

Tal que $Z_{f/pr,d}$ é a impedância mútua entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto, em Ω/km; D_e a profundidade de retorno pelo solo equivalente, em Ω.m; $D_{f/pr,d}$ a distância entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto, em m; ρ_s a resistividade do solo, em Ω.m; f a frequência, em Hz.

Ressalta-se que a fórmula aproximada (3.14) considera o duto terrestre e o solo local como a imagem de um condutor equivalente com retorno pelo solo com profundidade D_e, e que a altura do condutor da linha de transmissão aérea e a profundidade do duto terrestre possuem valores significativos, quando comparados à profundidade equivalente do caminho de retorno pelo solo, conforme indicado na Figura 9. O que pode ser assumido para valores de frequência nominal da rede e de baixa resistividade do solo (WU *et al.*, 2017), levando a aproximação em questão ser consideravelmente precisa para pequenas distâncias de separação entre condutores aéreos e subsegmentos de dutos, conforme (3.16) a seguir. Esta limitação, devido aos erros inseridos pela aproximação da fórmula de Carson, pode ser observada na Figura 10, no qual, ao contrário do esperado, os valores de impedância mútua aumentam, ao invés de reduzir, conforme a distância.

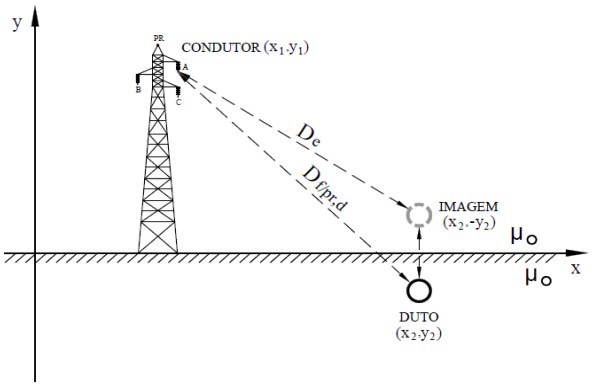

Figura 9: Sistema considerado na aproximação de Carson-Clem.

$$D_{f/pr,d} \leq 90\sqrt{\rho_s/f}\,. \tag{3.16}$$

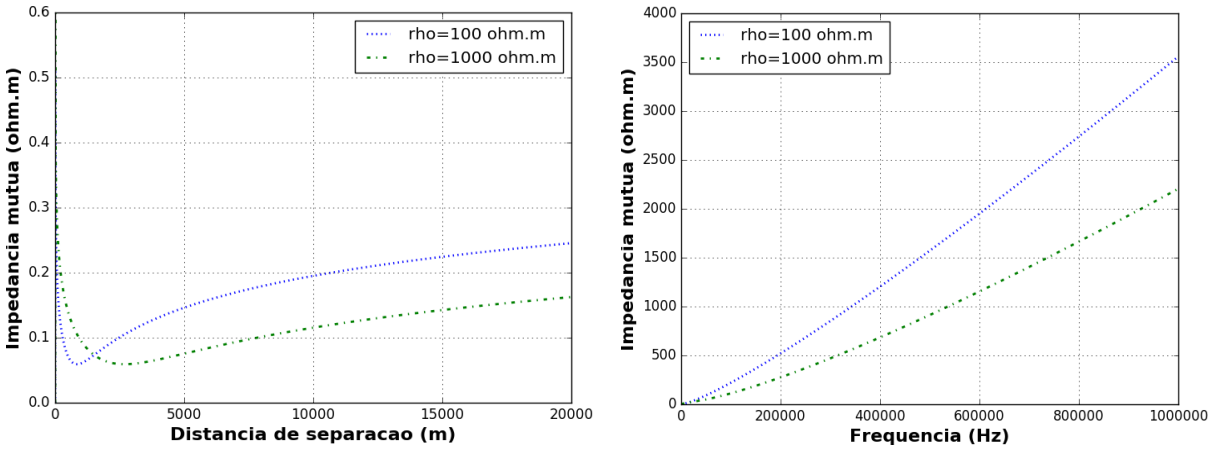

Figura 10: Verificação da impedância mútua devido à simplificação da fórmula de Carson: (a) em função da distância de separação; (b) em função da frequência.

3.1.2.2. Fórmula aproximada de Lucca

Dada a teoria de acoplamento eletromagnético de baixa frequência para linhas de transmissão com retorno ao solo, encontrada em expressões para a impedância mútua em diferentes casos, dependendo da localização dos condutores; i.e., aéreos, na interface ar-solo ou enterrados; Lucca (1994) propôs uma fórmula aproximada simples, levando em conta o efeito de retorno de pelo solo, aplicável ao cálculo de impedâncias mútuas entre condutores fase/cabos para-raios de linhas de transmissão aéreas e subsegmentos de dutos terrestres, de acordo com a geometria do problema ilustrado na Figura 11, sendo a mesma deduzida a partir do modelo exato de (CARSON, 1926) e envolvendo aproximações relevantes, conforme apresentado a seguir.

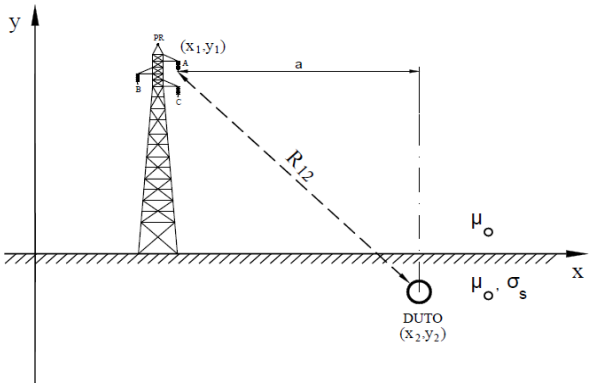

Figura 11: Geometria do problema de Lucca.

A fim de obter uma fórmula simples aproximada, Lucca partiu de (3.17)

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\int_0^\infty \frac{2e^{-\lambda y_1}e^{y_2\sqrt{\lambda^2-k_s^2}}\cos\lambda a}{\lambda+\sqrt{\lambda^2-k_s^2}}d\lambda\,, \tag{3.17}$$

que, por conveniência, pode ser reescrita como

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\int_0^\infty \frac{1}{\lambda}\left[1-\frac{\sqrt{\lambda^2-k_s^2}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2-k_s^2}+\lambda}\right]e^{-\lambda y_1}e^{y_2\sqrt{\lambda^2-k_s^2}}\cos\lambda a\, d\lambda\,. \tag{3.18}$$

Em seguida, Lucca introduziu duas simplificações. Uma por considerar para o problema frequências razoavelmente baixas, bem como valores comuns de condutividade do solo. Além disso, para o caso prático, a equação (3.19) é válida para quase toda a faixa de integração de λ.

$$e^{y_2\sqrt{\lambda^2-k_s^2}} \cong e^{\lambda y_2}\,. \tag{3.19}$$

E outra simplificação, obtendo-se

$$\frac{\sqrt{\lambda^2-k_s^2}-\lambda}{\sqrt{\lambda^2-k_s^2}+\lambda} = e^{-2\frac{\lambda}{\gamma}}\left[1+\frac{\lambda^3}{3\gamma^3}-\frac{3\lambda^5}{20\gamma^5}+\cdots\right]. \tag{3.20}$$

Substituindo (3.19) e (3.20) em (3.18), obtém-se

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left\{\int_0^\infty \frac{1}{\lambda}\left[e^{-\lambda(y_1-y_2)} - e^{-\lambda\bar{y}}\right] cos\,\lambda a\; d\lambda + C\right\}, \tag{3.21}$$

sendo o termo C dado por

$$C = \frac{1}{3\gamma^3}\frac{\partial^2 Q}{\partial x_2^2} - \frac{3}{20\gamma^5}\frac{\partial^4 Q}{\partial x_2^4} + \cdots, \tag{3.22}$$

e Q obtido através de

$$Q = \int_0^\infty e^{-\lambda\bar{y}}\, cos\,\lambda a\; d\lambda = \frac{\bar{y}}{\bar{R}_{12}^2}. \tag{3.23}$$

Desta forma, segundo Lucca, a equação (3.21) pode ser apresentada como

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\ln\left(\frac{1}{2}\ln\frac{\bar{R}_{12}^2}{R_{12}^2} + C\right), \tag{3.24}$$

e, ainda, pode-se desprezar o termo C em (3.24) quando

$$|\gamma R_{12}|^3 \gg 1\,, \tag{3.25}$$

na qual verifica-se uma vez que a distância entre condutores é superior à profundidade do condutor no solo. Para fins práticos, em casos em que (3.25) não ocorre, apenas a primeira soma da série em (3.22) é considerada. Assim

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x_2^2} = \frac{-2\bar{y}}{\bar{R}_{12}^4}\cdot\left[1 - \frac{4a^2}{\bar{R}_{12}^2}\right]. \tag{3.26}$$

Obtendo-se, portanto, a seguinte fórmula aproximada para o cálculo de impedância mútua:

$$Z_{f/pr,d} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left[\ln\left(\frac{\bar{R}_{12}}{R_{12}}\right) - \left(\frac{2\bar{y}}{3\gamma^3}\right)\left(\frac{\bar{y}^2 - 3a^2}{\bar{R}_{12}^6}\right)\right], \tag{3.27}$$

tal que $\bar{R}_{12}$; R_{12}; a; $\bar{y}$; γ são dados por:

$$\bar{R}_{12} = \sqrt{\bar{y}^2 + a^2}\,, \tag{3.28}$$

$$R_{12} = \sqrt{a^2 + (y_1 - y_2)^2}\,, \tag{3.29}$$

$$a = x_2 - x_1\,, \tag{3.30}$$

$$\bar{y} = y_1 - y_2 + \frac{2}{\gamma}\,, \quad Re(\bar{y}) \geq 0\,, \tag{3.31}$$

sendo

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_s}\,. \tag{3.32}$$

Tal que γ é a constante de propagação, em $(m)^{-1}$; $\bar{R}_{12}$ a distância entre condutor fase/cabo para-raios e a imagem do subsegmento de duto, em m; R_{12} a distância entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto, em m; $\bar{y}$ a condutância de retorno pelo solo, em $(\Omega.m)^{-1}$; y_1 a altura do condutor fase/cabo para-raios, em m; y_2 a profundidade do subsegmento de duto, em m; a a separação horizontal entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto, em m; σ_s a condutividade do solo, em $(\Omega.m)^{-1}$.

3.1.2.3. Fórmula aproximada de Ametani

Tendo em vista que o cálculo de impedância mútua de retorno pelo solo é fundamental para análise de tensões C.A. induzidas em um duto interferido, e que muitas das fórmulas com esta finalidade são dadas como integrais ou séries infinitas, incluindo funções complexas de Bessel, Ametani *et al*. (2009) apresentaram uma fórmula simples de forma fechada para estimar as impedâncias mútuas entre condutores fase/cabos para-raios de linhas de transmissão aéreas e subsegmentos de dutos terrestres, para o sistema indicado na Figura 12. Com base em observações e investigações da fórmula de (POLLACZEK, 1926), o seu limite aplicável é derivado analiticamente, a fim de analisar os problemas de instabilidade numérica da referida expressão, conforme detalhado a seguir, embora na aérea de energia

elétrica a integral infinita de Pollaczek tenha sido aceita como uma fórmula precisa para sistemas de condutores isolados no solo.

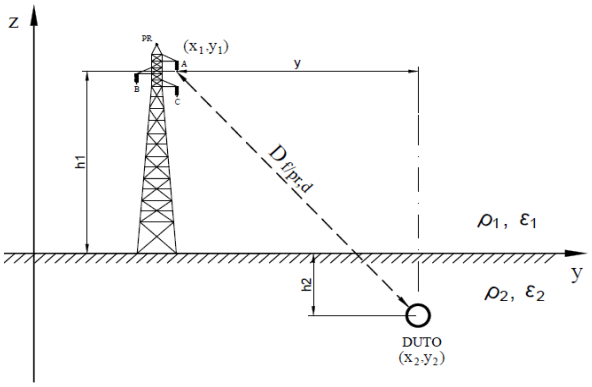

Figura 12: Sistema considerado por Ametani.

Considerando a complexidade de solução da integral infinita de Pollaczek, como abordado em diversos trabalhos, a partir da mesma Ametani *et al*. derivaram uma fórmula aproximada, de fácil implementação, adotando a aproximação indicada em (3.33)

$$\sqrt{\rho_s^2 + \sigma_s^2} \approx \rho_s + \sigma_s \,. \tag{3.33}$$

Reescrevendo a fórmula de Pollaczek como

$$Z_{f/pr,d} = \frac{j\omega(\mu_0/\pi)e^{-h_2\sigma_s}\int_0^\infty exp(-H\rho_s)\cos(y\rho_s)}{\left(\sqrt{\rho_s^2 + \sigma_s^2} + \rho_s\right)d\rho_s}\,, \tag{3.34}$$

tal que

$$H = h_1 + h_2 > 0\,, \tag{3.35}$$

e assumindo

$$exp(-H\rho_s) = 1\,. \tag{3.36}$$

Ainda, de acordo com Ametani *et al*., a expressão (3.34) se torna exatamente igual à fórmula de Déri *et al*. Desta forma, na hipótese de que a equação seja uma função da variável y, então

$$Z_{f/pr,d} = Z_{f/pr,d}(y) = \int Z'_{f/pr,d}\,(y)\,dy\,. \tag{3.37}$$

Assim, a derivada de (3.34) é dada por

$$Z'_m = \frac{-j\omega(\mu_0/\pi)e^{-h_2 m}\int_0^\infty exp(-Hs)\,\mathrm{sen}(ys)\,s}{\left(\sqrt{s^2+m^2}+s\right)ds}, \tag{3.38}$$

e substituindo

$$\mathrm{sen}\,\theta = \left(e^{j\theta} - e^{j\theta}\right)/2j\,, \tag{3.39}$$

em (3.38), obtém-se

$$Z'_{f/pr,d} = \frac{-\omega(\mu_0/2\pi)e^{-h_2\sigma_s}\int_0^\infty\left\{e^{(-H+jy)\rho_s} - e^{(-H-jy)\rho_s}\right\}\rho_s}{\left(\sqrt{\rho_s^2+\sigma_s^2}+\rho_s\right)d\rho_s}, \tag{3.40}$$

e fazendo $\rho_s = \sigma_s t$, tem-se

$$d\rho_s = \sigma_s dt\,, \qquad \sigma_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\rho_s}} = |\sigma_s| exp\left(\frac{j\pi}{4}\right). \tag{3.41}$$

Contudo, conforme Ametani *et al.*, aplicando o teorema de Chausy em (3.40) é obtida a seguinte expressão

$$Z'_{f/pr,d} = \frac{-\sigma_s\omega(\mu_0/2\pi)e^{-h_2\sigma_s}\int_0^\infty\left\{e^{(-H+jy)mt} - e^{(-H-jy)\sigma_s t}\right\}t}{\left(\sqrt{t^2+1}+t\right)dt}, \tag{3.42}$$

e considerando a seguinte aproximação

$$\frac{t}{\sqrt{t^2+1}+t} \approx \frac{1-e^{-2t}}{2}, \tag{3.43}$$

a equação (3.43) é reescrita na forma

$$Z'_{f/pr,d} = -\sigma_s \omega \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) e^{-h_2\sigma_s} \int_0^{\infty} \left(e^{(-H+jy)\sigma_s t} - e^{(-H-jy)\sigma_s t}\right)(1 - e^{-2t})\, dt\,. \tag{3.44}$$

Como resultado da integração da equação (3.44), obtém-se

$$Z'_{f/pr,d} = -\sigma_s \omega \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right) e^{-h_2\sigma_s} \left[\frac{y}{y^2 + H^2} - \frac{y}{y^2 + (H + 2/\sigma_s)^2}\right], \tag{3.45}$$

e integrando a equação (3.45) por y, a impedância mútua é obtida através de:

$$Z_{f/pr,d} = j\omega \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right) exp\left(\frac{-h_2}{Z_s}\right) \ln\left(\frac{\bar{S}}{D_{f/pr,d}}\right), \tag{3.46}$$

tal que S; $D_{f/pr,d}$ são dados por:

$$\bar{S} = \sqrt{(h_1 + h_2 + 2Z_s)^2 + y^2}\,, \tag{3.47}$$

$$D_{f/pr,d} = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + y^2}\,, \tag{3.48}$$

sendo

$$Z_s = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_s}}\,. \tag{3.49}$$

Tal que h_1 é a altura do condutor fase/cabo para-raios, em m; h_2 é a profundidade do subsegmento de duto, em m; Z_s a impedância de retorno pelo solo, em Ω.m; $\bar{S}$ a distância entre condutor fase/cabo para-raios e a imagem do subsegmento de duto, em (m); $D_{f/pr,d}$ a distância entre condutor fase/cabo para-raios e subsegmento de duto, em m; σ_s a condutividade do solo, em $(\Omega.m)^{-1}$.

3.1.3. Cálculo da tensão C.A. induzida

Após os cálculos de impedâncias série e admitâncias dos subsegmentos de um duto terrestre, bem como as respectivas impedâncias mútuas em relação aos condutores fase/cabos para-raios de uma linha de transmissão aérea para determinar as fontes de tensão distribuídas V_d ao longo do duto interferido, a tensão C.A. induzida em cada subsegmento do mesmo pode ser estimada pelo método geral apresentado em (CIGRE WORKING GROUP 36.02, 1995), na qual cada circuito de célula π para um subsegmento de duto é submetido à influência das respectivas FEMs induzidas ou V_d. O circuito completo do duto interferido e as tensões C.A. induzidas estimadas ao longo do traçado do mesmo podem ser obtidas expandindo em termos de tensões de nó para *n* circuitos de célula π dos subsegmentos correspondentes ao comprimento total do duto, incluindo as impedâncias consideradas em suas duas extremidades, como apresentado na Figura 13, e aplicando a análise nodal modificada (MNA, na sigla em inglês) em (RUEHLI; BRENNAN, 1975), respectivamente.

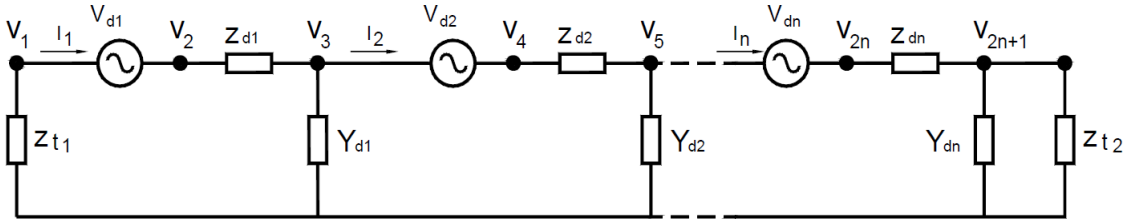

Figura 13: Circuitos de célula π para *n* subsegmentos de duto.

A matriz MNA resultante para *n* circuitos de célula π é apresentada abaixo em (3.50):

$$\begin{bmatrix} Z_{t1}^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Z_{d1}^{-1} & -Z_{d1}^{-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -Z_{d1}^{-1} & Z_{d1}^{-1}+y_{d1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{d2}^{-1} & -Z_{d2}^{-1} & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Z_{d2}^{-1} & Z_{d2}^{-1}+y_{d2} & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{dn}^{-1} & Z_{dn}^{-1}+Z_{eqt2}^{-1} & 0 & 0 & \cdots & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ \vdots \\ V_{2n+1} \\ I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ V_{d1} \\ V_{d2} \\ \vdots \\ V_{dn} \end{bmatrix}. \quad (3.50)$$

3.2. INFLUÊNCIA CONDUTIVA

A influência condutiva de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, denominada GPR do revestimento do duto, ocorre devido a correntes elétricas que fluem para o solo por meio dos aterramentos das torres, em condições de curto-circuito envolvendo a

terra em uma linha de transmissão próxima a um duto terrestre, causando a elevação de potencial na interface solo/revestimento de um duto interferido, nas proximidades do ponto de falha (IBRAHIM, 1999), como representado na Figura 14.

Se essa elevação resultar em uma diferença de potencial superior ao valor máximo suportado pelo revestimento do duto conforme indicado em (NACE SP0177-2014; NBR 16563-1:2016), podem ocorrer danos ao mesmo e, por conseguinte, falhas no duto interferido devido ao surgimento de processos de corrosão, pois a tensão C.A. induzida é uma das causas de seus mecanismos em dutos terrestres, em consequência de defeitos em seus revestimentos (MICU *et al*., 2013).

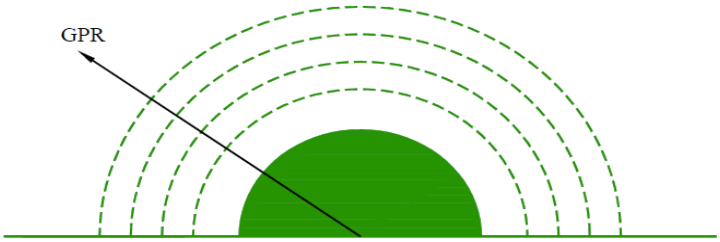

Figura 14: Elevação de potencial no solo.
Fonte: Adaptada de Cigre Working Group 36.02 (1995).

De acordo com (IEEE Std 367-2012), para calcular a elevação de potencial em um ponto qualquer no solo e, por conseguinte, estimar a influência condutiva em um duto terrestre, o aterramento das torres de uma linha de transmissão pode ser minimamente modelado como sendo um eletrodo semiesférico com corrente I_{sh_torre}, em solo uniforme com resistividade ρ_s. À distância $x_{at,d}$, referente à separação entre aterramento de torres e subsegmentos de duto, os valores de GPR dos revestimentos dos mesmos podem ser estimados por:

$$GPR = \sum_{torre=1}^{n} \frac{\rho_s I_{sh_torre}}{2\pi x_{at,d}}. \tag{3.51}$$

Tal que GPR é a elevação de potencial do solo em relação a um subsegmento remoto de duto, em V; ρ_s a resistividade do solo, em Ω.m; I_{sh_torre} a corrente injetada no solo através do aterramento da torre, em A; $x_{at,d}$ a distância entre o aterramento da torre e subsegmento de duto, em m.

3.3. AVALIAÇÃO DAS INFLUÊNCIAS DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DUTOVIÁRIOS

Em linhas gerais, estudos relacionados às influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, envolvendo linhas de transmissão aéreas e dutos terrestres, têm como objetivo apresentar e avaliar os resultados obtidos por simulação computacional para os níveis de tensões indesejáveis em dutos interferidos e sobre a faixa dos mesmos. Estas tensões resultam de ambas as influências indutiva e condutiva, durante a operação normal ou em condições de curto-circuito envolvendo a terra em linhas de transmissão, respectivamente, nos quais são avaliados os riscos à integridade de dutos e à segurança das pessoas, com base nos critérios definidos nos dispositivos normativos aplicáveis.

Com relação a dutos, deve ser garantido que os limites de tensões indesejáveis nos mesmos não sejam violados, a fim de se evitar que processos de corrosão venham a ocorrer. Em se tratando de segurança de pessoas, é primordial que os critérios de prevenção de riscos de choque elétrico estabelecidos nas normas vigentes sejam atendidos. Com base nas referidas avaliações, são definidas as eventuais medidas de mitigação, a fim de prevenir o surgimento de processos de corrosão em dutos interferidos e os possíveis riscos de choque elétrico ao público em geral e ao pessoal envolvido nos trabalhos juntos a dutos e/ou equipamentos.

3.3.1 Critérios adotados

3.3.1.1. Condição de operação normal

Conforme preconizam as normas técnicas ABNT NBR 16563-1:2016 e NACE SP0177-2014, durante a operação normal de sistemas de energia elétrica, as tensões C.A. induzidas em um duto interferido não devem exceder 15 V_{ef}.

3.3.1.2. Condição de curto-circuito

Em caso de falhas envolvendo a terra em sistemas de energia elétrica, as máximas tensões suportadas por revestimentos externos de dutos interferidos são de 3 kV, para revestimentos do tipo *Coal-Tar Enamel*; e de 5 kV, para os do tipo Polietileno Tripla Camada, de acordo com as normas técnicas ABNT NBR 16563-1:2016 e NACE SP0177-2014.

3.3.1.3. Avaliação da segurança de pessoas

O critério adotado para avaliação das máximas tensões de toque, aplicados a um indivíduo que venha a ter contato direto com dutos interferidos e/ou seus equipamentos em

pontos de afloramento dos mesmos, em caso de falha envolvendo a terra em sistemas de energia elétrica, é de 60 V, para um intervalo de tempo superior a 3 s, conforme preconiza a norma técnica ABNT NBR 16563-1:2016. Este critério é comumente adotado para a avaliação em questão, embora se trate de regime transitório, a fim de que a mesma seja considerada conservativa.

3.3.2. Dados necessários à elaboração dos estudos

Os dados usualmente necessários à modelagem dos arranjos entre as estruturas envolvidas, para a elaboração dos estudos de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, são apresentados nas seções 3.3.2.1 a 3.3.2.3.

3.3.2.1. Sistema dutoviário

Dados do(s) duto(s) envolvido(s), tais como:

- Comprimento, diâmetro, material, tipo de revestimento externo e profundidade de instalação;
- Traçado em relação ao sistema interferente indicando a progressiva do duto (km)[3] nos pontos de maior aproximação; e
- Pontos de afloramento[4] com indicação de progressiva do duto (km).

3.3.2.2. Sistema de energia elétrica

Características da(s) linha(s) de transmissão, como:

- Tensão nominal, comprimento, quantidade de torres, vão médio e distâncias das torres de maior aproximação com o duto interferido até as subestações terminais de origem e de destino;
- Silhueta da torre típica de projeto indicando espaçamento e altura dos condutores fase e cabo(s) para-raios;
- Tipos dos cabos condutores fase e cabo(s) para-raios;

[3] Progressiva do duto (km) refere-se à forma típica de indicar quilometragens em faixas de dutos em sistemas dutoviários.
[4] Pontos de afloramento são locais onde um duto terrestre possui pequenos trechos aéreos para a conexão de equipamentos, como em estações de válvulas, de redução de pressão e de bombeamento.

- Resistência de aterramento das torres e tipo de cabos contrapeso (se houver), bem como arranjo típico, distâncias de lançamento no solo e profundidade de instalação;
- Resistência das malhas de aterramento das subestações terminais de origem e de destino;
- Corrente de operação normal;
- Contribuições de corrente das subestações terminais de origem e de destino, na condição de curto-circuito monofásico nas torres de maior proximidade com o duto interferido nas regiões de aproximação; e
- Tempo para atuação do sistema de proteção.

3.3.2.3. Pontos de aproximação

Dados das regiões de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, sobretudo quanto:

- Comprimento de exposição;
- Distâncias de separação entre os sistemas;
- Ângulos de cruzamento;
- Afastamento das torres de maior proximidade com o duto interferido; e
- Resistividade elétrica do solo na(s) região(ões) de aproximação.

3.3.2.4. Definição dos arranjos físicos entre os sistemas

A partir da definição da(s) situação(ões) de aproximação entre as estruturas de sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários envolvidas, é necessário modelar o(s) arranjo(s) do(s) caso(s) de estudo(s) a ser simulado(s) computacionalmente. Na modelagem são representados linha de transmissão e duto interferido, com foco nas proximidades do(s) ponto(s) de interesse, na qual, para cada caso a ser estudado, deve ser elaborado um modelo de arranjo específico.

3.3.3. Determinação de tensões de passo e de toque

Com base na norma técnica ABNT NBR 15751:2013, que estabelece as condições de segurança para pessoas e instalações dentro e fora dos limites de subestações de energia elétrica, a norma técnica ABNT NBR 16563-1:2016 determina os critérios que devem ser

adotados e os cálculos a serem realizados em estudos de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, quanto aos níveis de tensão de passo e de toque admissíveis, conforme a seguir.

3.3.3.1. Regime de operação normal

Durante a operação normal de sistemas de energia elétrica, a máxima tensão estrutura-solo em pontos acessíveis de sistemas dutoviários (estruturas metálicas e demais equipamentos) a qualquer indivíduo não deve ser superior a 15 V_{ef}, estabelecida como tensão de segurança, de acordo com as normas técnicas ABNT NBR 16563-1:2016 e NACE SP0177-2014.

3.3.3.2. Condição de curto-circuito

Na condição de falha envolvendo a terra em sistemas de energia elétrica, as máximas tensões de passo e de toque admissíveis devem ser calculadas, de acordo com (3.52) a (3.55).

DETERMINAÇÃO DA CORRENTE DE CHOQUE DE CURTA DURAÇÃO

Considerando o valor de *t* como a duração do choque elétrico, sendo o mesmo estabelecido pelo tempo máximo de eliminação da falha em uma linha de transmissão, com base no acionamento do dispositivo de proteção do sistema de energia elétrica, a corrente máxima de não fibrilação (para 99,5 % das pessoas de 50 kg) no intervalo de tempo 0,03 s ≤ *t* ≤ 3 s é dada por:

$$I_{chcd} = \frac{0{,}116}{\sqrt{t}}. \tag{3.52}$$

Tal que I_{chcd} é a corrente máxima de não fibrilação, em A; t o tempo, em s.

CÁLCULO DA MÁXIMA TENSÃO DE PASSO

De acordo com a norma técnica ABNT NBR 15751:2013, a tensão de passo é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos da superfície do solo afastados pela distância de um passo de um indivíduo, sendo convencionada igual a 1,0 m. A Figura 15 apresenta a condição de um indivíduo submetido à tensão de passo, bem como o respectivo circuito equivalente aos parâmetros resistivos implicados.

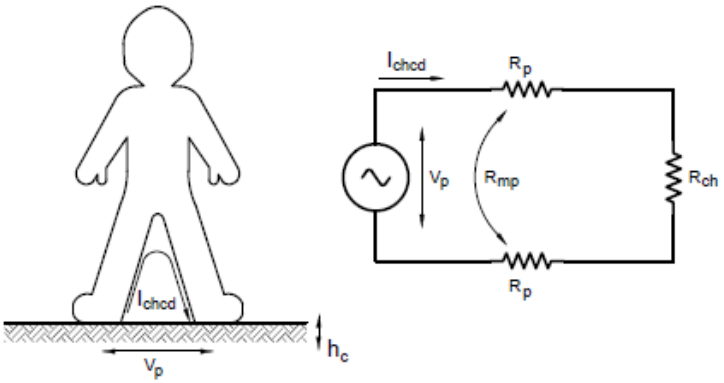

Figura 15: Conceito de tensão de passo.

Considerando a resistência mútua entre os pés R_{mp} possuir valor desprezível, a máxima tensão de passo admissível pelo corpo humano é dada por:

$$V_{p_máx} = (R_{ch} + 6 \times \rho_s \times C) I_{chcd} \, . \tag{3.53}$$

Tal que $V_{p_máx}$ é a tensão de passo máxima admissível, em V; R_{ch} a resistência do corpo humano, em Ω; C o fator de redução de tensões de passo e de toque máximas admissíveis, adimensional.

CÁLCULO DA MÁXIMA TENSÃO DE TOQUE

Conforme a norma técnica ABNT NBR 15751:2013, a tensão de toque é a diferença de potencial elétrico entre um objeto metálico energizado, sendo este aterrado ou não, e um ponto da superfície do solo distanciado horizontalmente ao que normalmente corresponde ao alcance do braço de um indivíduo, como ilustrado na Figura 16, onde a distância considerada equivale a 1,0 m.

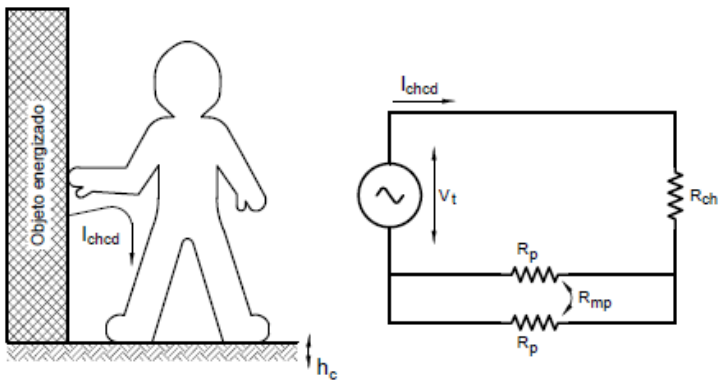

Figura 16: Conceito de tensão de toque.

Desprezando a resistência mútua entre os pés R_{mp}, como em (3.53), a máxima tensão de toque admissível pelo corpo humano é obtida através de:

$$V_{t_máx} = (R_{ch} + 1{,}5 \times \rho_s \times C) I_{chcd} \,. \tag{3.54}$$

Tal que $V_{t_máx}$ é a tensão de toque máxima admissível, em V.

FATOR DE REDUÇÃO

O fator de redução consiste em considerar uma camada de recobrimento do solo, a fim de reduzir as tensões C.A. perigosas e, por conseguinte, os riscos de choque elétrico, conforme preconiza a norma técnica ABNT NBR 15751:2013. O fator de redução é dado por (3.55) e a Tabela 3 apresenta os tipos de materiais mais comuns utilizados para recobrimento do solo e suas respectivas resistividades.

$$C \cong 1 - a_{rh} \times \left[\frac{1 - \frac{\rho_s}{\rho_c}}{2 \times h_c + a_{rh}} \right]. \tag{3.55}$$

Tal que a_{rh} é o raio do modelo hemisfério para o pé humano (0,106 m); ρ_c a resistividade da camada de cobertura, em Ω.m; h_c a espessura da camada de cobertura, em m.

Tabela 3: Resistividade do material de recobrimento (ρ_c).

Material	Resistividade (Ω.m)	
	Seco	Molhado
Brita nº 1, 2 ou 3	-	$3x10^3$
Concreto	$1{,}2x10^3$ a $2{,}8x10^5$	21 a 100
Asfalto	$2{,}6x10^6$ a $30x10^6$	10^4 a $6x10^6$

3.3.4. Programas computacionais comerciais

Com vistas ao que preconiza a norma técnica ABNT NBR 16563-1, de que a avaliação dos níveis de influência de sistemas de energia em sistemas dutoviários deve ser realizada por simulação computacional, contudo, sem apresentar detalhes de como proceder, espera-se que, além de pesquisas conduzidas na área, esteja disponível um número razoável e acessível de programas computacionais comerciais específicos e amigáveis ao usuário, com a

finalidade de estimar os níveis de influência em questão. No entanto, este número é extremamente limitado e os custos de licenciamento e renovação anual dos programas comerciais disponíveis são bem elevados, conforme apresentado a seguir. Outro ponto é que, devido aos aspectos comerciais, não há interesse por parte das empresas desenvolvedoras em divulgar, de forma clara, o conteúdo dos métodos que empregam em seus programas, tornando-os verdadeiras "caixas-pretas". O que motivou simular computacionalmente as influências em um duto terrestre aplicando os modelos analíticos apresentados nas seções 3.1 e 3.2 em algoritmos elaborados em software livre, a fim de evitar eventuais restrições ao uso dos métodos gerais adotados no presente trabalho.

3.3.4.1. SESTLC Pro

O pacote de software SESTLC Pro (*Transmission and Distribution Line Calculator*), desenvolvido pela empresa *Safe Engineering Services & technologies ltd* – SESTECH –, se fundamenta em aproximações da Teoria de Circuitos, sendo os parâmetros de linhas de transmissão calculados através de um algoritmo aprimorado, baseado nos trabalhos de Gary, Déri e AbuelMa'atti. É uma ferramenta de análise simplificada para estimar rapidamente parâmetros elétricos de linhas de transmissão, campos elétricos e magnéticos produzidos pelas mesmas, bem como as influências causadas em sistemas dutoviários, em solo uniforme. O valor da licença monousuário do pacote de software SESTLC Pro informado pelo desenvolvedor é de US$12.000,00, e sua renovação anual gira em torno de 12% do valor da licença.

3.3.4.2. Right of Way Pro (ROW)

O pacote de software *Right-of-Way* Pro (ROW), também desenvolvido pela empresa SESTECH, da mesma forma baseia-se em aproximações da Teoria de Circuitos; entretanto, é composto por módulos integrados que consideram elementos de circuitos como Elementos Concentrados, que permitem modelar arranjos complexos de aproximação entre estruturas envolvidas e considerar modelos de solo multicamadas, para a análise de influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, bem como definir medidas de mitigação necessárias à redução de seus efeitos nocivos sobre dutos interferidos. O valor da licença monousuário do pacote de software *Right-of-Way* Pro, conforme informado pelo desenvolvedor, é de US$48.000,00, e, tal como o SESTLC Pro, sua renovação anual tem o custo de 12% do valor da licença.

3.3.4.3. CDEGS

Sendo mais um pacote de software da SESTECH, o CDEGS (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*) é composto por módulos que possibilitam a análise de problemas envolvendo distribuições de correntes elétricas, campos eletromagnéticos, sistemas de aterramento elétrico e modelos de estruturas complexas de solo. Estende-se, ainda, à compatibilidade eletromagnética, a descargas atmosféricas, a transitórios elétricos, a surtos elétricos, às influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, incluindo estudos de mitigação de influência AC/DC e diversos aspectos de sistemas de proteção catódica, tanto para sistemas simples quanto multicomponentes. De acordo com a SESTECH, o valor da licença monousuário do referido pacote de software custa US$84.000,00, e, seguindo o que é praticado para os demais pacotes da empresa, o valor da renovação anual equivale a 12% do custo de sua licença.

MÓDULO HIFREQ

O módulo HIFREQ (*Low & High Frequency Electromagnetic Fields Analysis*) foi desenvolvido com base na Teoria de Campo, solucionando diretamente as equações de Maxwell, e, segundo o desenvolvedor, é capaz de lidar com problemas eletromagnéticos complexos envolvendo redes de condutores aéreos e enterrados arbitrariamente orientados, energizados por qualquer número de fontes de corrente e de tensão, cabos SC (‘*single-core*’ - possuem condutor, isolação blindagem e em alguns casos armadura) ou PT (‘*pipe-type*’ - envolvidos por tubulação), transformadores, resistências concentradas, indutores, capacitores etc, calculando campos elétricos e magnéticos no ar e no solo. Considera o espaço tridimensional, assim como potenciais e distribuições de corrente no solo e em condutores, para faixa de 0 a milhares de mega-hertz, levando em conta os efeitos de influência indutiva, condutiva e capacitiva simultaneamente entre todos os componentes da rede analisada.

3.3.4.4. Elsyca IRIS

A plataforma de simulação gráfica Elsyca IRIS (*Inductive and Resistive Interference Simulation*), desenvolvida pela empresa Elsyca, permite estimar os níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, utilizando um modelo de linha de transmissão para determinar os campos eletromagnéticos gerados, com base nas equações de Maxwell. Uma abordagem do método dos Elementos de Contorno é utilizada para estimar os níveis de influência condutiva, para a condição de falha envolvendo a terra no sistema de

energia elétrica interferente. Conforme informado pela empresa desenvolvedora, a versão monousuário da plataforma de simulação gráfica Elsyca IRIS tem o custo anual de €25.000,00.

3.3.4.5. Programas computacionais para uso próprio

Existem ainda algumas empresas, porém, não muitas, que atuam na análise de influências de sistemas de energia em sistemas dutoviários utilizando programas computacionais desenvolvidos especificamente para aplicação em suas próprias atividades de estudo. Contudo, conforme mencionado, trata-se de programas computacionais para uso próprio e não se encontram disponíveis comercialmente.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme descrito no capítulo 1, o objetivo geral do presente trabalho é apresentar os métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva gerados por sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, considerando nos cálculos linhas de transmissão áreas e dutos terrestres, durante a operação normal e na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão.

Posterior ao levantamento bibliográfico relacionado à avaliação das influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, este capítulo apresenta um estudo de caso contemplando situações típicas de aproximação entre ambos os sistemas. São considerados uma linha de transmissão aérea de 138 kV e um duto terrestre com diâmetro externo de 20”, e, entre as referidas instalações, uma situação de paralelismo de, aproximadamente, 2 km de extensão e outra de cruzamento. Situações típicas em cenários de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários adotadas no estudo de caso, a fim de se estimar e avaliar os níveis de influência gerados pela linha de transmissão interferente no duto interferido, através dos resultados obtidos com programas computacionais elaborados no presente trabalho e com os fornecidos pelos métodos empregados em programas computacionais comerciais. Os resultados são comparados levando em conta nas simulações parte do traçado do duto, de 4 km, nas respectivas regiões dos casos de aproximação com a linha de transmissão, bem como toda a extensão do mesmo, em um modelo de solo homogêneo com valores de resistividade elétrica de 100 e 1.000 Ω.m, com o objetivo de verificar eventuais diferenças.

Ressalta-se que, para uma boa avaliação dos possíveis níveis de influência gerados, é necessário ter uma visão geral dos casos de aproximação a serem estudados e seus respectivos arranjos. Em geral, considera-se como caso de aproximação um cruzamento entre o sistema interferido e o sistema interferente ou um trecho de paralelismo com uma distância mínima de afastamento menor ou igual a 200 m entre ambos os sistemas, conforme a norma técnica ABNT NBR 16563:2016-1. Na prática, com relação ao paralelismo entre linhas de transmissão e dutos, é comum ser considerado um caso de aproximação a cada trecho de 2 km de extensão.

Desta forma, o presente trabalho aborda dois casos de aproximação ao longo do traçado do duto em relação à linha de transmissão, como ilustrado na Figura 17 e indicado na

Tabela 4, na seção 4.2.1 a seguir. Para ilustrar melhor as regiões de aproximação entre os sistemas, nas respectivas seções de cada caso a ser estudado são apresentados croquis exibindo com detalhes a região de aproximação em questão, sendo possível identificar as estruturas adotadas como torres de estudo (torre sob falha), que são aquelas mais próximas do duto interferido.

Com os arranjos entre os sistemas definidos, são apresentadas as características das estruturas envolvidas nos casos de aproximação estudados. Em seguida, são estimadas as influências indutiva e condutiva da linha de transmissão aérea sobre o duto interferido, durante a operação normal e na condição de curto-circuito monofásico na mesma, respectivamente. Durante a operação normal, obtém-se os níveis de tensão C.A. induzida no duto interferido. Na condição de curto-circuito monofásico na linha de transmissão, são obtidos os níveis de GPR do revestimento do duto, bem como os perfis de tensão de passo sobre a faixa do mesmo nos pontos de aproximação com a linha de transmissão.

4.2. SITUAÇÕES DE APROXIMAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS

Os casos referentes a situações típicas de aproximação entre linhas de transmissão aéreas e dutos terrestres considerados no presente trabalho, nos quais consistem em uma região de paralelismo e uma região de cruzamento entre ambas as instalações, são indicados na Figura 17, com as respectivas quilometragens ao longo da linha de transmissão.

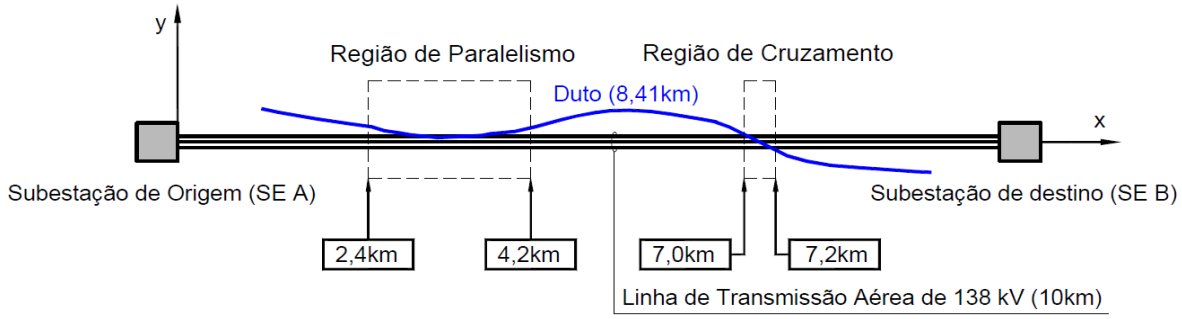

Figura 17: Arranjo físico das regiões de aproximação entre os sistemas elaborado para o estudo de caso.

4.2.1. Casos de aproximação estudados

A Tabela 4 apresenta as situações típicas de aproximação entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, as progressivas do duto interferido referentes aos pontos de maior proximidade com a linha de transmissão, as torres do vão de aproximação e as torres sob condição de curto-circuito monofásico, considerados no estudo de caso.

Tabela 4: Casos de aproximação estudados.

Caso	Tipo	Progressiva do duto (km)	Torres da LT	Torre em falta
01	Paralelismo	2+237	T13 a T-22	T-17
02	Cruzamento	4+151	T36 a T-37	T-37

Nota: A forma apresentada de progressiva do duto (km) no presente trabalho considera o formato utilizado para faixas de dutos em sistemas dutoviários, onde, por exemplo, 2+237 significa 2,237 km.

4.3. DADOS CONSIDERADOS NO ESTUDO DE CASO

4.3.1. Sistema interferido

O duto terrestre interferido considerado no estudo de caso possui 20” de diâmetro externo e comprimento total de 8,41 km, sendo seu material aço carbono e revestimento externo de Polietileno Tripla Camada com espessura de 3 mm. As Tabelas 5 e 6 apresentam as características físicas do duto interferido e os pontos onde o mesmo aflora ao longo de seu traçado, respectivamente.

Tabela 5: Características físicas do duto terrestre.

Características	Dados
Comprimento total	8.41 km
Diâmetro externo	20”
Permeabilidade magnética relativa do aço	300 p.u.
Resistividade relativa do aço[5]	10 p.u.
Profundidade de instalação	1 m
Tipo de revestimento externo	Polietileno Tripla Camada
Espessura do revestimento externo	3 mm
Resistência elétrica do revestimento externo	10^8 Ω.m

Tabela 6: Pontos de afloramento do duto terrestre.

Afloramento	Progressiva do duto (km)
Início	0+000
Fim	8+410

[5] Em relação ao valor de referência padrão do cobre recozido ($1{,}724 \times 10^{-8}$ Ω.m).

4.3.2. Sistema interferente

A linha de transmissão aérea de 138 kV considerada no estudo de caso, que conecta a subestação terminal de origem (SE A) à subestação terminal de destino (SE B), conforme ilustrado na Figura 17, possui comprimento total de 10 km, com 1 (um) condutor para cada fase do tipo ACSR Linnet e 1 (um) cabo para-raios de aço 3/8" EHS. As Tabelas 7 e 8 apresentam, respectivamente, as características da linha de transmissão aérea e os dados dos condutores fase e cabo para-raios da mesma. Na sequência, são apresentados nas Figuras 18 e 19 a silhueta da torre típica de projeto considerada no estudo de caso e o sistema de aterramento típico das torres com 4 (quatro) cabos contrapeso de aço 3/8" EHS lançados 30 m no sentido longitudinal da linha de transmissão, espaçados de 20 m e enterrados numa profundidade de 0,5 m.

Tabela 7: Características da linha de transmissão aérea.

Características	Dados
Comprimento total	10 km
Quantidade de torres	50
Tensão nominal	138 kV
Corrente de operação	500 A
Vão médio	200 m
Tipo de torre	Conforme Figura 18
Cabo condutor fase	ACSR Linnet - 336.4 MCM
Cabo para-raios	Aço 3/8" EHS
Sistema de aterramento das torres	Conforme Figura 19
Resistência de aterramento das torres[6]	2,1834 / 21,834 Ω
Contribuições de corrente das SEs terminais	4 kA < 0º
Resistência de aterramento das SEs terminais	1 Ω

Tabela 8: Dados dos condutores fase e cabo para-raios da linha de transmissão aérea.

Condutor	Raio		Resistência (Ω/km DC)	Coordenadas	
	Interno (cm)	Externo (cm)		Horizontal (m)	Vertical (m)
Fase A	0,33655	0,9144	0,173549	-2,9	28,72
Fase B	0,33655	0,9144	0,173549	2,9	26,86
Fase C	0,33655	0,9144	0,173549	-2,9	25
Cabo para-raios	0,1524	0,4572	4,18804	0	31,61

[6] Valores obtidos por meio dos programas computacionais comerciais de referência, respectivamente, para as resistividades do solo de 100 e 1000 Ω.m.

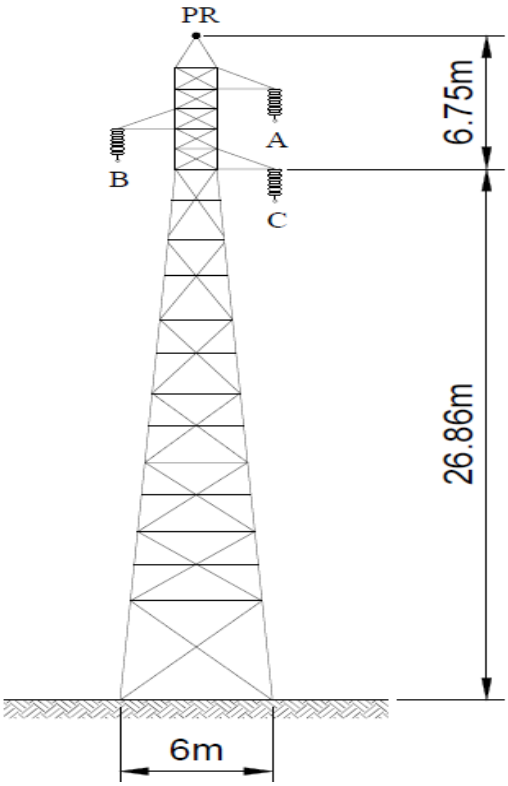

Figura 18: Silhueta da torre típica de projeto.

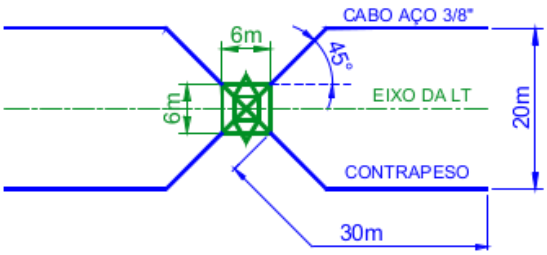

Figura 19: Sistema de aterramento típico das torres.

4.4. SIMULAÇÃO DOS CASOS

4.4.1. Metodologia adotada

As simulações computacionais para estimar e avaliar os níveis de influência gerados por uma linha de transmissão aérea em um duto terrestre consideraram a operação normal e a condição de curto-circuito monofásico da mesma. Os casos foram simulados através de programas computacionais elaborados em linguagem Python (versão 2.7), implementando métodos gerais para se estimar os níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, assim como com os programas computacionais comerciais da empresa SESTECH, apresentados nas seções 3.3.4.1 a 3.3.4.3.

As coordenadas do traçado do duto interferido em relação à linha de transmissão,

bem como dos limites das superfícies de potencial para o cálculo de tensão de passo, foram carregadas a partir de arquivos referentes às situações de proximidade entre as instalações estudadas.

As correntes elétricas utilizadas nas simulações com os algoritmos elaborados, na condição de curto-circuito monofásico na linha de transmissão aérea, foram fornecidas pelos programas computacionais comerciais da empresa SESTECH e pelo programa ATP[7], com objetivo de comparar os resultados obtidos para os níveis de influência estimados, adotando as correntes fornecidas por ambas as ferramentas, sendo as mesmas carregadas por meio de arquivos relacionados aos casos de aproximação e valores de resistividade do solo considerados.

Para a simulação no ATP, utilizou-se a interface gráfica ATPDraw, que fornece um ambiente amigável e os elementos necessários à modelagem de sistemas elétricos, além de gerar os arquivos que são processados pelo ATP. A linha de transmissão foi simulada como tipo *Overhead Line*, através do modelo π de linhas de transmissão com parâmetros distribuídos e constantes do elemento LCC (*Line Constant, Cable Constants and Cables Constants*). O cabo para-raios e os aterramentos das torres foram modelados como elementos RL e R, respectivamente. Os diagramas do ATPDraw referentes às simulações considerando curtos-circuitos monofásicos nas torres 17 e 37 da linha de transmissão aérea são apresentados, respectivamente, nos Apêndices B.1 e B.2 deste trabalho.

4.4.2. Caso 01 - Paralelismo

A Figura 20 ilustra o croqui do arranjo físico da situação de aproximação entre a linha de transmissão e o duto interferido para o caso estudado. A simulação computacional para a operação normal da linha de transmissão foi realizada considerando a corrente de operação indicada na Tabela 7 apresentada na seção 4.3.2; e na condição de curto-circuito na linha de transmissão, considerando as contribuições de corrente das subestações terminais, na ocorrência de curto-circuito monofásico na torre 17, de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 21 e os valores apresentados na Tabela 9. Foi considerado o sistema de aterramento superficial por elementos distribuídos para as torres da linha de transmissão (cabos contrapeso). Cabe ressaltar que, embora apenas as torres 13 a 22 estejam indicadas no croqui do caso estudado, foram consideradas nas simulações todas as torres da linha de transmissão.

[7] ATP (*Alternative Transients Program*) é uma versão do *Electromagnetic Transients Program* – EMTP –, desenvolvida por Hermann W. Dommel, na década de 1960, para modelagem de sistemas elétricos e simulação de seus respectivos transitórios eletromagnéticos.

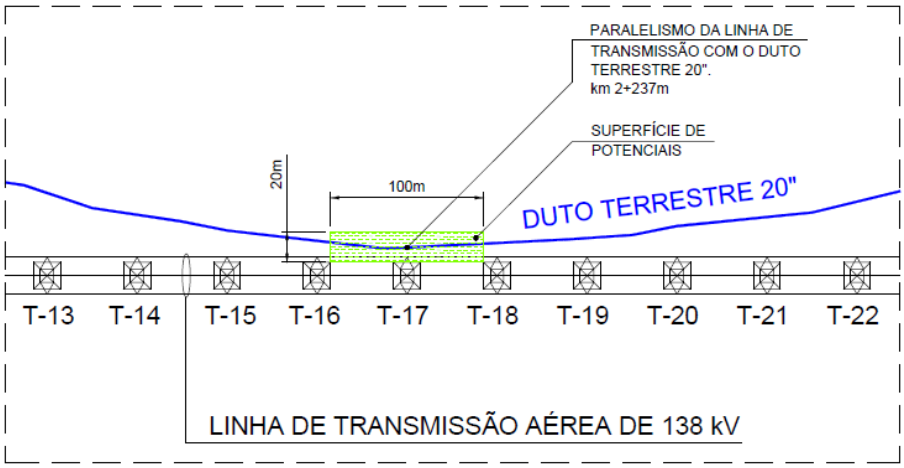

Figura 20: Croqui do arranjo físico da região de paralelismo.

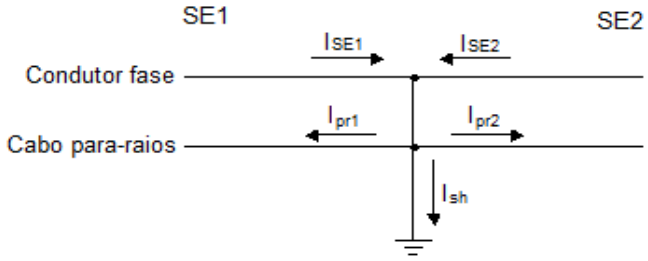

Figura 21: Diagrama de correntes de curto-circuito.

Tabela 9: Correntes de curto-circuito monofásico na T-17.

ρ (Ω.m)	Contribuições de corrente		SESTECH			ATP		
	I_{SE1} (kA)	I_{SE2} (kA)	I_{pr1} (kA)	I_{pr2} (kA)	I_{sh} (kA)	I_{pr1} (kA)	I_{pr2} (kA)	I_{sh} (kA)
100	4,0	4,0	2,808	2,808	2,407	2,776	2,776	2,516
1000	4,0	4,0	3,625	3,595	0,788	3,617	3,579	0,826

Nota: A Tabela 9 apresenta os módulos das correntes indicadas na Figura 21.

4.4.3. Caso 02 - Cruzamento

A Figura 22 ilustra o croqui do arranjo físico da situação de aproximação entre a linha de transmissão e o duto interferido para o caso estudado. A simulação computacional para a operação normal da linha de transmissão foi realizada considerando a corrente de operação indicada na Tabela 7 apresentada na seção 4.3.2; e na condição de curto-circuito na linha de transmissão, considerando as contribuições de corrente das subestações terminais, na ocorrência de curto-circuito monofásico na torre 37, de acordo com o diagrama ilustrado na Figura 23 e os valores apresentados na Tabela 10. Foi considerado o sistema de aterramento superficial por elementos distribuídos para as torres da linha de transmissão (cabos

contrapeso). Cabe ressaltar que, embora apenas as torres 36 e 37 estejam indicadas no croqui do caso estudado, foram consideradas nas simulações todas as torres da linha de transmissão.

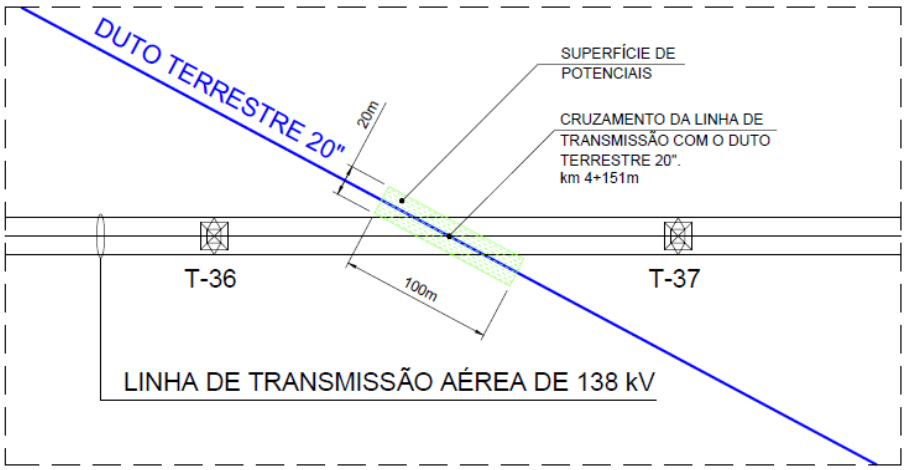

Figura 22: Croqui do arranjo físico do caso de cruzamento.

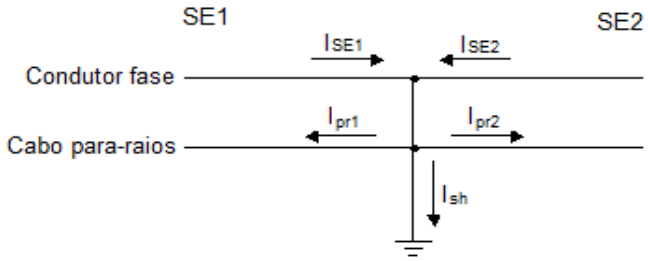

Figura 23: Diagrama de correntes de curto-circuito.

Tabela 10: Correntes de curto-circuito monofásico na T-37.

ρ (Ω.m)	Contribuições de corrente		SESTECH			ATP		
	I_{SE1} (kA)	I_{SE2} (kA)	I_{pr1} (kA)	I_{pr2} (kA)	I_{sh} (kA)	I_{pr1} (kA)	I_{pr2} (kA)	I_{sh} (kA)
100	4,0	4,0	2,808	2,808	2,407	2,776	2,776	2,516
1000	4,0	4,0	3,585	3,638	0,785	3,566	3,633	0,824

Nota: A Tabela 10 apresenta os módulos das correntes indicadas na Figura 23.

5. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES E ANÁLISE

Nas seções a seguir deste capítulo, são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso apresentado no capítulo 4, através dos programas computacionais elaborados no presente trabalho e dos métodos empregados em programas computacionais comerciais, nos quais foram avaliados os níveis de influências indutiva e condutiva no duto interferido, durante a operação normal da linha de transmissão e na condição de curto-circuito monofásico nas torres de estudo adotadas, respectivamente. A avaliação considera, ainda, os níveis de tensão de passo sobre a faixa do duto nos pontos de aproximação com a linha de transmissão.

5.1. RESULTADOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES

5.1.1. Influência indutiva

As simulações computacionais foram realizadas considerando parte do traçado do duto interferido, de 4 km, nas regiões dos casos de aproximação com a linha de transmissão interferente abordados, bem como levando em conta toda a extensão do mesmo, a fim de comparar os níveis de influência indutiva estimados para apenas um trecho de duto e para todo seu traçado. Também são comparados os resultados obtidos através das fórmulas para o cálculo de impedância mútua entre os condutores da linha de transmissão aérea e os subsegmentos do duto terrestre, aplicadas nos programas computacionais elaborados no presente trabalho, com os valores fornecidos por métodos empregados em programas computacionais comerciais, ambos indicados na Tabela 11. Os níveis estimados de tensão C.A. induzida no duto interferido, devido à influência indutiva gerada durante a operação normal da linha de transmissão, são apresentados nas seções 5.1.1.1 e 5.1.1.2 a seguir.

Tabela 11: Métodos x programas computacionais comerciais / fórmulas consideradas.

Método	Programa Computacional Comercial / Fórmula
Teoria de Circuitos[8]	SESTLC Pro
Teoria de Circuitos / Elementos Concentrados[9]	Right-of-Way Pro (ROW)
Teoria de Campo[10]	CDEGS (Módulo HIFREQ)
Carson-Clem	Equação (3.14)

[8] Os parâmetros de linhas de transmissão são calculados através de algoritmo aprimorado, baseado nos trabalhos de Gary, Déri e AbuelMa'atti.
[9] Diferencia-se do SESTLC Pro, por permitir modelos complexos de aproximação entre as estruturas envolvidas e de solos multicamadas.
[10] Resolve diretamente as equações de Maxwell, sem aproximações.

Método	Programa Computacional Comercial / Fórmula
Lucca	Equação (3.27)
Ametani	Equação (3.46)

5.1.1.1. Influência indutiva para resistividade do solo de 100 Ω.m

Para o valor de resistividade do solo de 100 Ω.m, os níveis estimados de tensão C.A. induzida no duto interferido, durante a operação normal da linha de transmissão, considerando apenas um trecho de 4 km do mesmo nas proximidades dos Casos 01 e 02 estudados, bem como a comparação quando sua extensão total é levada em conta na simulação computacional, são apresentados nas figuras 24, 25 e 26, respectivamente.

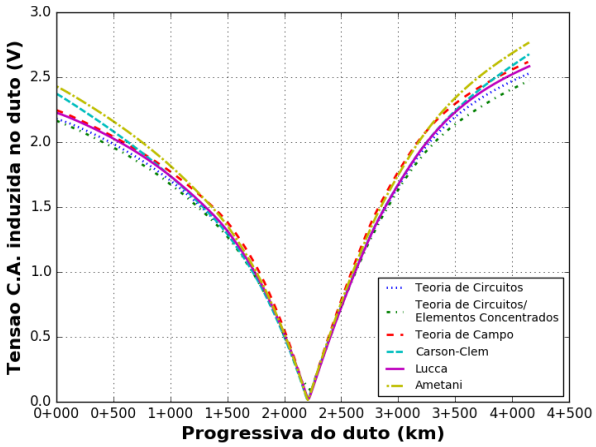

Figura 24: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.m$).

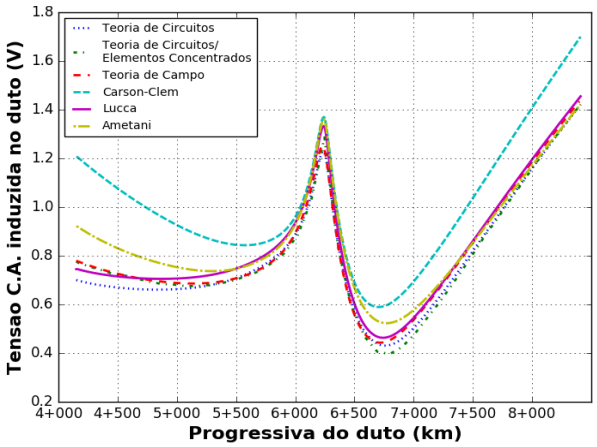

Figura 25: Caso 02 - Cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.m$).

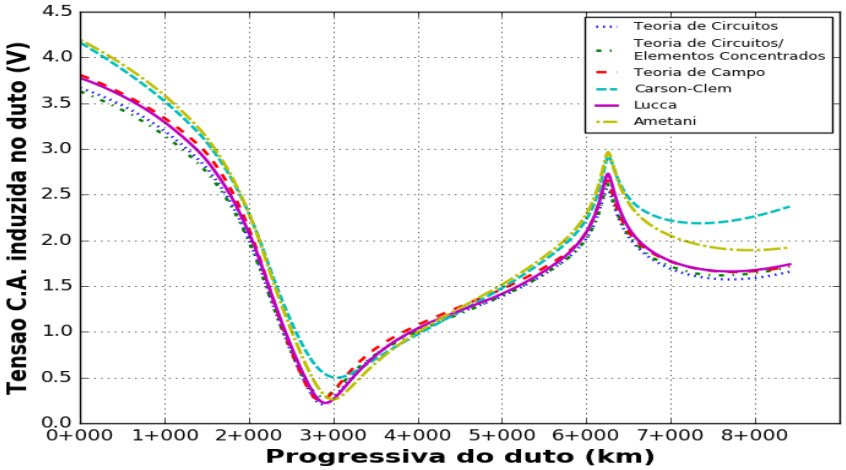

Figura 26: Considerando a extensão total do duto ($\rho = 100\ \Omega.m$).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para os níveis de tensão C.A. induzida no duto interferido demonstram as diferenças de se considerar apenas um trecho do duto interferido, nas proximidades das regiões de aproximação com a linha de transmissão, e quando se leva em conta todo o traçado do mesmo, obtendo-se desvios entre os valores dos níveis máximos de tensão C.A. induzida de até 52,03%, conforme indicado na Tabela 12.

Tabela 12: Máximas tensões C.A. induzidas no duto interferido ($\rho = 100\ \Omega.m$).

Método	Caso 01 (V)	Ext. total (V)	Desvio (%)	Caso 02 (V)	Ext. total (V)	Desvio (%)
Teoria de Circuitos	2,5296	3,6656	30,99	1,4215	2,5663	44,61
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	2,4753	3,6297	31,80	1,4217	2,6321	45,99
Teoria de Campo	2,6178	3,8088	31,27	1,4344	2,6559	45,99
Carson-Clem	2,6772	4,1588	35,63	1,6998	2,9197	41,78
Lucca	2,5843	3,7723	31,49	1,4549	2,7285	46,88
Ametani	2,7681	4,1896	33,93	1,4225	2,9655	52,03

Em relação aos desvios obtidos com as referidas fórmulas aproximadas para o cálculo das impedâncias mútuas entre os condutores da linha de transmissão aérea e o duto terrestre, para a resistividade do solo de 100 Ω.m, verifica-se que os resultados apresentados para a operação normal da linha de transmissão indicam que a aproximação de Lucca apresenta valores mais próximos dos fornecidos pelos métodos empregados em programas computacionais comerciais, com desvio médio relativo de, no máximo, 5,02%, conforme indicado nas Tabelas 13, 14 e 15. Em contrapartida, excetuando-se as médias dos desvios apresentados na Tabela 13, a aproximação de Carson-Clem apresenta os maiores desvios para os níveis de tensão C.A. induzida no duto interferido. Como era de se esperar devido às variações de distância dos condutores da linha de transmissão aérea para o duto, pois os valores de impedância mútua aumentam com o incremento do afastamento entre os mesmos, conforme apresentado no capítulo 3.

Tabela 13: Desvios Caso 01 - $\rho = 100\ \Omega.m$.

Método	Carson-Clem (%)	Lucca (%)	Ametani (%)
Teoria de Circuitos	2,71	2,17	6,32
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	4,96	4,21	8,91
Teoria de Campo	4,43	3,87	3,44
Média (%)	4,03	3,42	6,22

Tabela 14: Desvios Caso 02 - $\rho = 100\ \Omega.m$.

Método	Carson-Clem (%)	Lucca (%)	Ametani (%)
Teoria de Circuitos	30,26	5,73	10,84
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	29,96	6,26	10,78
Teoria de Campo	25,88	3,07	7,78
Média (%)	28,70	5,02	9,80

Tabela 15: Desvios extensão total - $\rho = 100\ \Omega.m$.

Método	Carson-Clem (%)	Lucca (%)	Ametani (%)
Teoria de Circuitos	22,36	3,81	15,72
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	19,19	4,39	14,73
Teoria de Campo	17,74	3,39	12,61
Média (%)	19,76	3,86	14,35

5.1.1.2. Influência indutiva para resistividade do solo de 1000 Ω.m

Considerando o valor de resistividade do solo de 1000 Ω.m, os níveis estimados de tensão C.A. induzida no duto interferido, durante a operação normal da linha de transmissão, para apenas um trecho de 4 km do mesmo nas proximidades dos Casos 01 e 02 estudados, bem como a comparação quando toda a sua extensão é utilizada na simulação computacional, são apresentados nas figuras 27, 28 e 29, respectivamente.

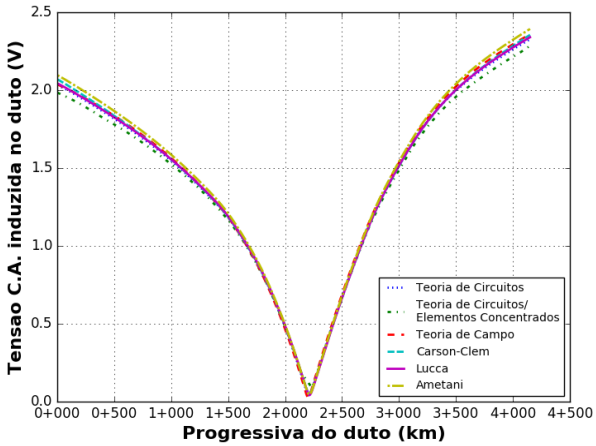

Figura 27: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.m$).

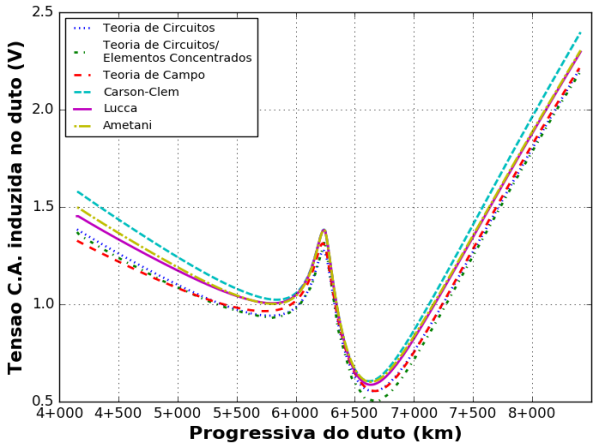

Figura 28: Caso 02 - Cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.m$).

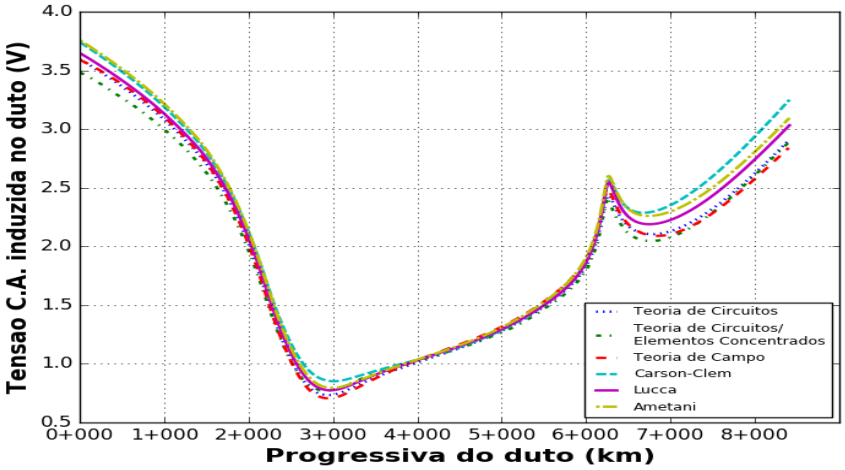

Figura 29: Considerando a extensão total do duto ($\rho = 1000\ \Omega.m$).

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para os níveis de tensão C.A. induzida no duto interferido demonstram as diferenças de se considerar apenas um trecho do duto interferido, nas proximidades das regiões de aproximação com a linha de transmissão, e quando se leva em conta todo o traçado do mesmo, obtendo-se desvios entre os valores dos níveis máximos de tensão C.A. induzida de até 36,98%, como indicado na Tabela 16.

Tabela 16: Máximas tensões C.A. induzidas no duto interferido ($\rho = 1000\ \Omega.m$).

Método	Caso 01 (V)	Ext. total (V)	Desvio (%)	Caso 02 (V)	Ext. total (V)	Desvio (%)
Teoria de Circuitos	2,3269	3,5933	35,24	2,2165	2,9111	23,86
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	2,2848	3,4831	34,40	2,1969	2,8948	24,11
Teoria de Campo	2,3548	3,5903	34,41	2,2134	2,8397	22,06
Carson-Clem	2,3552	3,7373	36,98	2,3981	3,2501	26,21
Lucca	2,340	3,6440	35,79	2,2972	3,0327	24,25
Ametani	2,3932	3,7535	36,24	2,3046	3,0947	25,53

Para a resistividade do solo de 1000 Ω.m, os desvios obtidos com as referidas fórmulas aproximadas para o cálculo das impedâncias mútuas entre os condutores da linha de transmissão aérea e o duto terrestre também indicam que, para a operação normal da linha de transmissão, a aproximação de Lucca apresenta valores mais próximos dos fornecidos pelos métodos empregados em programas computacionais comerciais, com desvio médio relativo de, no máximo, 6,94%, conforme indicado nas Tabelas 17, 18 e 19. Por outro lado, conforme as referidas tabelas, a aproximação de Carson-Clem apresenta, em geral, os maiores desvios para os níveis de tensão C.A. induzida no duto interferido. Como também esperado devido às variações de distância dos condutores da linha de transmissão aérea para o duto, pois os

valores de impedância mútua aumentam com o incremento do afastamento entre os mesmos, conforme apresentado no capítulo 3.

Tabela 17: Desvios Caso 01 - $\rho = 1000\ \Omega.m$.

Método	Carson-Clem (%)	Lucca (%)	Ametani (%)
Teoria de Circuitos	1,27	1,17	2,44
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	2,91	3,0	4,60
Teoria de Campo	2,59	2,61	2,95
Média (%)	2,26	2,26	3,33

Tabela 18: Desvios Caso 02 - $\rho = 1000\ \Omega.m$.

Método	Carson-Clem (%)	Lucca (%)	Ametani (%)
Teoria de Circuitos	10,84	6,21	7,29
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	13,35	8,61	9,74
Teoria de Campo	10,66	6,0	7,10
Média (%)	11,62	6,94	8,04

Tabela 19: Desvios extensão total - $\rho = 1000\ \Omega.m$.

Método	Carson-Clem (%)	Lucca (%)	Ametani (%)
Teoria de Circuitos	6,21	2,82	5,12
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	7,17	3,97	6,18
Teoria de Campo	6,92	3,39	5,08
Média (%)	6,77	3,39	5,46

5.1.2. Influência condutiva

Diferentemente da operação normal da linha de transmissão, na qual as correntes que circulam nos condutores fase causando a influência indutiva são as mesmas ao longo de toda a linha de transmissão, na condição de curto-circuito monofásico, para estimar os níveis de influência condutiva através da expressão (3.51), se faz necessário determinar as parcelas de corrente que fluem para o solo por meio dos aterramentos das torres (I_{sh_torre}), de acordo com os respectivos curtos-circuitos envolvendo a terra na linha de transmissão.

Para tanto, foram adotadas no presente estudo de caso as torres T-17 e T-37 para as situações de paralelismo (Caso 01) e de cruzamento (Caso 02), respectivamente, como indicado no capítulo 4, e o programa computacional elaborado neste trabalho para estimar os níveis de influência condutiva utilizou os valores das referidas parcelas de corrente fornecidos

pelos programas computacionais comerciais de referência (I_{sh_SES}) e pelo programa ATP (I_{sh_ATP}), conforme as seções 5.1.2.1 a 5.1.2.8 a seguir.

5.1.2.1. Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.m$)

Para o valor de resistividade do solo de 100 Ω.m e parcelas de corrente injetadas no mesmo obtidas através dos programas computacionais comerciais de referência (I_{sh_SES}) e do programa ATP (I_{sh_ATP}), os níveis estimados de GPR do revestimento do duto, na condição de curto-circuito monofásico na torre T-17, considerando apenas um trecho de 4 km do duto nas proximidades do Caso 01 estudado, bem como a comparação quando sua extensão total (8,41 km) é levada em conta na simulação computacional, são apresentados nas figuras 30, 31, 32 e 33, respectivamente.

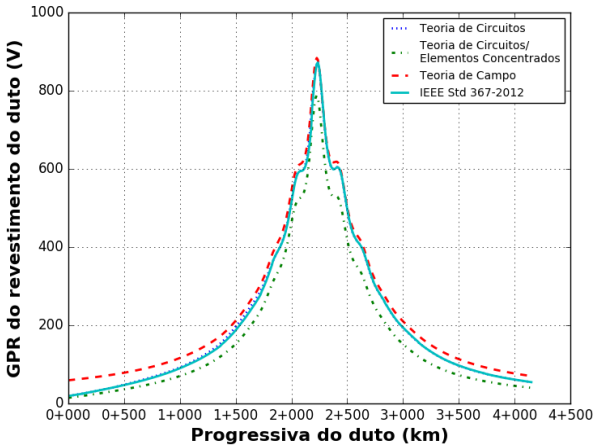

Figura 30: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

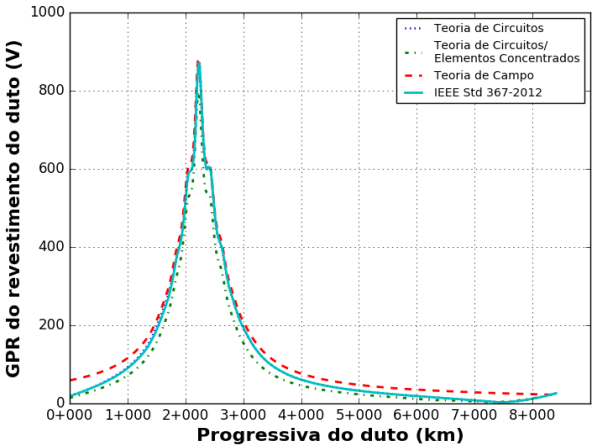

Figura 31: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

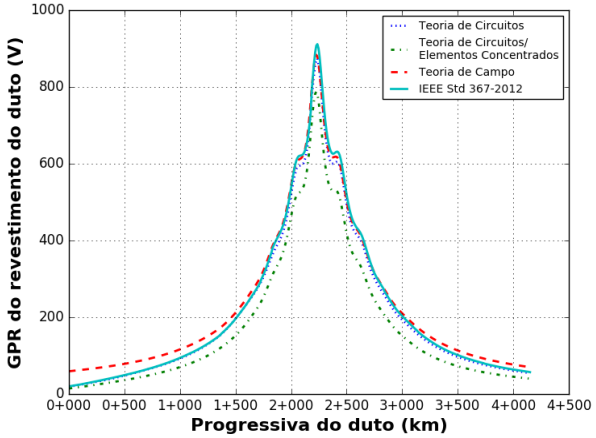

Figura 32: Caso 01 - Paralelismo ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

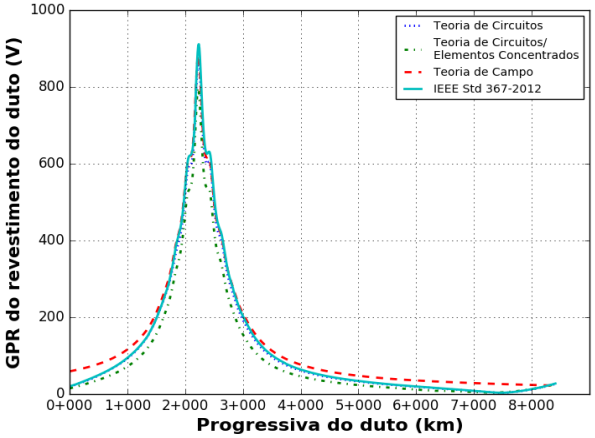

Figura 33: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

Para a condição de curto-circuito monofásico apresentada, os resultados estimados para os níveis de influência condutiva indicam diferenças pouco significativas no que diz respeito à comparação, quando ora um trecho do duto é considerado na respectiva região de aproximação com o sistema interferente e quando todo o seu traçado é levado em conta, dissemelhante aos resultados obtidos para a influência indutiva, nos quais o desvio mais significativo entre os valores máximos apresentados é de 1,35%, conforme indicado na Tabela 20. Com vistas aos desvios obtidos através do programa computacional elaborado, em relação aos valores fornecidos pelos métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência, obteve-se o menor desvio médio relativo percentual quando comparados ao método da Teoria de Circuitos, sendo neste caso de 0,8%, de acordo com a Tabela 21, no qual indica similaridade entre as abordagens consideradas.

Tabela 20: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido.

Método		Caso 01 (kV)	Ext. total (kV)	Desvio (%)
Teoria de Circuitos		0,8695	0,8695	0,0
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.		0,7855	0,7962	1,35
Teoria de Campo		0,8824	0,8821	0,03
IEEE Std 367-2012	(I_{sh_SES})	0,8695	0,8695	0,0
	(I_{sh_ATP})	0,9088	0,9088	0,0

Tabela 21: Desvios Caso 01 / extensão total - $\rho = 100\ \Omega.m$.

Método	IEEE Std 367-2012			
	Caso 01		Ext. total	
	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)
Teoria de Circuitos	1,25	3,49	0,80	4,06
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	25,94	31,64	32,06	37,17
Teoria de Campo	18,21	15,18	33,38	30,80

5.1.2.2. Caso 02 - cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.m$)

Para o valor de resistividade do solo de 100 Ω.m e parcelas de corrente injetadas no mesmo obtidas através dos programas computacionais comerciais de referência (I_{sh_SES}) e do programa ATP (I_{sh_ATP}), os níveis estimados de GPR do revestimento do duto, na condição de curto-circuito monofásico na torre T-37, considerando apenas um trecho de 4 km do duto nas proximidades do Caso 02 estudado, bem como a comparação quando sua extensão total (8,41 km) é levada em conta na simulação computacional, são apresentados nas figuras 34, 35, 36 e 37, respectivamente.

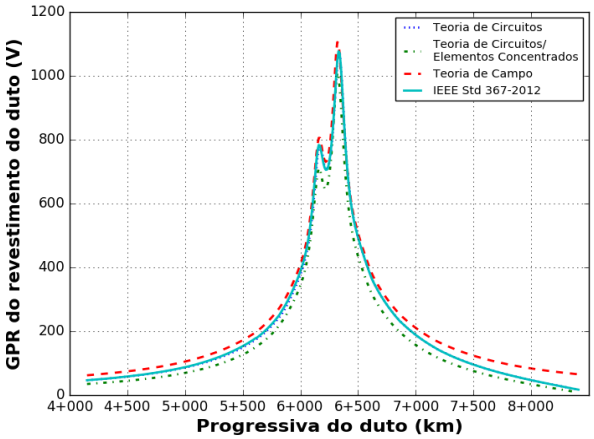

Figura 34: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

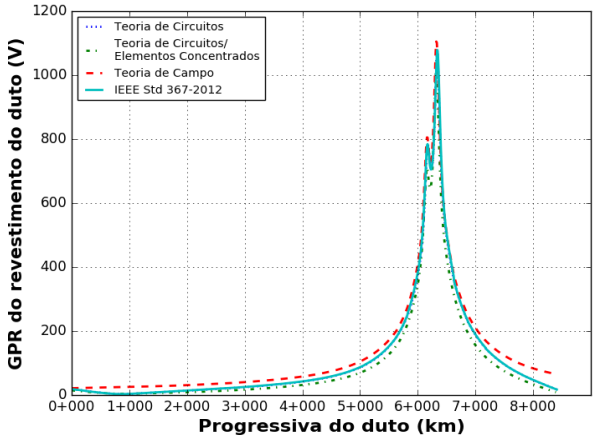

Figura 35: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

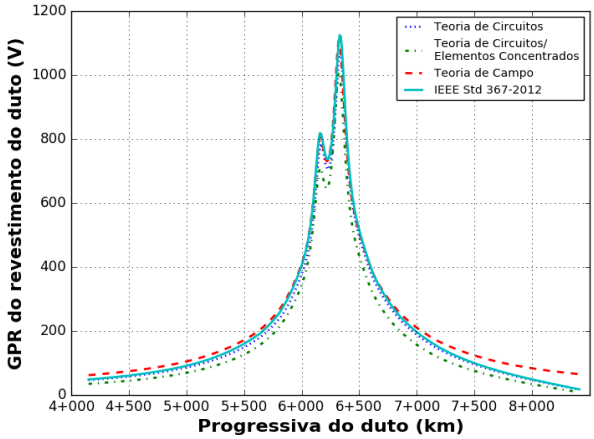

Figura 36: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

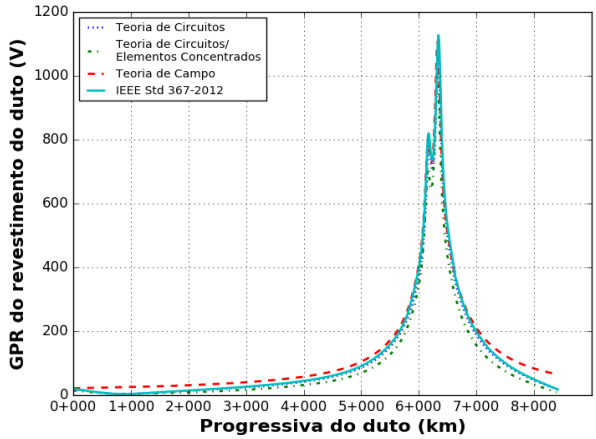

Figura 37: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 100\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

Os resultados estimados para os níveis de influência condutiva para o caso estudado também indicam pequenas diferenças, quando os que foram obtidos para um trecho do duto na respectiva região de aproximação com a linha de transmissão são conferidos com os que se obtém para todo o seu traçado, sendo o maior desvio entre os valores máximos apresentados de 0,34%, conforme indicado na Tabela 22. Quanto à comparação dos resultados obtidos através do programa computacional elaborado com os valores fornecidos pelos métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência, obteve-se o menor desvio médio relativo percentual em relação ao método da Teoria de Circuitos, neste caso, de 1,03%, de acordo com a Tabela 23, indicando similaridade entre as abordagens consideradas.

Tabela 22: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido.

Método		Caso 02 (kV)	Ext. total (kV)	Desvio (%)
Teoria de Circuitos		1,0761	1,0733	0,26
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.		1,0101	1,0066	0,34
Teoria de Campo		1,1054	1,1033	0,19
IEEE Std 367-2012	(I_{sh_SES})	1,0766	1,0781	0,13
	(I_{sh_ATP})	1,1253	1,1268	0,13

Tabela 23: Desvios Caso 02 / extensão total - $\rho = 100\ \Omega.m$.

Método	IEEE Std 367-2012			
	Caso 02		Ext. total	
	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)
Teoria de Circuitos	1,03	5,36	1,70	5,88
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	25,33	31,0	31,85	37,32
Teoria de Campo	18,98	15,72	34,95	32,32

5.1.2.3. Caso 01 - paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.m$)

Para o valor de resistividade do solo de 1000 Ω.m e parcelas de corrente injetadas no mesmo obtidas através dos programas computacionais comerciais de referência (I_{sh_SES}) e do programa ATP (I_{sh_ATP}), os níveis estimados de GPR do revestimento do duto, na condição de curto-circuito monofásico na torre T-17, considerando apenas um trecho de 4 km do duto nas proximidades do Caso 01 estudado, bem como a comparação quando sua extensão total (8,41 km) é levada em conta na simulação computacional, são apresentados nas figuras 38, 39, 40 e 41, respectivamente.

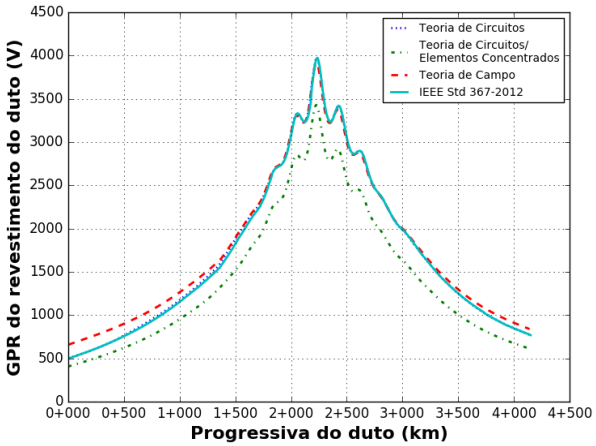

Figura 38: Caso 01 - paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

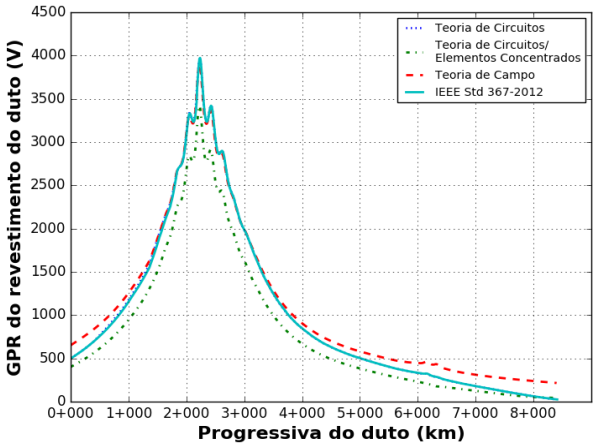

Figura 39: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

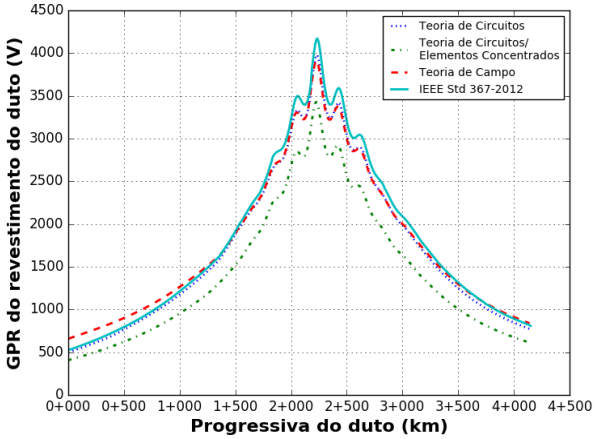

Figura 40: Caso 01 - paralelismo ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

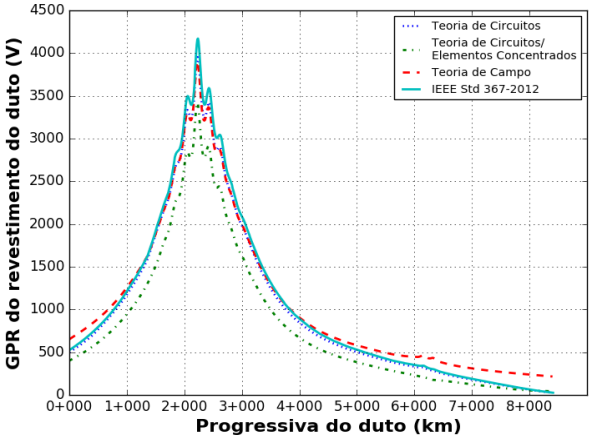

Figura 41: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

De forma similar às seções 5.1.2.1 e 5.1.2.2, os níveis de influência condutiva para a condição de curto-circuito monofásico em questão mostram diferenças mínimas no que diz respeito à questão de se considerar parte do duto ou sua extensão, conforme a Tabela 24, que apresenta o valor de 0,27% como maior desvio entre os valores máximos apresentados.

Na sequência, a Tabela 25 apresenta os desvios dos resultados do programa computacional elaborado, em relação aos valores fornecidos pelos métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência, dos quais o menor desvio médio relativo percentual é da ordem de 0,51%, quando se compara com o método da Teoria de Circuitos, demonstrando semelhança de suas abordagens.

Tabela 24: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido.

Método		Caso 01 (kV)	Ext. total (kV)	Desvio (%)
Teoria de Circuitos		3,9657	3,9657	0,0
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.		3,4228	3,4134	0,27
Teoria de Campo		3,9084	3,8990	0,24
IEEE Std 367-2012	(I_{sh_SES})	3,9653	3,9653	0,0
	(I_{sh_ATP})	4,1628	4,1628	0,0

Tabela 25: Desvios Caso 01 / extensão total - $\rho = 1000\ \Omega.m$.

Método	IEEE Std 367-2012			
	Caso 01		Ext. total	
	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)
Teoria de Circuitos	0,77	4,44	0,51	4,92
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	20,80	26,97	29,17	35,59
Teoria de Campo	6,29	5,43	20,84	18,86

5.1.2.4. Caso 02 - cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.m$)

Para o valor de resistividade do solo de 1000 Ω.m e parcelas de corrente injetadas no mesmo obtidas através dos programas computacionais comerciais de referência (I_{sh_SES}) e do programa ATP (I_{sh_ATP}), os níveis estimados de GPR do revestimento do duto, na condição de curto-circuito monofásico na torre T-37, considerando apenas um trecho de 4 km do duto nas proximidades do Caso 02 estudado, bem como a comparação quando sua extensão total (8,41 km) é levada em conta na simulação computacional, são apresentados nas figuras 42, 43, 44 e 45, respectivamente.

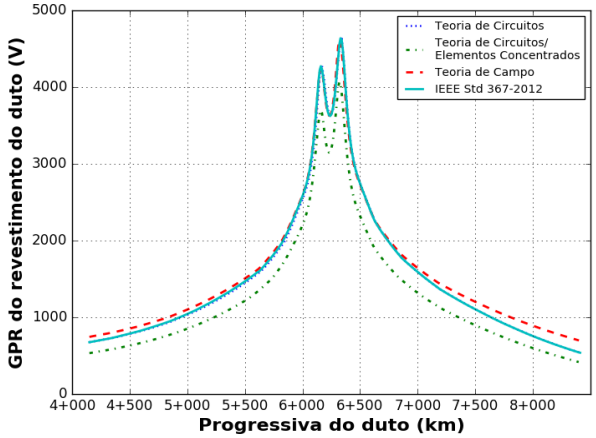

Figura 42: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

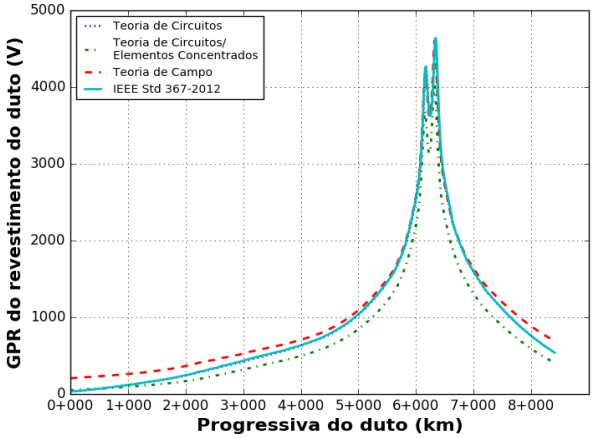

Figura 43: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_SES}).

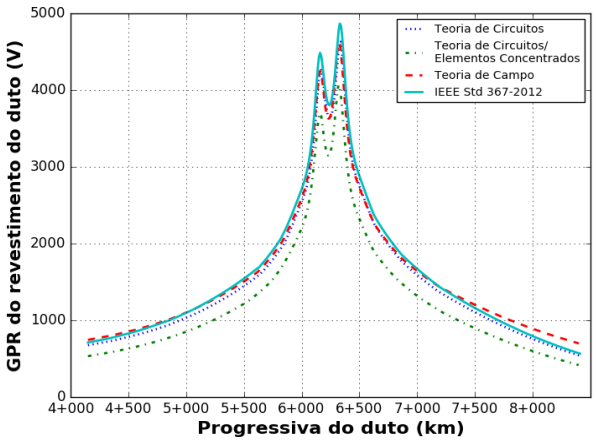

Figura 44: Caso 02 - cruzamento ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

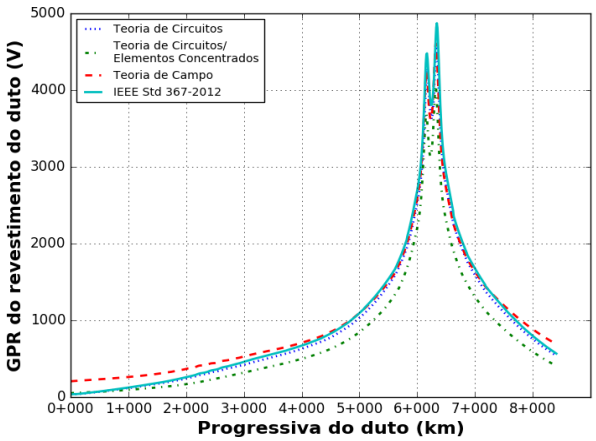

Figura 45: Considerando toda a extensão do duto ($\rho = 1000\ \Omega.m$ e I_{sh_ATP}).

Para o caso estudado, o desvio mais significativo quanto aos valores máximos dos níveis de influência condutiva é de 0,47%, para a comparação entre os resultados obtidos para parte do duto interferido e o traçado completo do mesmo, de acordo com a Tabela 26. Contrapondo os resultados apresentados pelo programa computacional elaborado com os dos

métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência, de acordo com a Tabela 27, o menor desvio médio relativo percentual é de 0,65%, em relação ao método da Teoria de Circuitos, o que mostra que ambas as abordagens possuem similaridade.

Tabela 26: Máximos potenciais do solo em relação ao duto interferido.

Método		Caso 02 (kV)	Ext. total (kV)	Desvio (%)
Teoria de Circuitos		4,6293	4,6218	0,16
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.		4,0698	4,0509	0,47
Teoria de Campo		4,6182	4,6048	0,29
IEEE Std 367-2012	(I_{sh_SES})	4,6368	4,6398	0,07
	(I_{sh_ATP})	4,8667	4,8698	0,07

Tabela 27: Desvios Caso 02 / extensão total - $\boldsymbol{\rho = 1000\ \Omega.m}$.

Método	IEEE Std 367-2012			
	Caso 02		Ext. total	
	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)	I_{sh_SES} (%)	I_{sh_ATP} (%)
Teoria de Circuitos	0,65	5,60	1,18	6,29
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	21,83	28,03	27,48	33,57
Teoria de Campo	6,17	4,43	21,18	18,72

5.1.2.5. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 01, $\boldsymbol{\rho = 100\ \Omega.m}$)

Para o Caso 01 simulado com o valor de resistividade do solo de 100 Ω.m, os níveis estimados de tensão de passo sobre a faixa do duto obtidos através do método da Teoria de Campo empregado no programa computacional comercial HIFREQ (no qual permite a modelagem de superfícies de potenciais do solo), bem como por meio do programa computacional elaborado no presente trabalho (tanto utilizando as correntes injetadas no solo fornecidas pelos programas computacionais comerciais de referência I_{sh_SES} quanto pelo programa ATP I_{sh_ATP}), são apresentados nas Figuras 46, 47 e 48, respectivamente.

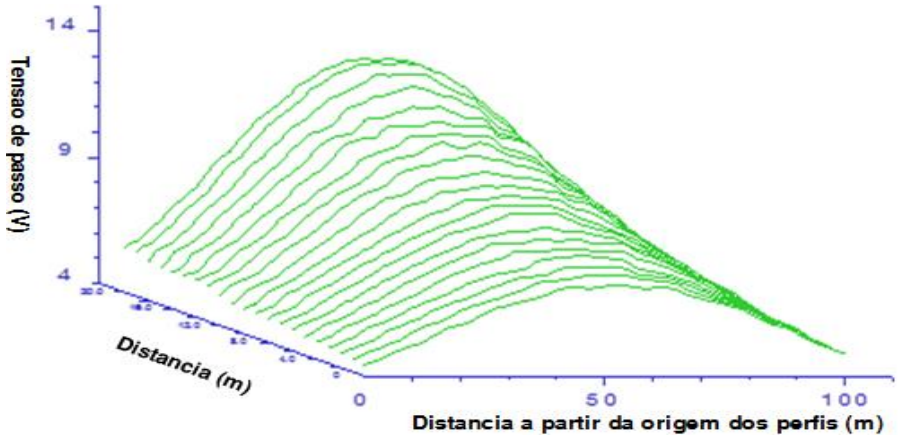

Figura 46: Caso 01 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-17).

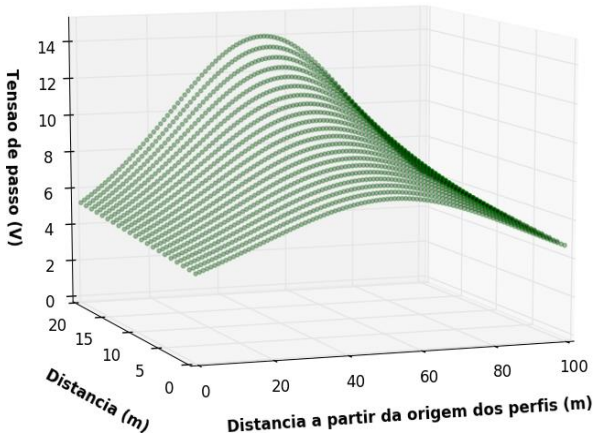

Figura 47: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-17).

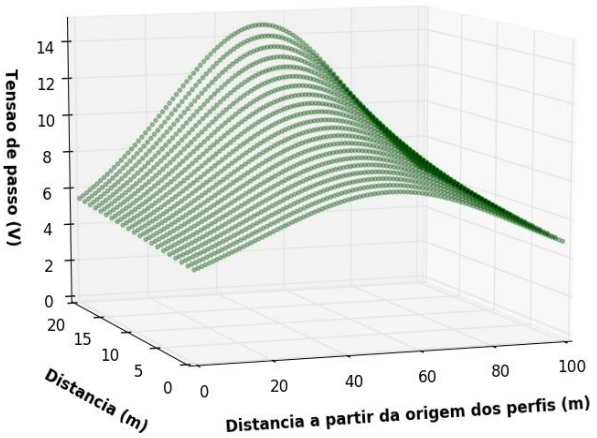

Figura 48: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-17).

Os perfis de tensão de passo sobre a faixa do duto obtidos nas superfícies de potenciais geradas a partir do programa computacional elaborado, apresentados nas Figuras 47 e 48, indicam boa similaridade com os perfis fornecidos pelo método empregado no programa computacional comercial de referência, apresentados na Figura 46, com desvios de até 9,94%, conforme indicado na Tabela 28.

Tabela 28: Máximas tensões de passo ($\rho = 100\ \Omega.m$).

Método	Caso 01 (V)	Desvio (%)
Teoria de Campo	13,2742	-
IEEE Std 367-2012 I_{sh_SES}	13,9629	5,19
IEEE Std 367-2012 I_{sh_ATP}	14,5938	9,94

5.1.2.6. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 02, $\rho = 100\ \Omega.m$)

Os níveis estimados de tensão de passo sobre a faixa do duto obtidos para o Caso 02, simulado com o valor de resistividade do solo de 100 Ω.m através do método da Teoria de Campo empregado no programa computacional comercial HIFREQ e por meio do programa computacional elaborado no presente trabalho (utilizando as correntes injetadas no solo oriundas dos programas computacionais comerciais de referência I_{sh_SES} e do programa ATP I_{sh_ATP}), são apresentados nas Figuras 49, 50 e 51, respectivamente.

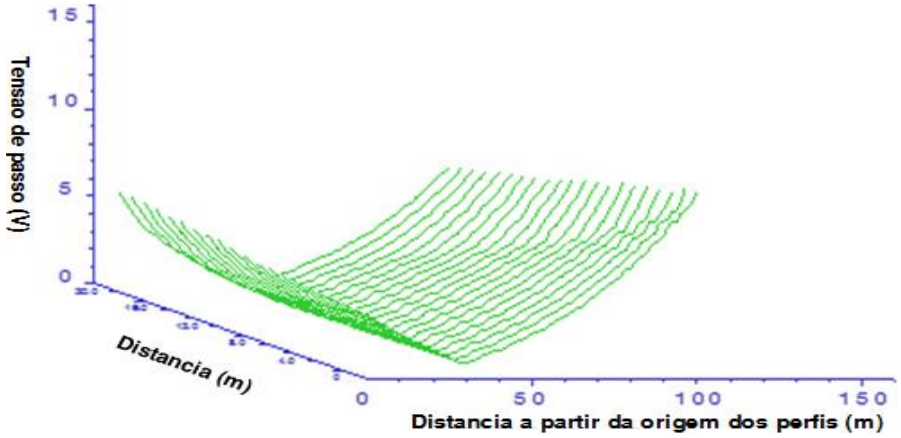

Figura 49: Caso 02 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-37).

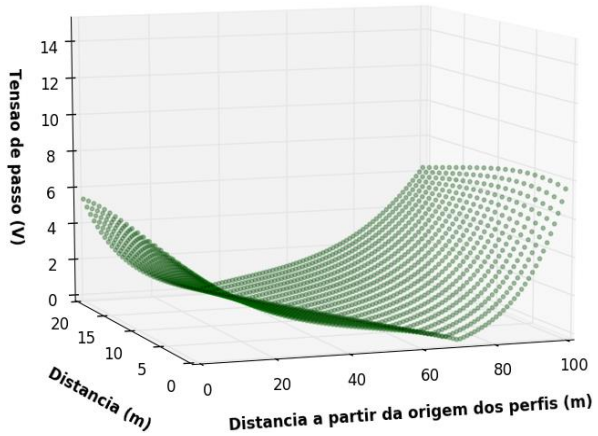

Figura 50: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-37).

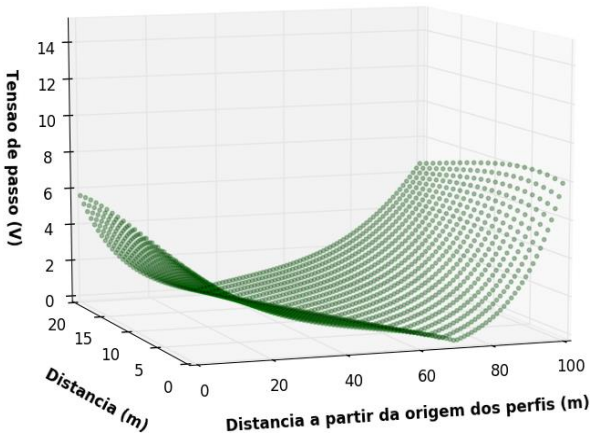

Figura 51: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-37).

Os perfis de tensão de passo sobre a faixa do duto obtidos nas superfícies de potenciais geradas a partir do programa computacional elaborado, apresentados nas Figuras 50 e 51, indicam semelhança com os perfis fornecidos pelo método empregado no programa computacional comercial de referência, apresentados na Figura 49, porém, com desvios de até 27,33%, conforme indicado na Tabela 29. Possivelmente, os desvios obtidos das máximas tensões de passo sobre a faixa do duto se deram devido ao programa computacional comercial de referência em questão utilizar algum modelo aperfeiçoado de distribuição e injeção de correntes no solo, mediante ao arranjo do sistema de aterramento das torres, no qual o sentido de lançamento dos cabos contrapeso deve exercer maior influência nos resultados, como é o caso de cruzamento entre sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários, situação esta em que os cabos contrapeso das torres encontram-se direcionados para um duto interferido.

Tabela 29: Máximas tensões de passo ($\boldsymbol{\rho = 100\ \Omega.m}$).

Método	Caso 02 (V)	Desvio (%)
Teoria de Campo	10,7125	-
IEEE Std 367-2012 I_{sh_SES}	7,7852	27,33
IEEE Std 367-2012 I_{sh_ATP}	8,1369	24,04

5.1.2.7. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 01, $\boldsymbol{\rho = 1000\ \Omega.m}$)

Considerando para o Caso 01 o valor de 1000 Ω.m para a resistividade do solo, os resultados obtidos dos níveis estimados de tensão de passo sobre a faixa do duto com o método empregado no programa computacional comercial HIFREQ, Teoria de Campo, e do programa computacional elaborado no presente trabalho, dispondo das correntes injetadas no solo conforme indicado nas seções anteriores, são apresentados nas Figuras 52, 53 e 54, respectivamente.

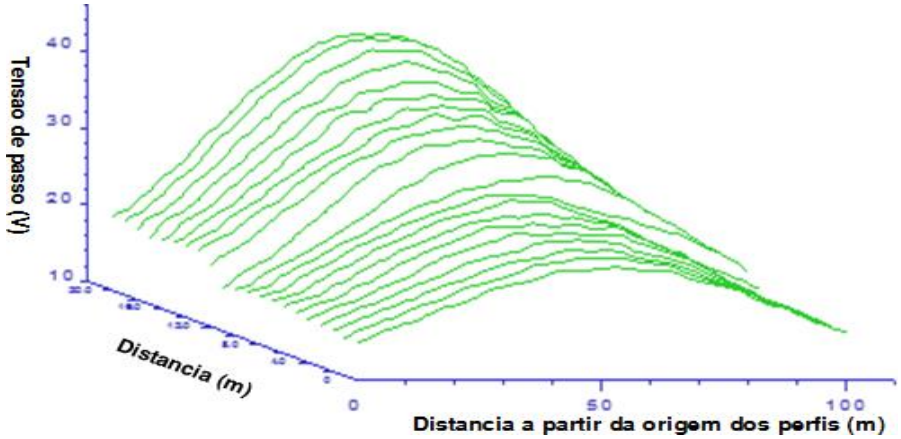

Figura 52: Caso 01 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-17).

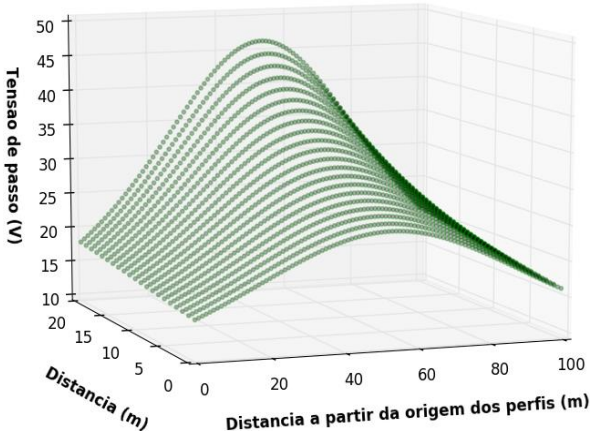

Figura 53: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-17).

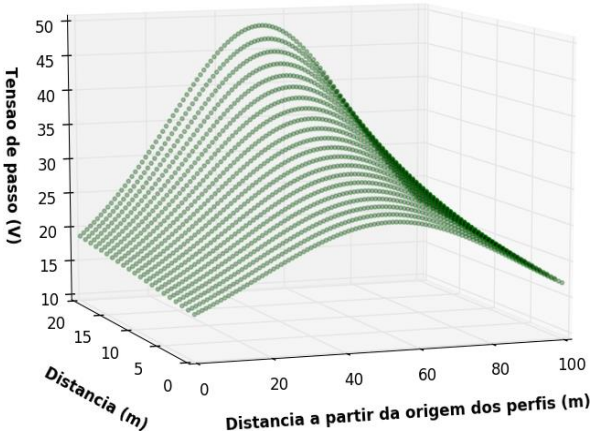

Figura 54: Caso 01 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-17).

As Figuras 53 e 54 indicam que os perfis de tensão de passo sobre a faixa do duto produzidos nas superfícies de potenciais, através do programa computacional elaborado, apresentam boa aproximação com os perfis gerados pelo método empregado no programa computacional comercial de referência, apresentados na Figura 52, com desvios de até 11,9%, conforme indicado na Tabela 30.

Tabela 30: Máximas tensões de passo ($\rho = 1000\ \Omega.m$).

Método	Caso 01 (V)	Desvio (%)
Teoria de Campo	43,3610	-
IEEE Std 367-2012 I_{sh_SES}	46,2525	6,67
IEEE Std 367-2012 I_{sh_ATP}	48,5213	11,90

5.1.2.8. Tensão de passo sobre a faixa do duto (Caso 02, $\rho = 1000\ \Omega.m$)

Os resultados obtidos para os níveis estimados de tensão de passo sobre a faixa do duto para o Caso 02, adotando a resistividade do solo de 1000 Ω.m, através do método da Teoria de Campo aplicado no programa computacional comercial HIFREQ e do programa computacional elaborado neste trabalho (fazendo uso das correntes injetadas no solo do mesmo modo que nas seções anteriores), são apresentados nas Figuras 55, 56 e 57, respectivamente.

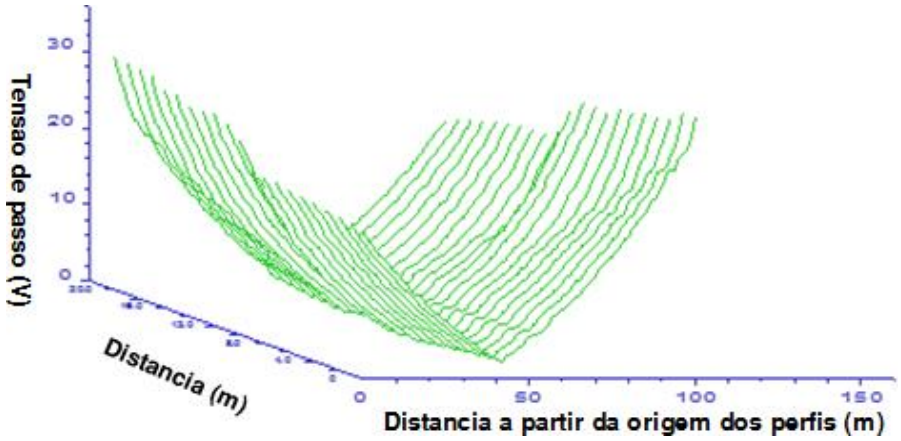

Figura 55: Caso 02 (Teoria de Campo, HIFREQ, para curto-circuito na T-37).

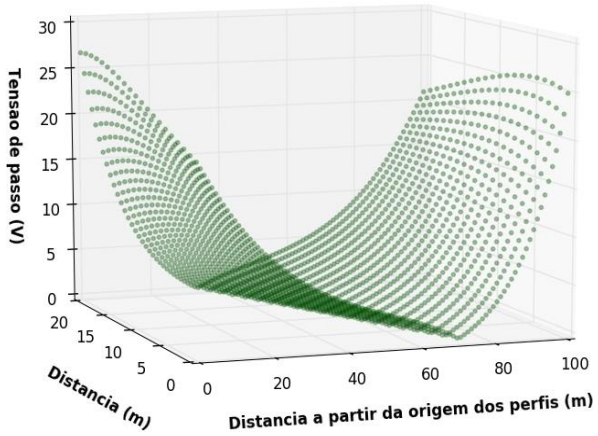

Figura 56: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_SES} para curto-circuito na T-37).

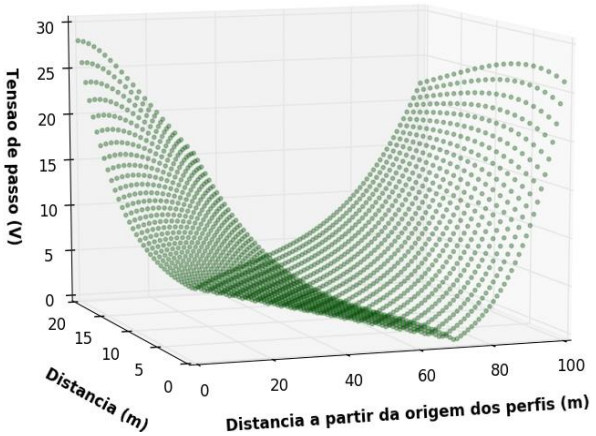

Figura 57: Caso 02 (IEEE Std 367-2012 / I_{sh_ATP} para curto-circuito na T-37).

Os perfis gerados de tensão de passo sobre a faixa do duto, exibidos nas Figuras 56 e 57, apresentam conformidade com os perfis produzidos pelo método do programa computacional comercial de referência em questão, apresentados na Figura 55. No entanto, os desvios obtidos foram da ordem de até 21,64%, de acordo com a Tabela 31. Isso possivelmente se deve pelo fato de o programa computacional comercial de referência utilizar algum modelo aprimorado para a distribuição e injeção de correntes no solo, conforme

mencionado na seção 5.1.2.6.

Tabela 31: Máximas tensões de passo ($\rho = 1000\ \Omega.m$).

Método	Caso 02 (V)	Desvio (%)
Teoria de Campo	34,1775	-
IEEE Std 367-2012 I_{sh_SES}	26,7823	21,64
IEEE Std 367-2012 I_{sh_ATP}	28,1051	17,77

5.1.3. Avaliação de riscos de tensões de passo e de toque

Em estudos relacionados às influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, a avaliação de riscos de tensões de passo e de toque visa estabelecer as respectivas tensões máximas admissíveis (NBR 16563-1:2016) sobre a faixa de um duto interferido, na região de maior proximidade com o sistema interferente, e nos pontos de afloramento do mesmo. Nestes locais existem, respectivamente, a possibilidade de pessoas estarem em contato com o solo local, bem como tocarem diretamente o duto aflorado e/ou seus equipamentos, na ocorrência de uma falha envolvendo a terra em uma linha de transmissão. Dessa forma, através da referida avaliação, verifica-se a eventual necessidade de adoção de medida mitigadora, em função dos resultados nas simulações computacionais, a fim de reduzir tensões de passo e de toque perigosas. De modo a ilustrar a aplicaçao das expressões em questão apresentadas no capítulo 3, são apresentadas a seguir as máximas tensões de passo e toque admissíveis calculadas.

5.1.3.1. Máximas tensões de passo e toque admissíveis

Na condição de curto-circuito monofásico, os cálculos foram realizados levando em conta o religamento da linha de transmissão 500 ms após a falha, na qual obtém-se o respectivo valor de I_{chcd} de 164 mA, conforme a equação (3.52). Neste caso, considerando as expressões (3.53), (3.54) e (3.55) para as condições de solo natural e os valores conservativos de resistividade dos materiais típicos de camada de recobrimento do solo apresentados na seção 3.3.3.2, com 5 cm de espessura, as máximas tensões de passo sobre a faixa do duto interferido e de toque no mesmo são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 32 e 33.

Tabela 32: Máximas tensões de passo admissíveis.

ρ (Ω.m)	Máximas tensões de passo admissíveis (kV)			
	Solo natural	Camada de recobrimento		
		Brita	Concreto	Asfalto
100	0,2625	1,6481	0,2247	4,9928
1000	1,1483	2,104	0,6806	5,4486

Tabela 33: Máximas tensões de toque admissíveis.

ρ (Ω.m)	Máximas tensões de toque admissíveis (kV)			
	Solo natural	Camada de recobrimento		
		Brita	Concreto	Asfalto
100	0,1887	0,5351	0,1792	1,3712
1000	0,4101	0,649	0,2932	1,4852

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

De acordo com os resultados obtidos, em se tratando da influência indutiva, as diferenças entre considerar apenas um trecho do duto interferido e todo o traçado do mesmo em uma avaliação são muito significativas, obtendo-se desvios dos valores dos níveis máximos de até 52,03%, conforme a Tabela 34. Desta forma, um duto interferido possivelmente estaria sujeito ao surgimento de processos de corrosão, devido à realização de estudo considerando apenas parte de seu traçado na região de aproximação com uma linha de transmissão, caso os resultados indiquem níveis de tensão C.A. induzida abaixo, porém, próximos do limite de 15 V_{ef} referenciado na seção 3.3.3.1 e medidas de mitigação não sejam especificadas. Por outro lado, tal situação não ocorreria para a influência condutiva, em razão do maior desvio dos valores máximos ser de 1,35%, conforme a Tabela 35.

Tabela 34: Desvios parte do traçado x extensão total do duto – influência indutiva.

Método	$\rho = 100\ \Omega.m$		$\rho = 1000\ \Omega.m$	
	Caso 01 x Ext. total (%)	Caso 02 x Ext. total (%)	Caso 01 x Ext. total (%)	Caso 02 x Ext. total (%)
Teoria de Circuitos	30,99	44,61	35,24	23,86
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.	31,80	45,99	34,40	24,11
Teoria de Campo	31,27	45,99	34,41	22,06
Carson-Clem	35,63	41,78	36,98	26,21
Lucca	31,49	46,68	35,79	24,25
Ametani	33,93	52,03	36,24	25,53

Tabela 35: Desvios parte do traçado x extensão total do duto – influência condutiva.

Método		$\rho = 100\ \Omega.m$		$\rho = 1000\ \Omega.m$	
		Caso 01 x Ext. total (%)	**Caso 02 x Ext. total (%)**	**Caso 01 x Ext. total (%)**	**Caso 02 x Ext. total (%)**
Teoria de Circuitos		0,0	0,26	0,0	0,16
Teoria de Circuitos / Elem. Conc.		1,35	0,34	0,27	0,47
Teoria de Campo		0,03	0,19	0,24	0,29
IEEE Std 367-2012	(I_{sh_SES})	0,0	0,13	0,0	0,07
	(I_{sh_ATP})	0,0	0,13	0,0	0,07

Dentre as aproximações das fórmulas de Carson e Pollaczek aplicadas no cálculo das impedâncias mútuas entre os condutores da linha de transmissão aérea e o duto terrestre, a fim de se estimar os níveis de influência indutiva, a aproximação de Lucca apresentou os melhores resultados, em relação às aproximações de Carson-Clem e Ametani, obtendo desvios médios relativos de, no máximo, 5,02% e 6,94%, para as resistividades do solo de 100 e 1000 Ω.m, respectivamente, conforme as comparações com os métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência nas seções 5.1.1.1 e 5.1.1.2.

Aplicando-se a expressão (3.51) apresentada na norma técnica IEEE 367-2012 para estimar os potenciais do solo em relação ao duto interferido, o menor desvio médio relativo é de 0,51%, quando comparados os respectivos resultados obtidos com os do método da Teoria de Circuitos, de acordo com as seções 5.1.2.1 a 5.1.2.4. Indicando que o programa computacional elaborado no presente trabalho possui abordagem similar ao referido método.

Conforme as seções 5.1.2.5 a 5.1.2.8, os resultados das tensões de passo nas superfícies de potenciais do solo geradas através do programa computacional elaborado apresentam perfis semelhantes aos produzidos pelo método da Teoria de Campo, empregado no programa computacional comercial de referência. No entanto, os mesmos indicam desvios entre os valores máximos de até 27,33%, para a situação de cruzamento entre a linha de transmissão e o duto interferido. O que denota a possibilidade de o programa computacional comercial de referência utilizar um modelo aprimorado de distribuição e injeção de corrente no solo, através do arranjo do sistema de aterramento das torres, baseado no posicionamento de cabos contrapeso em relação ao duto, no qual o sentido de lançamento dos cabos no solo influencia de maneira significativa os resultados.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo referente às influências de linhas de transmissão aéreas de alta tensão em dutos terrestres e as preocupações que estas causam a empresas dos respectivos setores e órgãos competentes. Para isto, foram abordados os principais conceitos relacionados à natureza física das influências, algumas das contribuições realizadas na área, os riscos oferecidos à integridade de dutos interferidos e à segurança de pessoas, bem como alguns dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva causados durante a operação normal e na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão, respectivamente.

Situações típicas envolvendo a proximidade de linhas de transmissão aéreas de alta tensão com dutos terrestres foram contempladas em um estudo de caso, nas quais os arranjos das aproximações entre ambas as instalações foram modelados em programas computacionais comerciais da SESTECH e nos programas computacionais elaborados no presente trabalho.

O estudo de caso consistiu em: (i) conferir os resultados para apenas um trecho de duto, nas proximidades dos casos estudados, com os que se obtém quando todo o traçado do mesmo é considerado em uma avaliação; (ii) comparar o grau de concordância dos métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva com os métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência.

À luz dos resultados obtidos, os desvios dos valores máximos de influência indutiva de até 52,03% apontam que um duto interferido estaria sujeito à corrosão, caso medidas mitigadoras não fossem especificadas em virtude de resultados para níveis de tensão C.A. induzida abaixo; entretanto, próximos do valor máximo admissível de 15 V_{ef}, em uma avaliação considerando apenas parte do traçado do duto. Os resultados para a influência indutiva indicam, ainda, que a aproximação de Lucca apresenta melhores respostas para o cálculo das impedâncias mútuas entre os condutores de uma linha de transmissão aérea e os subsegmentos de um duto terrestre, frente às aproximações de Carson-Clem e Ametani, obtendo desvios médios relativos de, no máximo, 5,02% e 6,94%, para as resistividades do solo de 100 e 1000 Ω.m, respectivamente, em comparação com os métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência.

Considerando a influência condutiva, as diferenças em adotar nas simulações computacionais um trecho do duto interferido ou todo o traçado do mesmo, conforme citado,

não influenciam significativamente nos potenciais do solo em relação ao duto, obtendo-se o maior desvio dos valores máximos de 1,35%, de acordo com os respectivos resultados apresentados. No que diz respeito à comparação dos níveis de influência condutiva obtidos através expressão (3.51) apresentada na norma técnica IEEE 367-2012 com os valores fornecidos pelos métodos empregados nos programas computacionais comerciais de referência, o menor desvio médio relativo é de 0,51%, comparando-os com o método da Teoria de Circuitos. O que vem a indicar que o programa computacional elaborado possui abordagem similar ao referido método.

Quanto aos resultados para tensões de passo sobre a faixa do duto interferido nas proximidades com a linha de transmissão, as superfícies de potenciais geradas através do programa computacional elaborado apresentam, em geral, perfis semelhantes aos produzidos pelo método empregado no programa computacional comercial de referência, contudo, indicando desvios entre os valores máximos de até 27,33%, para o caso de cruzamento estudado. Isso sugere a possível aplicação de um modelo aprimorado nos cálculos de distribuição e injeção de corrente no solo, por parte do programa computacional comercial de referência, com base na posição do sistema de aterramento das torres em relação ao duto.

Desta forma, como principais contribuições desta dissertação, além de apresentar uma base de conhecimento que possa ser útil em trabalhos futuros, possibilitando o desenvolvimento de aplicações para se estimar as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários, haja vista que a norma técnica ABNT NBR 16563-1:2016 não indica como realizar os cálculos, identificou-se que um duto interferido estaria sujeito à corrosão, face a uma avaliação considerando apenas parte de seu traçado, caso medidas de mitigação não fossem especificadas em virtude de resultados para níveis de tensão C.A. induzida abaixo; entretanto, próximos do limite de 15 V_{ef}. De forma comum e habitual, isto pode vir a ocorrer devido à falta de informações completas de ambos os sistemas em uma avaliação.

Conclui-se, portanto, a imprescindibilidade de se dispor de dados precisos acerca das estruturas envolvidas para a realização dos estudos em questão, fim de evitar o surgimento de processos de corrosão que possam colocar em risco a integridade de dutos e a segurança de pessoas. Além disso, que os métodos gerais para se estimar os níveis de influência indutiva e condutiva apresentados neste trabalho podem ser aplicados na criação de ferramenta computacional para avaliar as influências de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários.

6.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de desdobramentos futuros do presente trabalho, pode-se citar:

- Avaliação da influência indutiva na condição de curto-circuito monofásico em uma linha de transmissão e, por conseguinte, a diferença de potencial elétrico aplicada ao revestimento do duto, em função da influência condutiva estimada.
- Avaliação da influência capacitiva que, embora grande parte dos sistemas dutoviários no país compõe-se de dutos terrestres, deve ser levada em conta em situações de aproximação de sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários que envolvam dutos aéreos;
- Aplicação de métodos de solução numérica, como o método dos Elementos Finitos, o método dos Momentos e o método de Circuito Equivalente por Elementos Parciais, além dos métodos analíticos considerados no presente trabalho, para se estimar os níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas dutoviários;
- Melhoria da forma de cálculo para se estimar os níveis de tensão de passo sobre a faixa do duto interferido, aplicando um modelo acurado de distribuição e injeção de corrente no solo, que leve em consideração, de forma precisa, o posicionamento de cabos contrapeso em relação ao duto, bem como o sentido de lançamento dos mesmos no solo;
- Emprego de métodos para estimar os níveis de influência de sistemas de energia elétrica em sistemas de dutoviários que possibilitem considerar modelos de solo heterogêneos; e
- Abordagem dos aspectos ligados a medidas mitigadoras que se façam necessárias à garantia de integridade de estruturas e da segurança de pessoas.

Novos trabalhos sobre este tema são essenciais para buscar garantir a integridade de dutos interferidos e a segurança de pessoas, diante do aumento da concentração de sistemas de energia elétrica e sistemas dutoviários nas últimas décadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GAWAD, N. M. K.; EL DEIN, A. Z.; MAGDY, M. Mitigation of induced voltages and AC corrosion effects on buried gas pipeline near to OHTL under normal and fault conditions. **Electric Power Systems Research**, v. 127, p. 297–306, out. 2015.

ABDEL-SALAM, M.; AL-SHEHRI, A. Induced voltages on fence wires and pipelines by AC power transmission lines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 30, n. 2, p. 341–349, mar. 1994.

AMETANI, A. *et al*. An Investigation of Earth-Return Impedance Between Overhead and Underground Conductors and Its Approximation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 860–867, ago. 2009.

ANP Nº 2/2011. Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para Movimentação de Petróleo, Derivados e Gás Natural (RTDT). ANP, 2011.

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**, v. 21, n. 1, p. 210–217, jan. 2006.

CARSON, J. R. Wave propagation in overhead wires with ground return. **The Bell System Technical Journal**, v. 5, n. 4, p. 539–554, out. 1926.

CHRISTOFORIDIS, G. C.; DOKOPOULOS, P. S.; PSANNIS, K. E. Induced voltages and currents on gas pipelines with imperfect coatings due to faults in a nearby transmission line. **2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings**, 2001.

CHRISTOFORIDIS, G. C.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Inductive interference calculation on imperfect coated pipelines due to nearby faulted parallel transmission lines. **Electric Power Systems Research**, v. 66, n. 2, p. 139–148, ago. 2003.

CHRISTOFORIDIS, G. C.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. A hybrid method for calculating the inductive interference caused by faulted power lines to nearby buried pipelines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1465–1473, abr. 2005a.

CHRISTOFORIDIS, G. C.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Inductive interference on pipelines buried in multilayer soil due to magnetic fields from nearby faulted power lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 47, n. 2, p. 254–262, maio 2005b.

CIGRE WORKING GROUP 36.02. **Guide on the influence of high voltage AC power systems on metallic pipelines**. CIGRE, 1995.

COORAY, V. Underground electromagnetic fields generated by the return strokes of lightning flashes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 43, n. 1, p. 75–84, fev. 2001.

COTTON, I.; KOPSIDAS, K.; ZHANG, Y. Comparison of Transient and Power Frequency-Induced Voltages on a Pipeline Parallel to an Overhead Transmission Line. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 3, p. 1706–1714, jul. 2007.

DABKOWSKI, J.; FRAZIER, M. **Power Line Fault Current Coupling to Nearby Natural Gas Pipelines**. Electric Power Research Institute, 1987.

DABKOWSKI, J.; TAFLOVE, A. Prediction Method for Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling Part II–Field test Verification. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-98, n. 3, p. 788–794, maio 1979.

DALZIEL, C. F.; LAGEN, J. B. Effects of electric current on man. **Electrical Engineering**, v. 60, n. 2, p. 63–66, fev. 1941.

DALZIEL, C. F.; LAGEN, J. B.; THURSTON, J. L. Electric shock. **Electrical Engineering**, v. 60, n. 12, p. 1073–1078, dez. 1941.

DAWALIBI, F. Ground Fault Current Distribution Between Soil and Neutral Conductors. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-99, n. 2, p. 452–461, mar. 1980.

DAWALIBI, F. Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors Part 1 - Single Conductor. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 4, p. 105–111, out. 1986a.

DAWALIBI, F. Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors Part 2 - Ground Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 4, p. 112–119, out. 1986b.

DAWALIBI, F.; NILES, G. B. Measurements and Computations of Fault Current Distribution on Overhead Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-103, n. 3, p. 553–560, mar. 1984.

DAWALIBI, F. P.; LI, Y.; MA, J. Safety of pipelines in close proximity to electric transmission lines. **Proceedings of 2000 IEEE IAS Workshop on Electrical Safety in Industry**, abr. 2000.

DAWALIBI, F. P.; SOUTHEY, R. D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. I. Computation methods. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 3, p. 1840–1846, jul. 1989.

DAWALIBI, F. P.; SOUTHEY, R. D. Analysis of electrical interference from power lines to gas pipelines. II. Parametric analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 1, p. 415–421, jan. 1990.

DAWALIBI, F.; PINHO, A. Computerized Analysis of Power Systems and Pipelines Proximity Effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 2, p. 40–48, abr. 1986.

DÉRI, Á. *et al*. The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 8, p. 3686–3693, ago. 1981.

DÉRI, Á.; TEVAN, G. Mathematical verification of Dubanton's simplified calculation of overhead transmission line parameters and its physical interpretation. **Archiv für Elektrotechnik**, v. 63, n. 4, p. 191–198, 1 jul. 1981.

DJOGO, G.; SALAMA, M. M. A. Calculation of inductive coupling from power lines to multiple pipelines and buried conductors. **Electric Power Systems Research**, v. 41, n. 1, p. 75–84, abr. 1997.

ELHIRBAWY, M. A. *et al*. Practical results and finite difference method to analyze the electric and magnetic field coupling between power transmission line and pipeline. **Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems**, maio 2003.

EPRI/A.G.A E.-5472/PR176-510. Power Line Fault Current Coupling to Nearby Natural Gas Pipelines. EPRI/A.G.A, 1987.

FERRIS, L. P. *et al*. Effect of Electric Shock on the Heart. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 55, n. 5, p. 498–515, maio 1936.

FRAZIER, M. *et al*. Transmission Line, Railroad and Pipeline Common Corridor Study. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, n. 3, p. 294–300, jul. 1986.

GABILLARD, M. *et al*. Corrosion due to AC influence of very high voltage power lines on polyethylene-coated steel pipelines: evaluation of risks – preventive measures. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 48, n. 4, p. 221–227, 1 ago. 2001.

GARY, C. Approche compléte de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes. n. No. 3/4, p. 5–20, 1976.

GOUDA, O. E.; DEIN, A. Z. E.; EL-GABALAWY, M. A. H. Effect of electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines. **Electric Power Systems Research**, v. 103, p. 129–136, out. 2013.

GRCEV, L. D. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 815–823, abr. 1996.

IBRAHIM, E. S. Corrosion control in electric power systems. **Electric Power Systems Research**, p. 9, 1999.

IEEE STD 367-2012. IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault. IEEE, maio 2012.

ISMAIL, H. M. Effect of Oil Pipelines Existing in an HVTL Corridor on the Electric-Field Distribution. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 4, p. 2466–2472, out. 2007.

ITU-T K.33 (10/96). Limits for people safety related to coupling into telecommunications system from a.c. electric power and a.c. electrified railway installations in fault conditions. ITU, 1996.

JACQUET, B.; MOORE, W. Effects of earth currents on buried pipelines and cables. **CIGRE Proceedings**, v. II, n. 36– 06, 1988.

KOPSIDAS, K.; COTTON, I. Induced Voltages on Long Aerial and Buried Pipelines Due to Transmission Line Transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 3, p. 1535–1543, jul. 2008.

KOUTEYNIKOFF, P. Results of an International Survey of the Rules Limiting Interference

Coupled into Metallic Pipelines by High Voltage Power Systems. **CIGRE Study committee 36**, v. Electra No.110, p. 57, 1983.

LUCCA, G. Mutual impedance between an overhead and a buried line with earth return. **Ninth International Conference on Electromagnetic Compatibility**, Conf. Publ. No. 396, set. 1994

LUCCA, G. Two steps numerical method for calculating the AC interference from a faulty power line on nearby buried pipelines. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 21, n. 7, p. 2037–2052, 1 out. 2011.

LUCCA, G. Electromagnetic interference from power lines on pipelines: influence of pipe insulating coating degradation. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 26, n. 12, p. 2699–2712, 1 dez. 2016.

METWALLY, I. A.; HEIDLER, F. Mitigation of the produced voltages in AC overhead power-lines/pipelines parallelism during power frequency and lightning conditions. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, v. 15, n. 4, p. 351–369, 1 jul. 2005.

MICU, D. D.; CHRISTOFORIDIS, G. C.; CZUMBIL, L. AC interference on pipelines due to double circuit power lines: A detailed study. **Electric Power Systems Research**, v. 103, p. 1–8, 1 out. 2013.

NACE SP0177-2014. Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems. NACE, 2014.

NAKAGAWA, M.; AMETANI, A.; IWAMOTO, K. Further studies on wave propagation in overhead lines with earth return: impedance of stratified earth. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 120, n. 12, p. 1521–1528, dez. 1973.

NBR 15751:2013. Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos. ABNT, 2013.

NBR 16563-1:2016. Mitigação de efeitos de interferências elétricas em sistemas dutoviários Parte 1: Sistemas de corrente alternada. ABNT, 2016.

NBR ISO 15589-1:2016. Indústrias de petróleo, petroquímica e gás natural - Proteção catódica de sistemas de transporte por dutos Parte 1: Dutos terrestres. ABNT, 2016.

NELSON, J. P. Power Systems in Close Proximity to Pipelines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-22, n. 3, p. 435–441, maio 1986.

NUNES, L. DA P.; DUTRA, A. C. **Proteção Catódica - Técnica de Combate à Corrosão**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 372 p.

PAPADOPOULOS, T. A.; TSIAMITROS, D. A.; PAPAGIANNIS, G. K. Impedances and Admittances of Underground Cables for the Homogeneous Earth Case. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 2, p. 961–969, abr. 2010.

PAPADOPOULOS, T. A.; TSIAMITROS, D. A.; PAPAGIANNIS, G. K. Earth return admittances and impedances of underground cables in non-homogeneous earth. **Transmission Distribution IET Generation**, v. 5, n. 2, p. 161–171, fev. 2011.

PAPAGIANNIS, G. K. *et al*. Direct numerical evaluation of earth return path impedances of underground cables. **Transmission and Distribution IEE Proceedings - Generation**, v. 152, n. 3, p. 321–327, maio 2005.

PETRACHE, E. *et al*. Lightning induced disturbances in buried Cables-part I: theory. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 47, n. 3, p. 498–508, ago. 2005.

POLLACZEK, F. Uber das Feld einer unendlich langen wechselstrom durchflossenen Einfachleitung. **Electrishe Nachrichten Technik (ENT)**, v. 3, n. 9, p. 339–359, jul. 1926.

QI, L. *et al*. Earth return impedance and admittance of overhead line-underground cable systems. **Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering**, v. 32, p. 148–156, 25 nov. 2012.

QI, L. *et al*. Calculation of Interference Voltage on the Nearby Underground Metal Pipeline due to the Grounding Fault on Overhead Transmission Lines. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 55, n. 5, p. 965–974, out. 2013.

RUEHLI, A.; BRENNAN, P. The modified nodal approach to network analysis. **IEEE Transactions on Circuits and Systems**, v. 22, n. 6, p. 504–509, jun. 1975.

SATSIOS, K. J.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. The influence of multi-layer ground on the electromagnetic field of an overhead power transmission line in the presence of buried conductors. **Electrical Engineering**, v. 80, n. 5, p. 343–348, 1 out. 1997.

SATSIOS, K. J.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Finite element computation of field and eddy currents of a system consisting of a power transmission line above conductors buried in nonhomogeneous earth. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 3, p. 876–882, jul. 1998.

SDG&E – NV5 – Sycamore. AC Interference and Induced Current Touch Study – Peñasquitos 230 kV Underground Transmission Line Project. SDG&E, 2016.

SOBRAL, S. T. *et al*. "Decoupled method" for studying large interconnected grounding systems using microcomputers. I. Fundamentals. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 4, p. 1536–1544, out. 1988a.

SOBRAL, S. T. *et al*. "Decoupled method" for studying large interconnected grounding systems using microcomputers. II. Utilization on Itaipu ground system and complementary aspects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 4, p. 1545–1552, out. 1988b.

SOBRAL, S. T. *et al*. Interferences between faulted power circuits and communication circuits or pipelines-simplification using the decoupled method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n. 4, p. 1599–1606, out. 1991.

SOUTHEY, R. D.; DAWALIBI, F. P.; VUKONICH, W. Recent advances in the mitigation of AC voltages occurring in pipelines located close to electric transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 2, p. 1090–1097, abr. 1994.

SOUTHEY, R.; RUAN, W.; DAWALIBI, F. P. AC Mitigation Requirements: A Parametric Analysis. In: CORROSION 2001. **NACE International**, 1 jan. 2001.

STEFANESCO, S.; SCHLUMBERGER, C.; SCHLUMBERGER, M. Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes. **Journal de Physique et Le Radium**, v. 1, p. 132–140, 1930.

SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems.** 1st. ed. ed. New York: D. Van Nostrand Co., 1949.

TAFLOVE, A.; DABKOWSKI, J. Prediction Method for Buried Pipeline Voltages Due to 60 Hz AC Inductive Coupling Part I-Analysis. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-98, n. 3, p. 780–787, maio 1979.

TSIAMITROS, D. A. *et al*. Earth return path impedances of underground cables for the two-layer earth case. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 3, p. 2174–2181, jul. 2005.

TSIAMITROS, D. A.; PAPAGIANNIS, G. K.; DOKOPOULOS, P. S. Earth Return Impedances of Conductor Arrangements in Multilayer Soils; Part I: Theoretical Model. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 4, p. 2392–2400, out. 2008.

URIBE, F. A. Calculating Mutual Ground Impedances Between Overhead and Buried Cables. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 50, n. 1, p. 198–203, fev. 2008.

WAIT, J. R. Electromagnetic Wave Propagation Along a Buried Insulated Wire. **Canadian Journal of Physics**, v. 50, n. 20, p. 2402–2409, 15 out. 1972.

WEDEPOHL, L. M.; WILCOX, D. J. Transient analysis of underground power-transmission systems. System-model and wave-propagation characteristics. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 120, n. 2, p. 253–260, fev. 1973.

WISE, W. H. Propagation of High-Frequency Currents in Ground Return Circuits. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 22, n. 4, p. 522–527, abr. 1934.

WU, X.; ZHANG, H.; KARADY, G. G. Transient analysis of inductive induced voltage between power line and nearby pipeline. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 84, p. 47–54, jan. 2017.

YANG, X.-M.; XU, X.-B. Interference of nonlinear ferromagnetic pipeline on magnetic field produced by power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 2, p. 644–649, abr. 1996.

ZOU, J. *et al*. Fast and Highly Accurate Algorithm for Calculating the Earth-Return Impedance of Underground Conductors. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 53, n. 1, p. 237–240, fev. 2011.

APÊNDICE

APÊNDICE A. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS ELABORADOS

A.1. Cálculo da influência indutiva

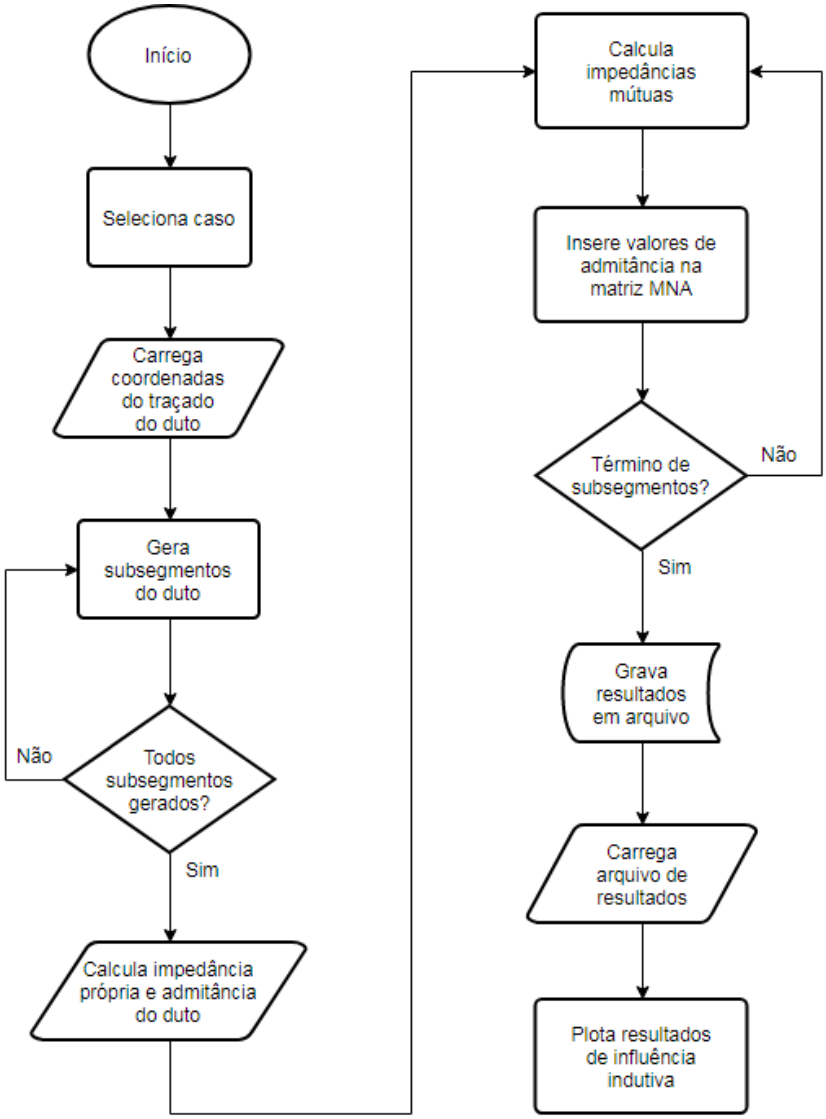

Figura 58: Fluxograma do programa para cálculo de influência indutiva.

```
""" Calculo da Influencia Indutiva """

import numpy as np, matplotlib.pyplot as plt, matplotlib.ticker as tkr


""" DADOS """

""" Silhueta da torre """
xc = [-2.9, 2.9, -2.9, 0.0]
yc = [28.72, 26.86, 25.0, 31.61]
nc = len(xc)
```

```
""" Dados do duto """
diametro = 0.508
r_duto = 1.724e-07
ur_duto = 300.0
esp_revest = 3.0e-03
r_revest = 1.0e+08
ur_revest = 1.0
E0 = 8.854e-12
Er_revest = 1.0

""" Dados do sistema eletrico """
f = 60.0
Ia = 500.0 + 0.0j
Ib = -250.0 + 433.013j
Ic = -250.0 - 433.013j
Zpr = 4.322 + 1.971j


""" Funcao(oes) """

""" Calcula Distancia """
def calc_distancia(v, nc, n_subseg, De, subcoordenadas, xc, yc):

    for j in range(nc):

        if j == 0:
            if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
                Dad = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i+1, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)
            else:
                Dad = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)

        if j == 1:
            if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
                Dbd = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i+1, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)
            else:
                Dbd = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)

        if j == 2:
            if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
                Dcd = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i+1, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)
            else:
                Dcd = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)

        if j == 3:
            Dpra = np.sqrt((xc[j] - xc[j-3]) ** 2 + (yc[j] - yc[j-3]) ** 2)
            Dprb = np.sqrt((xc[j] - xc[j-2]) ** 2 + (yc[j] - yc[j-2]) ** 2)
            Dprc = np.sqrt((xc[j] - xc[j-1]) ** 2 + (yc[j] - yc[j-1]) ** 2)
            if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
                Dprd = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i+1, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)
            else:
                Dprd = np.sqrt((xc[j] - subcoordenadas[(i, 1)]) ** 2 +
(yc[j] - subcoordenadas[(i, 2)]) ** 2)

        if v == 0:
```

```
                if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
                                v = 1

    return Dad, Dbd, Dcd, Dpra, Dprb, Dprc, Dprd


""" Aproximacao de Carson-Clem """
def carson(u0, w, De, Df_prd):

    Z = ((u0 * w / 8) * 1.0e+03) + ((u0 * w / (2 * np.pi) * np.log(De /
Df_prd)) * 1.0e+03j)
    return Z


""" Aproximacao de Lucca """
def lucca(w, u0, r_solo, y1, y2, a):

    Y = np.sqrt(1j * w * u0 / r_solo)
    _y = y1 - y2 + 2 / Y
    _R12 = np.sqrt(_y ** 2 + a ** 2)
    R12 = np.sqrt(a ** 2 + (y1 - y2) ** 2)
    Z = ((w * u0 / (2 * np.pi)) * 1.0e+03j) * (np.log(_R12 / R12) - (2 *_y)
/ (3 * Y ** 3) * ((_y ** 2 - 3 * a ** 2) / (_R12 ** 6)))
    return Z


""" Aproximacao de Ametani """
def ametani(w, u0, r_solo, h1, h2, y):

    m = np.sqrt(1j * w * u0 / r_solo)
    Zs = 1 / m
    H = h1 - h2 + 2 * Zs
    _S = np.sqrt(H ** 2 + y ** 2)
    Df_prd = np.sqrt((h1 - h2) ** 2 + y ** 2)
    Z = ((w * u0 / (2 * np.pi)) * 1.0e+03j) * np.exp(-h2 / Zs) * np.log(_S
/ Df_prd)
    return Z


""" Monta Ymat """
def monta_Ymat(i, Z, subsegmentos, Y):

    Ymat[(2 * (i + 1), 2 * (i + 1))] = 1 / (Z * subsegmentos[(i, 0)]) + Y *
subsegmentos[(i, 0)]
    Ymat[(2 * i, 2 * n_subseg + i + 1)] = -1
    Ymat[(2 * (i + 1) - 1, 2 * (i + 1) - 1)] = 1 / (Z * subsegmentos[(i,
0)])
    Ymat[(2 * (i + 1) - 1, 2 * (i + 1))] = -1 / (Z * subsegmentos[(i, 0)])
    Ymat[(2 * i + 1, 2 * n_subseg + i + 1)] = 1
    Ymat[(2 * (i + 1), 2 * (i + 1) - 1)] = -1 / (Z * subsegmentos[(i, 0)])
    Ymat[(2 * n_subseg + i + 1, 2 * i)] = -1
    Ymat[(2 * n_subseg + i + 1, 2 * i + 1)] = 1
    return Ymat


""" Grava resultados em arquivo """
def grava_arq(formula, nome_caso, n_subseg, distancia, Vduto_mod, Vduto,
subsegmentos):

        arquivo = open(formula + nome_caso + "_resultados.txt","w")
```

```
        for i in range(0, n_subseg + 1):

            if i == 0:
                distancia[(i, 0)] = 0
                Vduto_mod[(i, 0)] = np.absolute(Vduto[(i + 1, 0)])
            else:
                distancia[(i, 0)] = distancia[(i - 1, 0)] + subsegmentos[(i
- 1, 0)]
                Vduto_mod[(i, 0)] = np.absolute(Vduto[(2 * i, 0)])

            arquivo.write("%f\t" % distancia[(i, 0)])
            arquivo.write("%f\n" % Vduto_mod[(i, 0)])

        arquivo.close()


def carrega_resul(resul, dist_mont):

        arquivo = open(resul,"r")
        n_linha = 0

        for linha in arquivo.readlines():

                n_linha = n_linha + 1

        arquivo.close()

        distancia = np.zeros([n_linha, 1])
        Vduto_mod = np.zeros([n_linha, 1])


        n_linha = 0

        arquivo = open(resul,"r")

        for linha in arquivo:
            valores = linha.split()
            distancia[(n_linha, 0)] = float(valores[0]) + dist_mont
            Vduto_mod[(n_linha, 0)] = float(valores[1])
            n_linha = n_linha + 1

        arquivo.close()
        return distancia, Vduto_mod


def converte_x(x, pos):

        x = '{:0,d}'.format(int(x))
        x = format(x).replace(",", "+")

        if x == "0":
                x = "0+000"

        if x == "500":
                x = "0+500"

        if x == "8+500" or x == "9+000":
                x = " "
        return x
```

```
""" Aproximacao entre duto e LT """
nome_caso = raw_input("Entre com o caso de aproximacao: ")
dist_mont = float(input("Distancia a montante do duto: "))
r_solo = float(input("Resistividade do solo: "))


""" Carrega coordenadas do duto """
caso_arq = nome_caso + ".txt"
arquivo = open(caso_arq,"r")

n_linha = 0

for linha in arquivo.readlines():

    n_linha = n_linha + 1

arquivo.close()

coordenadas = np.zeros([n_linha, 3])

n_linha = 0
arquivo = open(caso_arq,"r")

for linha in arquivo:
    valores = linha.split()
    coordenadas[(n_linha, 0)] = float(valores[0])
    coordenadas[(n_linha, 1)] = float(valores[1])
    coordenadas[(n_linha, 2)] = float(valores[2])
    n_linha = n_linha + 1

arquivo.close()


""" Gera segmentos e subsegmentos do duto """
n_seg = len(coordenadas) - 1
segmentos = np.zeros([n_seg, 1])
div = 10
subsegmentos = np.zeros([1, 1])
subcoordenadas = np.zeros([1, 3])


for i in range(n_seg):
    segmentos[(i, 0)] = np.sqrt((coordenadas[(i + 1, 0)] - coordenadas[(i,
0)]) ** 2 + (coordenadas[(i + 1, 1)] - coordenadas[(i, 1)]) ** 2)
    x = coordenadas[(i + 1, 0)] - coordenadas[(i, 0)]
    y = coordenadas[(i + 1, 1)] - coordenadas[(i, 1)]
    tan = y / x
    ang = np.arctan(tan)

    if i == 0:
        if segmentos[(i, 0)] / div < 1:
            subsegmentos[(i, 0)] = segmentos[(i, 0)]
            subcoordenadas[(i)] = coordenadas[(i)]
        else:
            n_subseg = int(round(segmentos[(i, 0)] / div, 0))
            subsegmentos = np.zeros([n_subseg, 1])
            subcoordenadas = np.zeros([n_subseg, 3])
            for j in range(n_subseg):
                subsegmentos[(j, 0)] = segmentos[(i, 0)] / n_subseg
                if j == 0:
                    subcoordenadas[(i)] = coordenadas[(i)]
```

```
                else:
                    subcoordenadas[(j, 0)] = subcoordenadas[(j - 1, 0)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.cos(ang)
                    subcoordenadas[(j, 1)] = subcoordenadas[(j - 1, 1)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.sin(ang)
                    subcoordenadas[(j, 2)] = coordenadas[(i, 2)]
    else:
        if segmentos[(i, 0)] / div < 1:
            n_subseg = 1
            subsegmentos = np.concatenate((subsegmentos,
np.zeros([n_subseg, 1])))
            subsegmentos[(len(subsegmentos) - 1, 0)] = segmentos[(i, 0)]
            subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas,
np.zeros([n_subseg, 3])))
            subcoordenadas[(len(subcoordenadas) - 1)] = coordenadas[(i)]

        else:
            n_subseg = int(round(segmentos[(i, 0)] / div, 0))
            subsegmentos = np.concatenate((subsegmentos,
np.zeros([n_subseg, 1])))
            subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas,
np.zeros([n_subseg, 3])))
            for j in range(n_subseg):
                subsegmentos[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 0)] =
segmentos[(i, 0)] / n_subseg
                if j == 0:
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg)] =
coordenadas[(i)]
                else:
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 0)] =
subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j - 1, 0)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.cos(ang)
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 1)] =
subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j - 1, 1)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.sin(ang)
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 2)] =
coordenadas[(i, 2)]

subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas, np.zeros([1, 3])))
subcoordenadas[(len(subcoordenadas) - 1)] = coordenadas[(i + 1)]

n_subseg = len(subsegmentos)


""" CALCULOS """

w = 2 * np.pi * f
u0 = 4 * np.pi * 1e-07
De = 658.37 * np.sqrt(r_solo / f)


""" Impedancia e Admitancia do duto """
Z_re = np.sqrt(r_duto * u0 * ur_duto * w) / (np.pi * diametro * np.sqrt(2))
+ (u0 * w / 8)
Z_im = np.sqrt(r_duto * u0 * ur_duto * w) / (np.pi * diametro * np.sqrt(2))
+ (u0 * w / (np.pi * 2)) * np.log(3.7 / diametro * np.sqrt(r_solo / (u0 *
w)))
Z = complex(Z_re, Z_im)

Y_re = np.pi * diametro / (r_revest * esp_revest)
Y_im = w * E0 * Er_revest * np.pi * diametro / esp_revest
```

```
Y = complex(Y_re, Y_im)

ordem = 3 * n_subseg + 1
Vmut = np.zeros([n_subseg, 1], dtype=complex)
Ymat = np.zeros([ordem, ordem], dtype=complex)
Ymat = np.matrix(Ymat)


""" Impedancia mutua entre duto e LT - CARSON """
v = 0
for i in range(0, n_subseg):

    Dad, Dbd, Dcd, Dpra, Dprb, Dprc, Dprd = calc_distancia(v, nc, n_subseg,
De, subcoordenadas, xc, yc)

    Zad = carson(u0, w, De, Dad)
    Zbd = carson(u0, w, De, Dbd)
    Zcd = carson(u0, w, De, Dcd)
    Zpra = carson(u0, w, De, Dpra)
    Zprb = carson(u0, w, De, Dprb)
    Zprc = carson(u0, w, De, Dprc)
    Zprd = carson(u0, w, De, Dprd)

    Zadpr = Zad - Zpra * Zprd / Zpr
    Zbdpr = Zbd - Zprb * Zprd / Zpr
    Zcdpr = Zcd - Zprc * Zprd / Zpr

    monta_Ymat(i, Z, subsegmentos, Y)

    Vmut[(i, 0)] = (Zadpr * Ia + Zbdpr * Ib + Zcdpr * Ic) *
subsegmentos[(i, 0)] / 1000


Vmat = np.zeros([ordem - n_subseg, 1], dtype=complex)
Vmat = np.concatenate((Vmat, Vmut))
Vduto = Ymat.I * Vmat

Vduto_mod = np.zeros([n_subseg + 1, 1])
distancia = np.zeros([n_subseg + 1, 1])


""" Grava resultados em arquivo """
grava_arq("CARSON_", nome_caso, n_subseg, distancia, Vduto_mod, Vduto,
subsegmentos)


""" Impedancia mutua entre duto e LT - LUCCA """
for i in range(0, n_subseg):

    if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
        Zad = lucca(w, u0, r_solo, yc[0], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i+1, 1)]) - xc[0])
        Zbd = lucca(w, u0, r_solo, yc[1], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i+1, 1)]) - xc[1])
        Zcd = lucca(w, u0, r_solo, yc[2], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i+1, 1)]) - xc[2])
        Zprd = lucca(w, u0, r_solo, yc[3], subcoordenadas[(i, 2)],
subcoordenadas[(i+1, 1)])
    else:
        Zad = lucca(w, u0, r_solo, yc[0], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i, 1)]) - xc[0])
```

```
        Zbd = lucca(w, u0, r_solo, yc[1], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i, 1)]) - xc[1])
        Zcd = lucca(w, u0, r_solo, yc[2], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i, 1)]) - xc[2])
        Zprd = lucca(w, u0, r_solo, yc[3], subcoordenadas[(i, 2)],
subcoordenadas[(i, 1)])

    Zpra = lucca(w, u0, r_solo, yc[3], -yc[0], xc[0] - xc[3])
    Zprb = lucca(w, u0, r_solo, yc[3], -yc[1], xc[1] - xc[3])
    Zprc = lucca(w, u0, r_solo, yc[3], -yc[2], xc[2] - xc[3])

    Zadpr = Zad - Zpra * Zprd / Zpr
    Zbdpr = Zbd - Zprb * Zprd / Zpr
    Zcdpr = Zcd - Zprc * Zprd / Zpr

    monta_Ymat(i, Z, subsegmentos, Y)

    Vmut[(i, 0)] = (Zadpr * Ia + Zbdpr * Ib + Zcdpr * Ic) *
subsegmentos[(i, 0)] / 1000


Vmat = np.zeros([ordem - n_subseg, 1], dtype=complex)
Vmat = np.concatenate((Vmat, Vmut))
Vduto = Ymat.I * Vmat

Vduto_mod = np.zeros([n_subseg + 1, 1])
distancia = np.zeros([n_subseg + 1, 1])


""" Grava resultados em arquivo """
grava_arq("LUCCA_", nome_caso, n_subseg, distancia, Vduto_mod, Vduto,
subsegmentos)


""" Impedancia mutua entre duto e LT - AMETANI """
for i in range(0, n_subseg):

    if subcoordenadas[(i, 1)] < 0:
        Zad = ametani(w, u0, r_solo, yc[0], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i+1, 1)]) - xc[0])
        Zbd = ametani(w, u0, r_solo, yc[1], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i+1, 1)]) - xc[1])
        Zcd = ametani(w, u0, r_solo, yc[2], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i+1, 1)]) - xc[2])
        Zprd = ametani(w, u0, r_solo, yc[3], subcoordenadas[(i, 2)],
subcoordenadas[(i+1, 1)])
    else:
        Zad = ametani(w, u0, r_solo, yc[0], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i, 1)]) - xc[0])
        Zbd = ametani(w, u0, r_solo, yc[1], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i, 1)]) - xc[1])
        Zcd = ametani(w, u0, r_solo, yc[2], subcoordenadas[(i, 2)],
(subcoordenadas[(i, 1)]) - xc[2])
        Zprd = ametani(w, u0, r_solo, yc[3], subcoordenadas[(i, 2)],
subcoordenadas[(i, 1)])

    Zpra = ametani(w, u0, r_solo, yc[3], -yc[0], xc[0] - xc[3])
    Zprb = ametani(w, u0, r_solo, yc[3], -yc[1], xc[1] - xc[3])
    Zprc = ametani(w, u0, r_solo, yc[3], -yc[2], xc[2] - xc[3])

    Zadpr = Zad - Zpra * Zprd / Zpr
```

```
    Zbdpr = Zbd - Zprb * Zprd / Zpr
    Zcdpr = Zcd - Zprc * Zprd / Zpr

    monta_Ymat(i, Z, subsegmentos, Y)

    Vmut[(i, 0)] = (Zadpr * Ia + Zbdpr * Ib + Zcdpr * Ic) *
subsegmentos[(i, 0)] / 1000


Vmat = np.zeros([ordem - n_subseg, 1], dtype=complex)
Vmat = np.concatenate((Vmat, Vmut))
Vduto = Ymat.I * Vmat

Vduto_mod = np.zeros([n_subseg + 1, 1])
distancia = np.zeros([n_subseg + 1, 1])


""" Grava resultados em arquivo """
grava_arq("AMETANI_", nome_caso, n_subseg, distancia, Vduto_mod, Vduto,
subsegmentos)


""" Carrega resultados para comparacao """
Carson_distancia, Carson_Vduto_mod = carrega_resul("CARSON_" + nome_caso +
"_resultados.txt", dist_mont)
Lucca_distancia, Lucca_Vduto_mod = carrega_resul("LUCCA_" + nome_caso +
"_resultados.txt", dist_mont)
Ametani_distancia, Ametani_Vduto_mod = carrega_resul("AMETANI_" + nome_caso
+ "_resultados.txt", dist_mont)


""" Plotagem dos graficos com resultados """
plt.plot(Carson_distancia, Carson_Vduto_mod, dashes=[6, 2], linewidth=2.0)
plt.plot(Lucca_distancia, Lucca_Vduto_mod, '-', linewidth=2.0)
plt.plot(Ametani_distancia, Ametani_Vduto_mod, dashes=[2, 2, 10, 2],
linewidth=2.0)
plt.xlabel('Progressiva do duto (km)', fontweight='bold', fontsize=16)
plt.ylabel('Tensao C.A. induzida no duto (V)', fontweight='bold',
fontsize=16)
plt.legend(['Carson-Clem','Lucca', 'Ametani'], loc=4, fontsize=10)
ax = plt.axes()
progressiva = tkr.FuncFormatter(converte_x)
ax.xaxis.set_major_formatter(progressiva)
plt.grid()
plt.savefig(nome_caso + "_ind_100ohm-m" + ".png")
plt.show()
```

A.2. Cálculo da influência condutiva

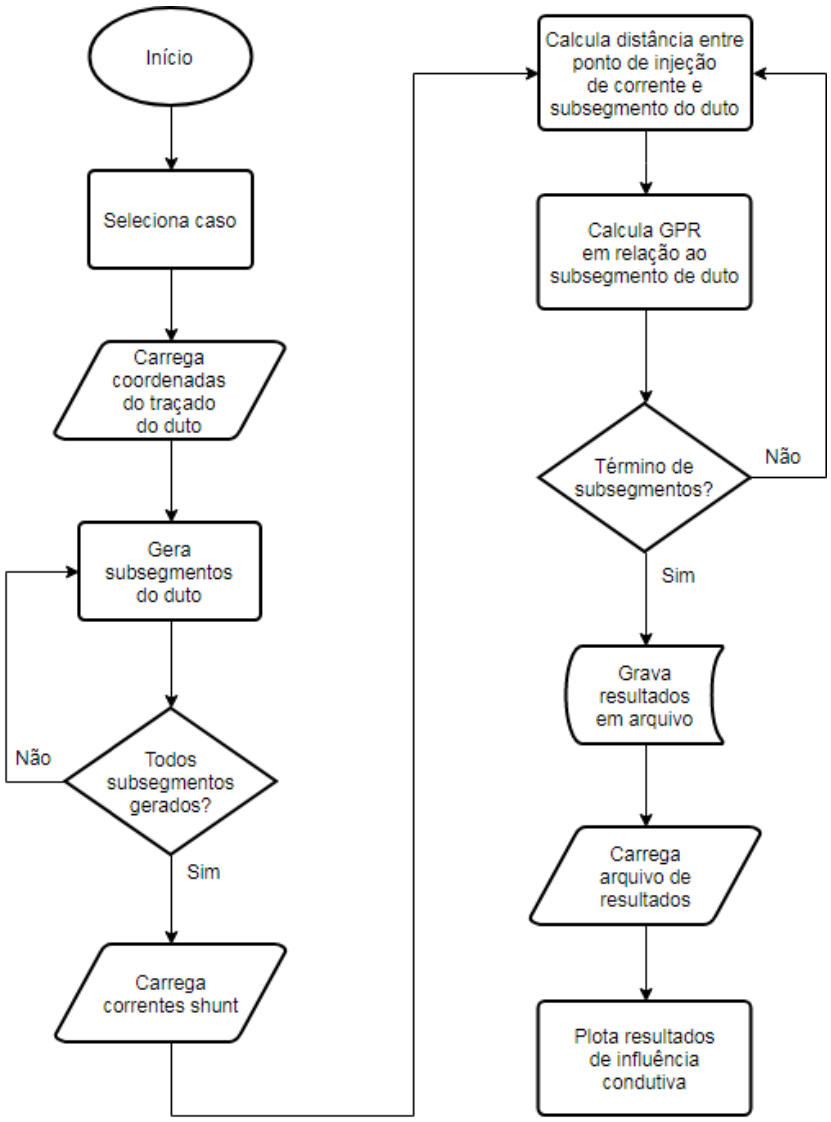

Figura 59: Fluxograma do programa para cálculo de influência condutiva.

```
""" Calculo da Influencia Condutiva """

import numpy as np, matplotlib.pyplot as plt, matplotlib.ticker as tkr


""" Dados """

""" Terminal 1 """
t1_n_vao = 16
t1_vao = 200.0

""" Terminal 2 """
t2_n_vao = 34
t2_vao = 200.0
```

```
""" Funcao(oes) """

""" Calcula distancia """
def calc_dist(x0, x1, y0, y1, z0, z1):

    x = np.sqrt(((x1 - x0) ** 2) + ((y1 - y0) ** 2) + ((z1 - z0) ** 2))
    return x


""" Grava resultados em arquivo """
def grava_arq(formula, nome_caso, n_subseg, distancia, Vduto_mod, Vduto,
subsegmentos):

        arquivo = open("IEEE_" + nome_caso + "_cond_100ohm-m.txt","w")

        for i in range(0, n_subseg + 1):

            if i == 0:
                distancia[(i, 0)] = 0
                Vduto_mod[(i, 0)] = np.absolute(GPR_duto[(i, 0)])
            else:
                distancia[(i, 0)] = distancia[(i - 1, 0)] + subsegmentos[(i
- 1, 0)]
                Vduto_mod[(i, 0)] = np.absolute(GPR_duto[(i, 0)])


            arquivo.write("%f\t" % distancia[(i, 0)])
            arquivo.write("%f\n" % Vduto_mod[(i, 0)])

        arquivo.close()


def carrega_resul(resul, dist_mont):

        arquivo = open(resul,"r")
        n_linha = 0

        for linha in arquivo.readlines():

                n_linha = n_linha + 1

        arquivo.close()

        distancia = np.zeros([n_linha, 1])
        Vduto_mod = np.zeros([n_linha, 1])


        n_linha = 0

        arquivo = open(resul,"r")

        for linha in arquivo:
            valores = linha.split()
            distancia[(n_linha, 0)] = float(valores[0]) + dist_mont
            Vduto_mod[(n_linha, 0)] = float(valores[1])
            n_linha = n_linha + 1

        arquivo.close()
        return distancia, Vduto_mod
```

```
def converte_x(x, pos):

        x = '{:0,d}'.format(int(x))
        x = format(x).replace(",", "+")

        if x == "0":
                x = "0+000"

        if x == "500":
                x = "0+500"

        if x == "8+500" or x == "9+000":
                x = " "
        return x


""" Aproximacao entre duto e LT """
nome_caso = raw_input("Entre com o caso de aproximacao: ")
dist_mont = float(input("Distancia a montante do duto: "))
r_solo = float(input("Resistividade do solo: "))
Ish_val = raw_input("Correntes Ish: ")


""" Carrega coordenadas do duto """
caso_arq = nome_caso + ".txt"
arquivo = open(caso_arq,"r")

n_linha = 0

for linha in arquivo.readlines():

    n_linha = n_linha + 1

arquivo.close()

coordenadas = np.zeros([n_linha, 3])


n_linha = 0
arquivo = open(caso_arq,"r")

for linha in arquivo:
    valores = linha.split()
    coordenadas[(n_linha, 0)] = float(valores[0])
    coordenadas[(n_linha, 1)] = float(valores[1])
    coordenadas[(n_linha, 2)] = float(valores[2])
    n_linha = n_linha + 1

arquivo.close()


""" Carrega correntes shunt """
Ish_arq = Ish_val + ".txt"
arquivo = open(Ish_arq,"r")

n_linha = 0

for linha in arquivo.readlines():

        n_linha = n_linha + 1
```

```
arquivo.close()

Ish = np.zeros([n_linha, 1], dtype=complex)

n_linha = 0
arquivo = open(Ish_arq,"r")

for linha in arquivo:
        valores = linha.split()
        Ish[(n_linha, 0)] = complex(valores[0])
        n_linha = n_linha + 1

arquivo.close()


""" Gera segmentos e subsegmentos do duto """
n_seg = len(coordenadas) - 1
segmentos = np.zeros([n_seg, 1])
div = 10
subsegmentos = np.zeros([1, 1])
subcoordenadas = np.zeros([1, 3])


for i in range(n_seg):
    segmentos[(i, 0)] = np.sqrt((coordenadas[(i + 1, 0)] - coordenadas[(i,
0)]) ** 2 + (coordenadas[(i + 1, 1)] - coordenadas[(i, 1)]) ** 2)
    x = coordenadas[(i + 1, 0)] - coordenadas[(i, 0)]
    y = coordenadas[(i + 1, 1)] - coordenadas[(i, 1)]
    tan = y / x
    ang = np.arctan(tan)


    if i == 0:
        if segmentos[(i, 0)] / div < 1:
            subsegmentos[(i, 0)] = segmentos[(i, 0)]
            subcoordenadas[(i)] = coordenadas[(i)]
        else:
            n_subseg = int(round(segmentos[(i, 0)] / div, 0))
            subsegmentos = np.zeros([n_subseg, 1])
            subcoordenadas = np.zeros([n_subseg, 3])
            for j in range(n_subseg):
                subsegmentos[(j, 0)] = segmentos[(i, 0)] / n_subseg
                if j == 0:
                    subcoordenadas[(i)] = coordenadas[(i)]
                else:
                    subcoordenadas[(j, 0)] = subcoordenadas[(j - 1, 0)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.cos(ang)
                    subcoordenadas[(j, 1)] = subcoordenadas[(j - 1, 1)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.sin(ang)
                    subcoordenadas[(j, 2)] = coordenadas[(i, 2)]
    else:
        if segmentos[(i, 0)] / div < 1:
            n_subseg = 1
            subsegmentos = np.concatenate((subsegmentos,
np.zeros([n_subseg, 1])))
            subsegmentos[(len(subsegmentos) - 1, 0)] = segmentos[(i, 0)]
            subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas,
np.zeros([n_subseg, 3])))
            subcoordenadas[(len(subcoordenadas) - 1)] = coordenadas[(i)]

        else:
```

```
            n_subseg = int(round(segmentos[(i, 0)] / div, 0))
            subsegmentos = np.concatenate((subsegmentos,
np.zeros([n_subseg, 1])))
            subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas,
np.zeros([n_subseg, 3])))
            for j in range(n_subseg):
                subsegmentos[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 0)] =
segmentos[(i, 0)] / n_subseg
                if j == 0:
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg)] =
coordenadas[(i)]
                else:
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 0)] =
subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j - 1, 0)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.cos(ang)
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 1)] =
subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j - 1, 1)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.sin(ang)
                    subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 2)] =
coordenadas[(i, 2)]

subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas, np.zeros([1, 3])))
subcoordenadas[(len(subcoordenadas) - 1)] = coordenadas[(i + 1)]

n_subseg = len(subsegmentos)


""" CALCULOS """
GPR_duto = np.zeros([n_subseg + 1, 1], dtype=complex)

for i in range(0, n_subseg + 1):

    for j in range(0, len(Ish)):
        if j * t1_vao <= (t1_n_vao + 1) * t1_vao:
           x0 = j * t1_vao
        else:
           x0 = j * t2_vao

        y0 = 0.0
        z0 = -1.0
        x = calc_dist(x0, subcoordenadas[(i, 0)], y0, subcoordenadas[(i,
1)], z0, subcoordenadas[(i, 2)])

        GPR_duto[(i, 0)] = GPR_duto[(i, 0)] + (r_solo * Ish[(j, 0)]) / (2 *
np.pi * x)


Vduto_mod = np.zeros([n_subseg + 1, 1])
distancia = np.zeros([n_subseg + 1, 1])


""" Grava resultados em arquivo """
grava_arq("IEEE_", nome_caso, n_subseg, distancia, Vduto_mod, GPR_duto,
subsegmentos)


""" Carrega resultados """
IEEE_distancia, IEEE_Vduto_mod = carrega_resul("IEEE_" + nome_caso +
"_cond_100ohm-m.txt", dist_mont)
```

```
""" Plotagem do graficos dos resultados """
plt.plot(IEEE_distancia, IEEE_Vduto_mod, '-', linewidth=2.0)
plt.xlabel('Progressiva do duto (km)', fontweight='bold', fontsize=16)
plt.ylabel('GPR do revestimento do duto (V)', fontweight='bold',
fontsize=16)
plt.legend(['IEEE Std 367-2012'], loc=1, fontsize=10)
ax = plt.axes()
progressiva = tkr.FuncFormatter(converte_x)
ax.xaxis.set_major_formatter(progressiva)
plt.grid()
plt.savefig("IEEE_" + nome_caso + "_cond_100ohm-m_Ish_ATP" + ".png")
plt.show()
```

A.3. Cálculo da tensão de passo

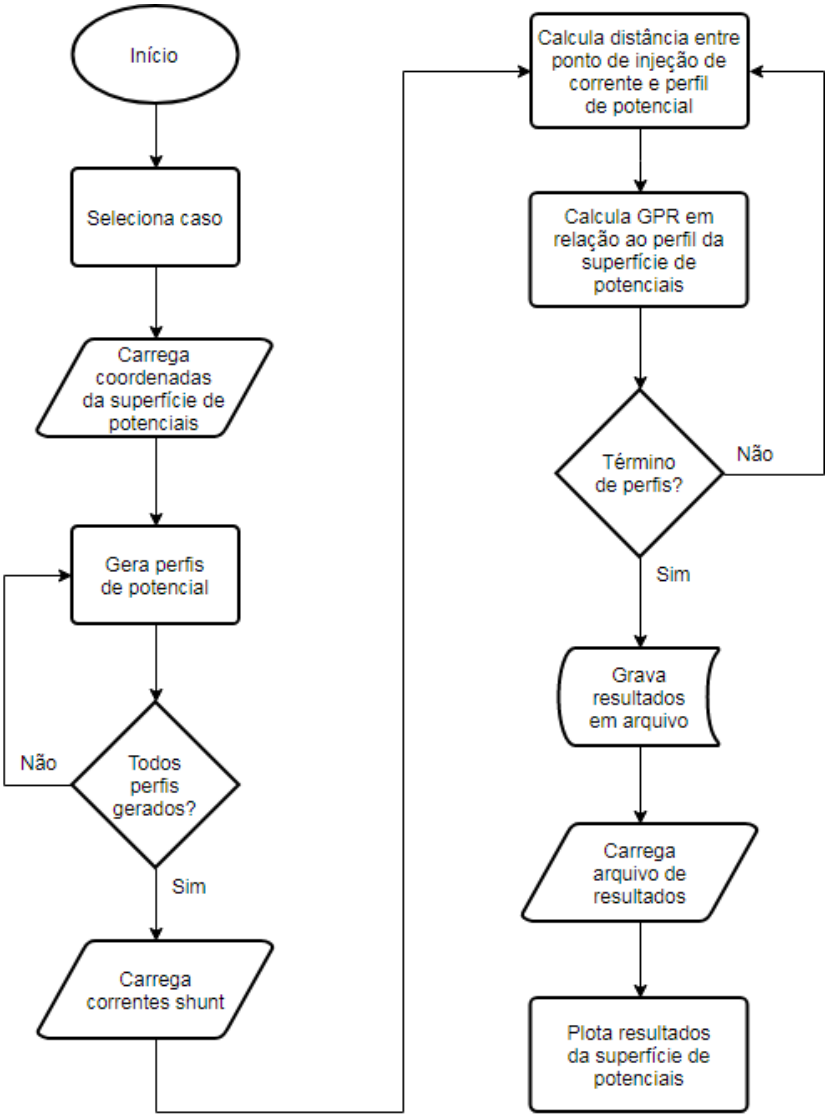

Figura 60: Fluxograma do programa para cálculo de tensão de passo.

```
""" Calculo da Tensao de Passo """

from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import numpy as np, matplotlib.pyplot as plt, matplotlib.ticker as tkr


""" Dados """

""" Terminal 1 """
t1_n_vao = 16
t1_vao = 200.0

""" Terminal 2 """
t2_n_vao = 34
t2_vao = 200.0

""" Superficie de potenciais """
n_perfis = 21
dist_perfis = 1.0
dist_pontos = 1


""" Funcao(oes) """

""" Calcula distancia """
def calc_dist(x0, x1, y0, y1, z0, z1):

    x = np.sqrt(((x1 - x0) ** 2) + ((y1 - y0) ** 2) + ((z1 - z0) ** 2))
    return x


""" Aproximacao entre duto e LT """
nome_caso = raw_input("Entre com o caso de aproximacao: ")
r_solo = float(input("Resistividade do solo: "))
Ish_val = raw_input("Correntes Ish: ")


""" Carrega coordenadas da superficie de potenciais """
caso_arq = nome_caso + ".txt"
arquivo = open(caso_arq,"r")

n_linha = 0

for linha in arquivo.readlines():

    n_linha = n_linha + 1

arquivo.close()

coordenadas = np.zeros([n_linha, 3])


n_linha = 0
arquivo = open(caso_arq,"r")

for linha in arquivo:
    valores = linha.split()
    coordenadas[(n_linha, 0)] = float(valores[0])
    coordenadas[(n_linha, 1)] = float(valores[1])
    coordenadas[(n_linha, 2)] = float(valores[2])
    n_linha = n_linha + 1
```

```
arquivo.close()


""" Gera segmentos e subsegmentos do duto """
n_seg = len(coordenadas) - 1
segmentos = np.zeros([n_seg, 1])
div = 1
subsegmentos = np.zeros([1, 1])
subcoordenadas = np.zeros([1, 3])


for p in range (n_perfis):

        for i in range(n_seg):

            segmentos[(i, 0)] = np.sqrt((coordenadas[(i + 1, 0)] -
coordenadas[(i, 0)]) ** 2 + (coordenadas[(i + 1, 1)] - coordenadas[(i, 1)])
** 2)
            x = coordenadas[(i + 1, 0)] - coordenadas[(i, 0)]
            y = coordenadas[(i + 1, 1)] - coordenadas[(i, 1)]
            tan = y / x
            ang = np.arctan(tan)

            if p == 0:
               coordenadas[(i, 0)] = coordenadas[(i, 0)]
               coordenadas[(i, 1)] = coordenadas[(i, 1)]
               coordenadas[(i + 1, 0)] = coordenadas[(i + 1, 0)]
               coordenadas[(i + 1, 1)] = coordenadas[(i + 1, 1)]
            else:
               coordenadas[(i, 0)] = coordenadas[(i, 0)] -
float(dist_perfis) * np.cos(ang + np.pi/2)
               coordenadas[(i, 1)] = coordenadas[(i, 1)] -
float(dist_perfis) * np.sin(ang + np.pi/2)
               coordenadas[(i + 1, 0)] = coordenadas[(i + 1, 0)] -
float(dist_perfis) * np.cos(ang + np.pi/2)
               coordenadas[(i + 1, 1)] = coordenadas[(i + 1, 1)] -
float(dist_perfis) * np.sin(ang + np.pi/2)

            if i == 0:
                if segmentos[(i, 0)] / div < 1:
                    subsegmentos[(i, 0)] = segmentos[(i, 0)]
                    subcoordenadas[(i)] = coordenadas[(i)]
                else:
                    n_subseg = int(round(segmentos[(i, 0)] / div, 0))
                    subsegmentos = np.zeros([n_subseg, 1])
                    subcoordenadas = np.zeros([n_subseg, 3])
                    for j in range(n_subseg):
                        subsegmentos[(j, 0)] = segmentos[(i, 0)] / n_subseg
                        if j == 0:
                            subcoordenadas[(i)] = coordenadas[(i)]
                        else:
                            subcoordenadas[(j, 0)] = subcoordenadas[(j - 1,
0)] + subsegmentos[(j, 0)] * np.cos(ang)
                            subcoordenadas[(j, 1)] = subcoordenadas[(j - 1,
1)] + subsegmentos[(j, 0)] * np.sin(ang)
                            subcoordenadas[(j, 2)] = coordenadas[(i, 2)]
            else:
                if segmentos[(i, 0)] / div < 1:
                    n_subseg = 1
```

```
                    subsegmentos = np.concatenate((subsegmentos,
np.zeros([n_subseg, 1])))
                    subsegmentos[(len(subsegmentos) - 1, 0)] =
segmentos[(i, 0)]
                    subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas,
np.zeros([n_subseg, 3])))
                    subcoordenadas[(len(subcoordenadas) - 1)] =
coordenadas[(i)]

                else:
                    n_subseg = int(round(segmentos[(i, 0)] / div, 0))
                    subsegmentos = np.concatenate((subsegmentos,
np.zeros([n_subseg, 1])))
                    subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas,
np.zeros([n_subseg, 3])))
                    for j in range(n_subseg):
                        subsegmentos[(len(subsegmentos) - n_subseg + j, 0)]
= segmentos[(i, 0)] / n_subseg
                        if j == 0:
                            subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg)]
= coordenadas[(i)]
                        else:
                            subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg +
j, 0)] = subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j - 1, 0)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.cos(ang)
                            subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg +
j, 1)] = subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg + j - 1, 1)] +
subsegmentos[(j, 0)] * np.sin(ang)
                            subcoordenadas[(len(subsegmentos) - n_subseg +
j, 2)] = coordenadas[(i, 2)]

        subcoordenadas = np.concatenate((subcoordenadas, np.zeros([1, 3])))
        subcoordenadas[(len(subcoordenadas) - 1)] = coordenadas[(i + 1)]

        n_subseg = len(subsegmentos)


        """ Carrega correntes shunt """
        Ish_arq = Ish_val + ".txt"
        arquivo = open(Ish_arq,"r")

        n_linha = 0

        for linha in arquivo.readlines():

                n_linha = n_linha + 1

        arquivo.close()

        Ish = np.zeros([n_linha, 1], dtype=complex)

        n_linha = 0
        arquivo = open(Ish_arq,"r")

        for linha in arquivo:
                valores = linha.split()
                Ish[(n_linha, 0)] = complex(valores[0])
                n_linha = n_linha + 1

        arquivo.close()
```

```
        """ CALCULOS """
        GPR = np.zeros([n_subseg + 1, 1], dtype=complex)

        if p == 0:
           distancia_x = np.zeros([(n_subseg + 1) * n_perfis, 1])
           distancia_y = np.zeros([(n_subseg + 1) * n_perfis, 1])
           Vpasso_mod = np.zeros([(n_subseg + 1) * n_perfis, 1])


        for i in range(0, n_subseg + 1):

            for j in range(0, len(Ish)):
                if j * t1_vao <= (t1_n_vao + 1) * t1_vao:
                   x0 = j * t1_vao
                else:
                   x0 = j * t2_vao

                if nome_caso == "CASO_01":
                        y0 = 0.0
                        z0 = -1.0
                        r1 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], x0,
subcoordenadas[(i, 1)], y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
                        passo = subcoordenadas[(i, 1)] + dist_perfis
                        r2 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], x0, passo,
y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)

                        GPR[(i, 0)] = GPR[(i, 0)] + (((r_solo * Ish[(j,
0)]) / (2 * np.pi * r1)) - ((r_solo * Ish[(j, 0)]) / (2 * np.pi * r2)))

                elif nome_caso == "CASO_02":
                        y0 = 0.0
                        z0 = -1.0
                        r1 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], x0,
subcoordenadas[(i, 1)], y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
                        passo = subcoordenadas[(i, 1)] + dist_perfis
                        r2 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], x0, passo,
y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)

                        """ cp1 """
                        y0 = 10.0
                        z0 = -0.5
                        r1 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 -
25.8579), subcoordenadas[(i, 1)], y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
                       passo = subcoordenadas[(i, 1)] + dist_perfis
                       r2 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 -
25.8579), passo, y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)

                        cp1 = ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi *
r1)) - ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi * r2))

                        """ cp2 """
                        y0 = -10.0
                        z0 = -0.5
                        r1 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 -
25.8579), subcoordenadas[(i, 1)], y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
                       passo = subcoordenadas[(i, 1)] + dist_perfis
                       r2 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 -
25.8579), passo, y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
```

```
                        cp2 = ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi *
r1)) - ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi * r2))

                        """ cp3 """
                        y0 = 10.0
                        z0 = -0.5
                        r1 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 +
25.8579), subcoordenadas[(i, 1)], y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
                        passo = subcoordenadas[(i, 1)] + dist_perfis
                        r2 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 +
25.8579), passo, y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)

                        cp3 = ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi *
r1)) - ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi * r2))

                        """ cp4 """
                        y0 = -10.0
                        z0 = -0.5
                        r1 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 +
25.8579), subcoordenadas[(i, 1)], y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)
                        passo = subcoordenadas[(i, 1)] + dist_perfis
                        r2 = calc_dist(subcoordenadas[(i, 0)], (x0 +
25.8579), passo, y0, subcoordenadas[(i, 2)], z0)

                        cp4 = ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi *
r1)) - ((r_solo * Ish[(j, 0)] / 4) / (2 * np.pi * r2))

                        GPR[(i, 0)] = GPR[(i, 0)] + cp1 + cp2 + cp3 + cp4

            distancia_x[(p * (n_subseg + 1) + i, 0)] = i
            distancia_y[(p * (n_subseg + 1) + i, 0)] = p
            Vpasso_mod[(p * (n_subseg + 1) + i, 0)] = np.absolute(GPR[(i,
0)])


""" Grava resultados em arquivo """
np.savetxt("Vpasso.txt", Vpasso_mod)

print('Maxima tensao de passo = %.4f' % (np.amax(Vpasso_mod)))

""" Plotagem do graficos dos resultados """
fig = plt.figure()
ax = fig.gca(projection = '3d')
ax.set_xlabel('Distancia a partir da origem da superficie de potenciais
(m)', fontweight='bold', fontsize=14, labelpad=20)
ax.set_ylabel('Distancia (m)', fontweight='bold', fontsize=14, labelpad=20)
ax.set_zlabel('Tensao de passo (V)', fontweight='bold', fontsize=14,
labelpad=20)
ax.set_xlim([0,100])
ax.set_ylim([0,20])
ax.scatter(distancia_x, distancia_y, Vpasso_mod, zdir = 'z', c = 'k',
color='green')
plt.tight_layout()
plt.show()
```

APÊNDICE B. CURTOS-CIRCUITOS MODELADOS NO ATPDRAW

B.1. Curto-circuito monofásico na T-17

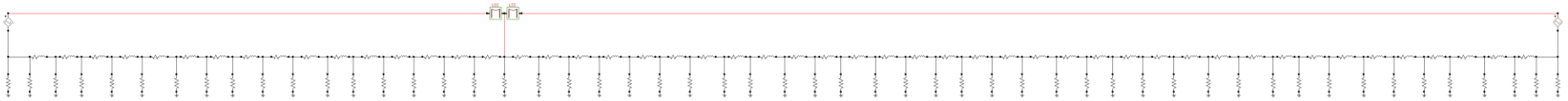

Figura 61: Curto-circuito monofásico na T-17.

B.2. Curto-circuito monofásico na T-37

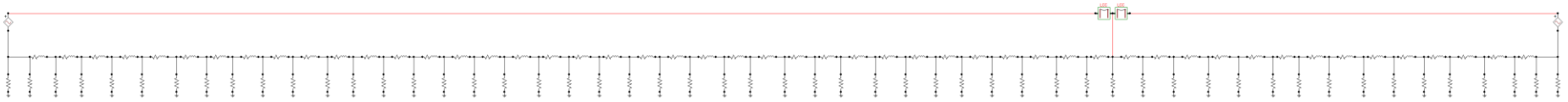

Figura 62: Curto-circuito monofásico na T-37.