

Implementação de um modelo para simulação de
interferências eletromagnéticas entre linhas de
transmissão e tubulações subterrâneas em solos
multicamadas utilizando o ATP

Gustavo Henrique de Sá Soares de Matos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Implementação de um modelo para simulação de interferências
eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações
subterrâneas em solos multicamadas utilizando o ATP

Gustavo Henrique de Sá Soares de Matos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO À BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, A SER UTILIZADO PELO AUTOR PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

APROVADA POR:

Prof. Kleber Melo e Silva, D.Sc. (ENE-UnB)
(Orientador)

Prof. Amauri Gutierrez Martins Britto, D.Sc. (ENE-UnB)
(Co-orientador)

Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, D.Sc. (ENE-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, D.Sc. (EE-UFPB)
(Examinador Externo)

Brasília/DF, maio de 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

GUSTAVO HENRIQUE DE SÁ SOARES DE MATOS

Implementação de um modelo para simulação de interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações subterrâneas em solos multicamadas utilizando o ATP. [Distrito Federal] 2021.

xxx, 61p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Trabalho de Conclusão de Curso, 2021).

Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica.

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1. ATP/EMTP | 2. Acoplamento indutivo |
| 3. Acoplamento condutivo | 4. Interferências eletromagnéticas |
| 5. Resistividade do solo | 6. Tubulações metálicas |
| 7. Solo multicamadas | 8. Linhas de transmissão |
| I. ENE/FT/UnB | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MATOS, G. H. (2021). Implementação de um modelo para simulação de interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações subterrâneas em solos multicamadas utilizando o ATP. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Henrique de Sá Soares de Matos

TÍTULO: Implementação de um modelo para simulação de interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão e tubulações subterrâneas em solos multicamadas utilizando o ATP.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste trabalho para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gustavo Henrique de Sá Soares de Matos

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

Faculdade de Tecnologia - FT

Departamento de Eng. Elétrica (ENE)

Brasília - DF CEP 70919-970

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar meus agradecimentos...

... ao meu orientador Amauri, pelo tempo e disposição que teve para me ajudar ao longo de todo o trabalho. Obrigado por ter sido paciente com a minha teimosia.

... à minha família que sempre me apoiou nos momentos mais desafiadores da minha vida. Um agradecimento especial à minha mãe que me apoiou emocionalmente durante os tempos de pandemia.

... à Dra. Candice que, além de cuidar da minha saúde, me deu conselhos que irei levar para vida toda.

... aos meus amigos que estiveram comigo desde a adolescência.

Obrigado a todos! Sempre serei grato.

RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma implementação de um modelo circuital, baseado na ferramenta computacional *Alternative Transients Program* (ATP), objetivando o estudo de interferências eletromagnéticas envolvendo linhas de transmissão e tubulações metálicas subterrâneas. A metodologia se destaca por calcular a tensão induzida em geometrias compostas por obliquidades e cruzamentos entre as instalações sob a influência de um solo estratificado, em qualquer disposição de condutores. O trabalho apresenta soluções a respeito dos acoplamentos indutivos e condutivos sob solo multicamadas, assim como as validações das implementações. Em seguida, estudos de casos simples são simulados utilizando a metodologia proposta com o objetivo de validação da mesma, e os resultados são analisados de acordo com normas técnicas. Por fim, a metodologia é testada em estudos de casos reais e os dados obtidos são analisados. A metodologia se mostra eficaz com erros menores que 8% em relação ao programa de referência, e pode ser utilizada para calcular tensões induzidas em tubulações metálicas subterrâneas.

Palavras-chave: acoplamento indutivo, acoplamento condutivo, ATP, impedâncias mútuas, interferências eletromagnéticas, linhas de transmissão, resistividade do solo, estratificação do solo, tubulações metálicas, tensões induzidas, faltas.

ABSTRACT

This work presents an implementation of a circuit model based on the Alternative Transients Program (ATP), intended for the study of electromagnetic interferences involving transmission lines and underground pipelines. The proposed implementation stands out for calculating the induced voltage in geometries composed by obliquities and intersections between pipelines and transmission lines under multilayered soil. The work presents solutions of inductive and conductive couplings under multilayered soil, as well as the validations of the implementations. Then, simple case studies are simulated using the proposed methodology for validation, and the results are analyzed according to technical standards. Finally, the methodology is tested in real case studies and the data obtained is analyzed. The methodology proves to be effective with errors of less than 8%, and can be used to calculate induced voltages in underground pipelines.

Keywords: inductive coupling, conductive coupling, ATP, mutual impedances, electromagnetic interferences, transmission lines, soil resistivity, soil stratification, underground pipes, induced voltages, fault.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| Sumário | i |
| Lista de figuras | iv |
| Lista de tabelas | vii |
| Lista de símbolos | ix |
| Glossário | xii |
| Capítulo 1 – Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos do trabalho | 2 |
| 1.2 Metodologia | 2 |
| 1.3 Contribuições | 4 |
| 1.4 Estrutura do trabalho | 4 |
| Capítulo 2 – Fundamentos teóricos | 6 |
| 2.1 Resistividade do solo | 6 |
| 2.1.1 Método Wenner | 6 |
| 2.1.2 Estratificação do solo | 7 |
| 2.2 Acoplamento indutivo | 8 |
| 2.2.1 Corrente no condutor fonte | 9 |
| 2.2.2 Impedância mútua de Carson | 9 |
| 2.2.3 Zona de interferência eletromagnética | 11 |
| 2.2.4 Distâncias equivalentes em paralelismos oblíquos e em cruzamentos | 11 |
| 2.2.4.1 Obliquidades | 12 |
| 2.2.4.2 Cruzamentos | 13 |
| 2.2.5 Modelo circuital clássico para representação do duto interferido | 14 |
| 2.3 Acoplamento capacitivo | 16 |
| 2.4 Acoplamento condutivo | 17 |
| 2.4.1 Modelo modificado do duto | 18 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.5 | Riscos associados aos acoplamentos | 19 |
| 2.5.1 | Tensão de toque | 19 |
| 2.5.2 | Danos no revestimento da tubulação metálica | 20 |
| 2.6 | Síntese do capítulo | 20 |
| Capítulo 3 – Estudo do acoplamento indutivo | | 21 |
| 3.1 | Modelo de impedância mútua para solo multicamadas | 21 |
| 3.2 | Validação da implementação da função | 23 |
| 3.3 | Desafios da implementação do modelo circuital no EMTP/ATP | 27 |
| 3.3.1 | Implementação da FEM no ATP | 27 |
| 3.3.2 | Tensão controlada série | 29 |
| 3.4 | Estudo de caso simples em regime permanente | 30 |
| 3.4.1 | Dados do sistema | 30 |
| 3.4.2 | Modelo no ATP | 32 |
| 3.4.3 | Parâmetros do solo | 32 |
| 3.4.4 | Resultados da simulação em regime permanente | 33 |
| 3.5 | Estudo de um caso real em regime permanente | 35 |
| 3.5.1 | Dados do sistema | 35 |
| 3.5.2 | Modelo no ATP | 37 |
| 3.5.3 | Resultados da simulação em regime permanente | 38 |
| 3.6 | Síntese do capítulo | 38 |
| Capítulo 4 – Estudo do acoplamento condutivo | | 40 |
| 4.1 | A função de Green para solo multicamadas | 40 |
| 4.2 | Validação da implementação da função de Green proposta | 44 |
| 4.3 | Desafios da implementação do modelo modificado de tubulação subterrânea | 45 |
| 4.3.1 | Quantidade de caracteres no cartão ATP | 45 |
| 4.4 | Estudo de caso simples em situação de falta | 47 |
| 4.4.1 | Dados do sistema | 47 |
| 4.4.2 | Modelo no ATP | 49 |
| 4.4.3 | Resultados da simulação em situação de falta | 50 |
| 4.5 | Estudo de Caso real em situação de falta | 52 |
| 4.5.1 | Modelo no ATP | 54 |
| 4.5.2 | Resultados da simulação em situação de falta | 55 |
| 4.6 | Síntese do capítulo | 58 |
| Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros | | 59 |

Referências

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Fluxograma da implementação proposta no ATP. | 3 |
| 2.1 | Método de Wenner para medir resistência aparente. | 7 |
| 2.2 | Modelo de solo estratificado com N camadas. | 8 |
| 2.3 | Dois condutores aéreos em um solo uniforme. | 10 |
| 2.4 | Zona de interferência eletromagnética. | 11 |
| 2.5 | Exemplo de obliquidade. | 12 |
| 2.6 | Aproximação oblíqua entre LT e tubulação. | 13 |
| 2.7 | Exemplos de cruzamento em que o acoplamento é considerado ou não considerado. | 13 |
| 2.8 | Cruzamento entre LT e tubulação. | 14 |
| 2.9 | Circuito equivalente de uma tubulação alvo | 15 |
| 2.10 | Seção transversal de uma tubulação com raio interno r_{int} , raio externo r_{ext} com um revestimento de espessura δ_{rev} | 15 |
| 2.11 | Elevação de potencial do ponto P sob influência de corrente no ponto O localizado na superfície. | 18 |
| 2.12 | Modelagem circuital para o acoplamento condutivo. | 18 |
| 3.1 | Dois condutores subterrâneos em um solo com N camadas. | 22 |
| 3.2 | Solo de três camadas com condutores em diferentes configurações. | 24 |
| 3.3 | Impedância versus frequência, modelos de Tsiamitros e FEMM. | 26 |
| 3.4 | Implementação circuital de multiplicação fasorial da corrente com a impedância mútua: primeira proposta. | 27 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.5 | Implementação circuital de multiplicação fasorial da corrente com a impedância mútua: segunda proposta. | 28 |
| 3.6 | Implementação circuital de multiplicação fasorial da corrente com a impedância mútua: proposta final. | 28 |
| 3.7 | Fonte de tensão controlada por corrente. | 29 |
| 3.8 | Implementação de fonte de tensão não aterrada com transformador ideal. | 29 |
| 3.9 | Vista superior do caso simples em regime permanente. | 30 |
| 3.10 | Seção transversal da torre do estudo de caso simples em regime permanente. | 31 |
| 3.11 | Representação do modelo no ATPdraw do estudo de caso simples em regime permanente. | 32 |
| 3.12 | Tensão induzida na tubulação enterrada sem aterramento. | 34 |
| 3.13 | Tensão induzida na tubulação subterrânea com e sem aterramento. | 34 |
| 3.14 | Vista superior do caso real em regime permanente. | 35 |
| 3.15 | Seção transversal da torre do caso real em regime permanente. | 36 |
| 3.16 | Representação do modelo no ATPdraw do caso real em regime permanente. | 37 |
| 3.17 | Tensão induzida na tubulação subterrânea com aterramento no caso real em regime permanente. | 38 |
| 4.1 | Dois pontos em um solo estratificado em que O é o ponto fonte e P é o ponto de observação. | 41 |
| 4.2 | Magnitude e ângulo da varredura em frequência dos pontos $O = [0 \ 0 \ 0,5]$ e $P = [0 \ 0 \ 13]$ | 44 |
| 4.3 | Perfil de distância variando o eixo z | 45 |
| 4.4 | Solução para limitação de caracteres do cartão ATP utilizando transformadores. | 46 |
| 4.5 | Seção transversal da torre do estudo de caso simples em situação de falta. | 47 |
| 4.6 | Vista superior do estudo de caso simples em situação de falta. | 48 |
| 4.7 | Modelagem do sistema no ATPDraw do caso simples em situação de falta. | 49 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.8 | Tensões induzidas na tubulação para falta na torre 16. | 50 |
| 4.9 | Correntes em cada torre do estudo de caso simples em situação de falta. | 51 |
| 4.10 | Figura representativa das distribuições de correntes. | 52 |
| 4.11 | Diagrama unifilar do sistema de potência real. | 52 |
| 4.12 | Vista superior do caso real em situação de falta. | 53 |
| 4.13 | Seção transversal da torre do estudo de caso real em situação de falta. | 53 |
| 4.14 | Modelo no ATPDraw do estudo de caso real em situação de falta. | 55 |
| 4.15 | Tensões induzidas na tubulação para falta na torre sete. | 56 |
| 4.16 | Erro relativo do potencial no duto. | 57 |
| 4.17 | Correntes em cada torre no estudo de caso real em situação de falta. | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------|---|----|
| 3.1 | Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o <i>software</i> FEMM, para frequência 60 Hz. | 25 |
| 3.2 | Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o <i>software</i> FEMM, para frequência 1 kHz. | 25 |
| 3.3 | Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o <i>software</i> FEMM, para frequência 10 kHz. | 25 |
| 3.4 | Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o <i>software</i> FEMM, para frequência 100 kHz. | 25 |
| 3.5 | Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o <i>software</i> FEMM, para frequência 1 MHz. | 26 |
| 3.6 | Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso simples em regime permanente. | 31 |
| 3.7 | Parâmetros do duto para o caso simples em regime permanente. | 31 |
| 3.8 | Valores de resistividade aparente para o estudo de caso simples em regime permanente. | 33 |
| 3.9 | Parâmetros do solo em três camadas para o estudo de caso em regime permanente. | 33 |
| 3.10 | Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso real em regime permanente. | 36 |
| 3.11 | Parâmetros do duto para o estudo de caso real em regime permanente. | 37 |
| 3.12 | Parâmetros do solo para o estudo de caso real em regime permanente. | 37 |
| 4.1 | Parâmetros do solo para validação da função de Green implementada. | 44 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.2 | Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso simples em situação de falta. | 48 |
| 4.3 | Parâmetros do duto para o estudo de caso simples em situação de falta. | 48 |
| 4.4 | Parâmetros do solo para o estudo de caso simples em situação de falta. | 49 |
| 4.5 | Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso real em situação de falta. | 54 |
| 4.6 | Parâmetros do duto para o estudo de caso real em situação de falta. | 54 |
| 4.7 | Parâmetros do solo para o estudo de caso real em situação de falta. | 54 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|------------------|--|----------------|
| ρ | Resistividade elétrica do solo | [$\Omega.m$] |
| ρ_0 | Resistividade elétrica do cobre recozido ($\approx 1,72 \times 10^{-8}$) | [$\Omega.m$] |
| ρ_{rev} | Resistividade elétrica do revestimento | [$\Omega.m$] |
| ρ_a^m | Resistividade aparente medida | [$\Omega.m$] |
| ϵ | Permissividade elétrica | [F/m] |
| ϵ_0 | Permissividade elétrica do vácuo ($\approx 8,8542 \times 10^{-12}$) | [F/m] |
| ϵ_r | Permissividade elétrica relativa | [p.u.] |
| ϵ_{rev} | Permissividade elétrica relativa do revestimento | [adimensional] |
| μ_0 | Permeabilidade magnética do espaço livre ($= 4\pi \times 10^{-7}$) | [H/m] |
| ω | Frequência angular | [rad/s] |
| δ_{rev} | Espessura da camada isolante do revestimento | [m] |
| d^{eq} | Distância equivalente | [m] |
| d_{zi} | Distância da zona de interferência | [m] |
| a_1 | Afastamento em relação ao eixo do circuito fonte | [m] |
| a_2 | Afastamento em relação ao eixo do circuito fonte | [m] |
| R_a | Resistência aparente | [Ω] |
| I_{AB} | Corrente de teste no método de Wenner | [A] |
| V_{CD} | Tensão medida no método de Wenner | [A] |
| a | Espaçamento do eletrodo no Método de Wenner | [m] |

| | | |
|-------------|--|----------------|
| c | Profundidade do eletrodo no Método de Wenner | [m] |
| E | Força eletromotriz | [V] |
| Z_{ij} | Impedância mútua entre os condutores i e j | [Ω/m] |
| Z_{ii} | Impedância própria do conduto i | [Ω/m] |
| $D_{i,j}$ | Distância do condutor i do condutor j | [m] |
| $D'_{i,j}$ | Distância do condutor i da imagem do condutor j | [m] |
| H | Diferença das alturas dos condutores em relação ao solo | [m] |
| Zd | Impedância do segmento | [Ω/m] |
| $Z_{d,int}$ | Impedância interna da tubulação | [Ω/m] |
| $Z_{d,ext}$ | Impedância externa da tubulação | [Ω/m] |
| Y_S | Admitância shunt do revestimento | [Sm] |
| ρ_c | Resistividade do revestimento | [Ωm] |
| δ_c | Espessura do revestimento | [Ωm] |
| ρ_d | Resistividade elétrica do metal | [Ωm] |
| r_{ext} | Raio externo | [m] |
| r_{int} | Raio interno | [m] |
| r_{ef} | Raio efetivo | [m] |
| P_{ij} | Coefficiente de potencial de Maxwell entre os condutores i e j | [m/F] |
| P_{ii} | Coefficientes próprios de potencial de Maxwell entre os condutores i e j | [m/F] |
| U_s | Elevação de potencial do solo | [V] |
| O_j | Coordenadas (x,y,z) do ponto fonte | [m] |
| P_i | Coordenadas (x,y,z) do ponto de observação | [m] |
| h_1 | A altura relativa à interface superior da m | [m] |
| h_2 | A altura relativa à interface superior da l | [m] |
| y_{ij} | A distância horizontal entre os condutores i e j | [m] |

| | | |
|--------------------|--|----------------|
| d_i | Espessura da camada i | [m] |
| $\tilde{\gamma}_i$ | Constante de propagação da camada i | [m^{-1}] |
| E_{rel} | Erro Relativo | [p.u] |
| E_{RMS} | Erro RMS | [p.u] |
| E_{RMSN} | Erro RMS Normalizado | [p.u] |
| H_i | Profundidade relativa à superfície do solo | [m] |
| δ_{ki} | Delta de Kronecker | [adimensional] |
| $\hat{G}_{k,i}$ | Função de Green | [Ω] |
| \hat{J}_0 | Função de Bessel de ordem 0 | [adimensional] |

GLOSSÁRIO

| | |
|-------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ATP | Alternative Transients Program |
| CDEGS | Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis |
| EMTP | Electromagnetic Transients Program |
| FEM | Força eletromotriz |
| FEMM | Finite Element Method Magnetics |
| LCC | Line/Cable Constants |
| LT | Linha de transmissão |
| NBR | Norma Técnica brasileira |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| TACS | Transient Analysis of Control Systems |

INTRODUÇÃO

O fenômeno das interferências eletromagnéticas entre linhas de transmissão (LTs) de alta tensão e outras estruturas metálicas, particularmente as tubulações utilizadas em transporte dutoviário, já vem sendo abordado na literatura por diversos pesquisadores, inclusive em estudos recentes (MARTINS-BRITTO, 2020; QI *et al.*, 2013; CHRISTOFORIDIS *et al.*, 2003; CIGRÉ WG-36.02, 1995) e oferece desafios a serem superados.

Com a crescente expansão do setor elétrico e da malha dutoviária, juntamente com as restrições de espaço decorrentes de normas ambientais, o compartilhamento de faixas de servidão tem se tornado cada vez mais frequente. Além disso, a crescente demanda de energia elétrica tem aumentado os níveis de carregamento em LTs de alta tensão.

Uma tubulação metálica em uma faixa de servidão compartilhada está sujeita a diversos tipos de interferência, tais como: acoplamento indutivo e capacitivo em regime permanente, e acoplamento condutivo em regime transitório. Tais interferências são funções da estrutura e resistividade do solo, geometria, corrente na LT e revestimento da tubulação, dentre outros. A tensão induzida em decorrência desses acoplamentos, levanta preocupações a respeito dos riscos de segurança a pessoas e aos possíveis danos à estrutura metálica da tubulação.

O assunto é de grande interesse prático para indústrias porque são sistemas críticos, exigem disponibilidade constante e possuem um alto custo de construção. Tanto a LT quanto a tubulação sofrem interferências que podem prejudicar o respectivo funcionamento das estruturas. Portanto, existe uma grande preocupação com os efeitos negativos que podem surgir em consequência da interação eletromagnética entre as instalações envolvidas.

Uma das principais complexidades inerentes a esses sistemas é a grande influência solo na determinação das tensões induzidas. É uma prática muito comum considerar o solo como uma estrutura uniforme (IEEE, 2000), contudo isso não corresponde à maior parte dos casos práticos. Estudos na literatura reportam que um modelo de solo complexo estratificado é mais adequado

em estudos de fenômenos envolvendo acoplamentos indutivo e condutivo. (MARTINS-BRITTO *et al.*, 2020; DAS *et al.*, 2014; TSIAMITROS *et al.*,).

Vários modelos matemáticos foram propostos para calcular os acoplamentos em solos complexos, com destaque para Martins-Britto *et al.* (2020), Tsiamitros *et al.* (2008), Nakagawa *et al.* (1973) para o acoplamento indutivo, e Martins-Britto (2020), He *et al.* (2013), Li *et al.* (2007) para o acoplamento condutivo. Tais contribuições permitem cálculos mais condizentes com a realidade, e vem sendo sistematicamente aplicados em estudos de parâmetros de linha e aterramento elétrico.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho é implementar um novo modelo circuital para estudos de acoplamentos indutivo e condutivo, que abrange estruturas de solo mais realistas, com foco em tubulações subterrâneas. O programa utilizado é o *Alternative Transients Program* (ATP), é amplamente utilizado e reconhecido no meio científico. O modelo proposto visa simular interferências eletromagnéticas entre LTs e tubulações subterrâneas em situações de geometrias complexas, compostas de obliquidades e cruzamentos entre as instalações.

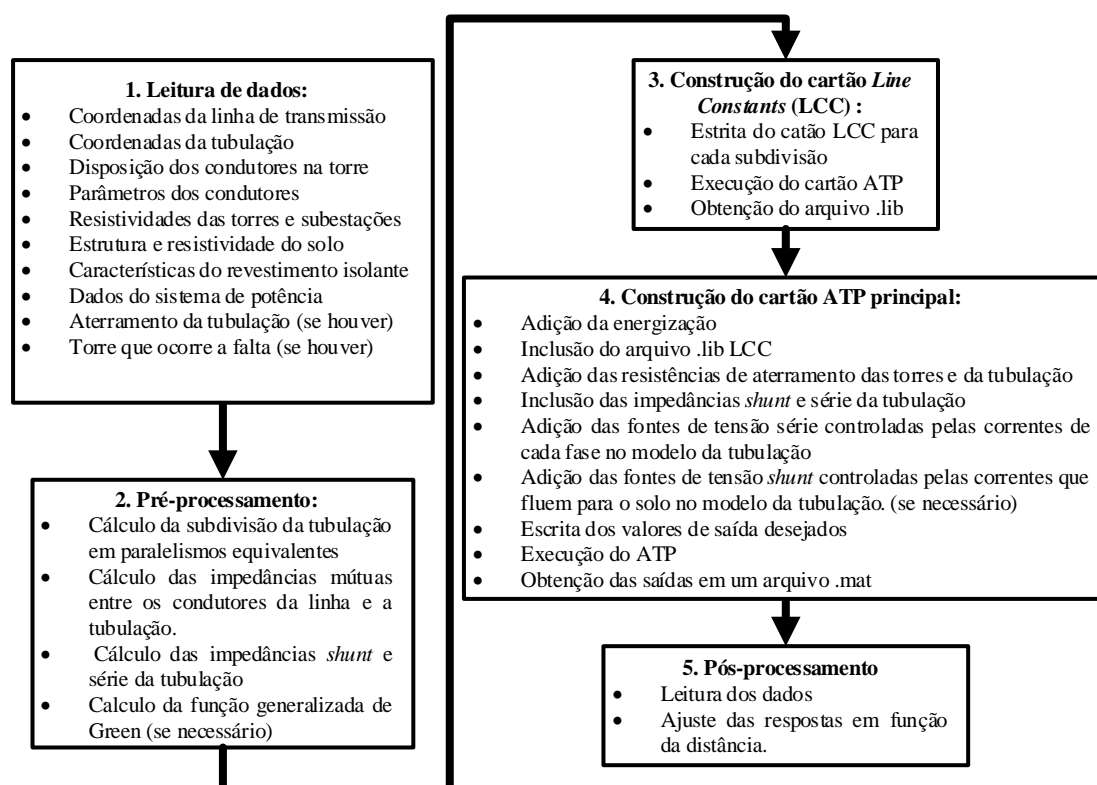
Os códigos desenvolvidos são utilizados para realizar análises de casos reais de interferências, baseados em medições de resistividade elétrica efetivamente executadas em campo e que resultam em modelos de solo multicamadas, inclusive riscos de segurança e de possíveis danos a tubulação.

1.2 METODOLOGIA

Por ser um programa de uso gratuito e ser amplamente reconhecido em estudos transitórios de sistemas elétricos, a implementação implemento foi baseada na escrita direta dos cartões de entrada ATP, por meio de rotinas computacionais desenvolvidas para este fim. Uma linguagem de programação compatível com o *software* GNU/Octave, foi utilizada para escrever os cartões ATP e resolver as equações de acoplamento indutivo e condutivo que serão apresentadas no trabalho. A Figura 1.1 ilustra o passo a passo de implementação da proposta.

O fluxo de execução da implementação consiste em um pré-processamento dos dados de entrada como: parâmetros da tubulação, resistividade do solo, dados do revestimento, geometria do sistema, dentre outros. A partir dos dados de entrada, é construído um cartão ATP contendo a descrição do circuito equivalente do caso de interferência, o que se faz programaticamente e sem necessidade de operação do usuário e por fim os dados são extraídos para análise.

Figura 1.1: Fluxograma da implementação proposta no ATP.



Fonte: Autoria própria.

As validações das equações de impedância mútuas utilizada no trabalho foram realizadas utilizando o programa FEMM (Finite Element Method Magnetic) como referência, e as validações das implementações de tensão induzida na tubulação e da função de Green foram realizadas utilizando o programa CDEGS (Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis). O trabalho de autoria de Dawalibi & Donoso (1993) apresenta imagens e exemplos da interface do programa CDEGS.

O código fonte de todas as funções desenvolvidas e o código da implementação do modelo de interferência, assim como os arquivos ATP correspondentes aos modelos simulados no transcurso deste trabalho, são integralmente disponibilizados por meio do seguinte repositório virtual:

(MARTINS-BRITTO, 2021).

1.3 CONTRIBUIÇÕES

Como principais contribuições deste trabalho, destacam-se:

- Utilização do ATP que é referência em estudos de transitórios e disponibilizado gratuitamente em oposição aos *softwares* profissionais que se utilizam na área que tem custos de aquisição altos.
- Uma implementação circuital no ATP utilizando uma solução generalizada para impedâncias próprias e mútuas em solos estratificados, com precisão aprimorada no cálculo de tensões induzidas provocadas pelo acoplamento indutivo.
- Uma implementação circuital no ATP utilizando a função de Green generalizada para solos estratificados para determinar a elevação de potencial do solo ao longo da tubulação afetada, ocasionada pelo acoplamento condutivo em caso de falta na LT.
- Estudos de casos reais dos fenômenos do acoplamento indutivo e condutivo entre LTs e tubulações subterrâneas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo expõe o contexto, a relevância e os objetivos que serão abordados neste trabalho.

O **Capítulo 2** expõe os fundamentos teóricos fundamentais e clássicos necessário para o estudo de tensões induzidas nas tubulações: acoplamentos indutivo, capacitivo e condutivo em solo uniforme, bem como a construção do circuito equivalente pelo método das fontes distribuídas (CIGRÉ WG-36.02, 1995). Aborda os principais riscos para a segurança de pessoas e de danos à estrutura metálica da tubulação.

O **Capítulo 3** descreve um método mais realista para cálculo de impedâncias próprias e mútuas em solos estratificados, bem como os desafios encontrados na implementação do modelo de acoplamento condutivo no *software* ATP. Demonstra que podem ocorrer erros maiores que

20% quando um solo real estratificado é representado por um modelo uniforme e apresenta um estudo de caso de um cruzamento simples e o de uma situação real.

O **Capítulo 4** apresenta a função de Green generalizada para solos estratificados para simular o acoplamento condutivo em solo multicamadas. Assim como no capítulo anterior, descrevem-se os desafios na implementação do acoplamento condutivo no ATP e são propostas soluções. Apresenta, também, um estudo de caso de cruzamento simples e um estudo de caso real.

O **Capítulo 5** apresenta considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo descreve os principais tópicos relevantes para o entendimento dos fenômenos de interferência eletromagnética e expõe as equações e métodos clássicos utilizando um modelo de solo uniforme. Nos capítulos subsequentes, pretende-se apresentar soluções mais complexas utilizando um modelo de solo estratificado.

2.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

O solo real é uma estrutura complexa, podendo ser composto de fases líquidas, sólidas e gasosas, cuja análise é importante em diversos contextos envolvendo instalações elétricas. O modelo de solo uniforme é o modelo mais simples e muito utilizado (IEEE, 2000), porém não descreve completamente a complexidade que ele realisticamente possui (ELKATEB *et al.*, 2003; MUALEM, 1984). A estratificação em camadas com resistividades diferentes é um modelo mais apropriado por ser a situação mais frequentemente encontrada em aplicações práticas (HE *et al.*, 2013; WHELAN *et al.*, 2010).

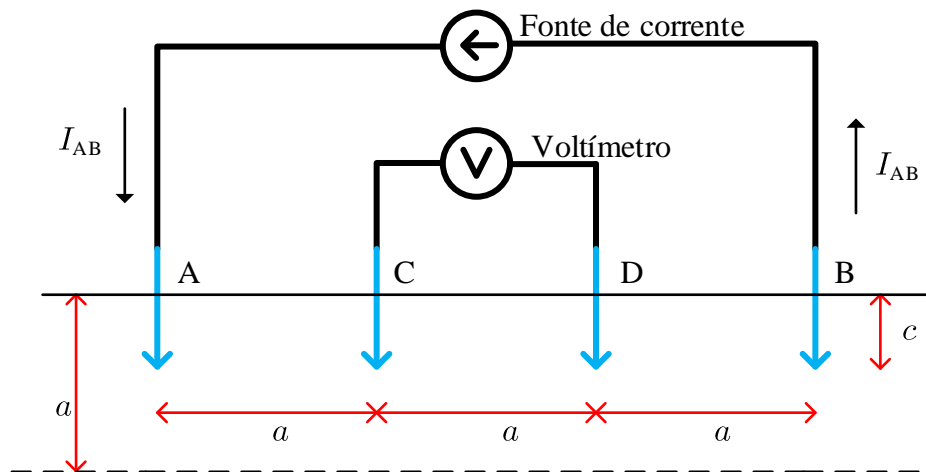
A resistividade do solo é um fator de grande influência nos projetos de aterramento elétrico e proteção contra descargas atmosféricas. Nos casos de interferência, a resistividade do solo é um dos principais parâmetros determinantes em acoplamentos indutivo e condutivo em sistemas interferidos por LTs.

2.1.1 Método Wenner

A configuração Wenner é um método para medição da resistividade aparente do solo e é composta por quatro eletrodos igualmente distanciados como ilustrado na Figura 2.1. Uma corrente I_{AB} é injetada no solo, o que resulta em uma tensão entre os eletrodos C e D . Uma re-

sistência aparente pode ser calculada por $R_a = \frac{V_{CD}}{I_{AB}}$, equivalente ao caminho elétrico percorrido pela corrente (WENNER, 1915).

Figura 2.1: Método de Wenner para medir resistência aparente.



Fonte: Autoria própria.

A resistividade aparente, definida em (2.1) é um parâmetro calculado a partir da resistência aparente, e corresponde à resistividade elétrica, vista à partir da superfície, no caminho elétrico situado à uma profundidade a :

$$\rho_a^m = \frac{4\pi a R_a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4c^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + c^2}}}, \quad (2.1)$$

em que ρ_a^m é a resistividade aparente medida, expressa em $\Omega \cdot \text{m}$, na profundidade a , dada em metros. O termo c , indicado na Figura 2.1, corresponde à profundidade de instalação do eletrodo de teste, em metros. O termo R_a é a resistência aparente medida, em Ω .

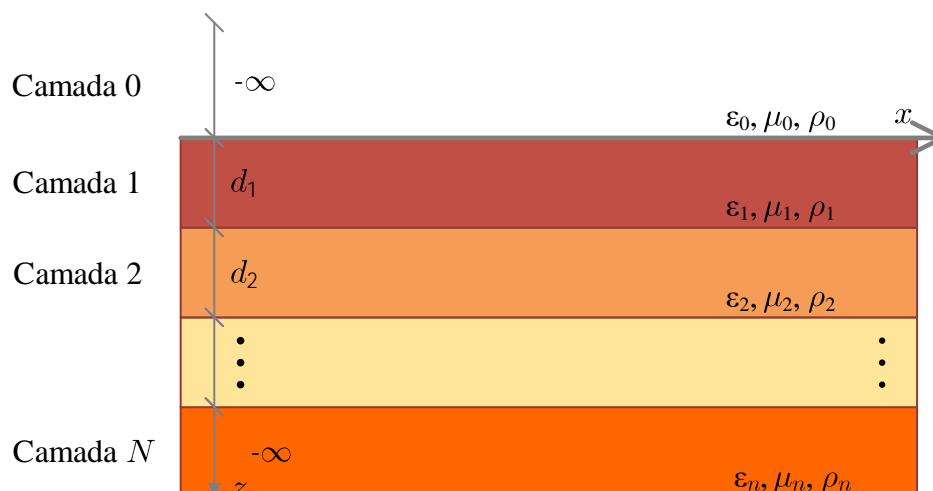
É necessário coletar várias amostras para ter um perfil de resistividade do solo. A norma da ABNT, NBR 7117 (ABNT, 2012), recomenda que sejam realizados, no mínimo, dois ensaios perpendiculares ao longo de eixos de medição distintos, em intervalos regulares, até a profundidade máxima correspondente à maior dimensão a ser ocupada pelo sistema de aterramento.

2.1.2 Estratificação do solo

A modelagem do solo estratificado a partir das resistividades aparentes é complexa e requer bom entendimento da teoria relacionada, podendo-se citar os trabalhos de Zhang *et al.* (2005)

e Takahashi & Kawase (1990). A Figura 2.2 ilustra um solo estratificado com N camadas com suas respectivas resistividades e espessuras.

Figura 2.2: Modelo de solo estratificado com N camadas.



Fonte: Autoria própria.

Como o objetivo deste trabalho é analisar os efeitos de um solo estratificado nos mecanismos de acoplamento eletromagnético e não como o modelo é obtido, os valores de solo estratificado serão considerados como premissa de projeto, omitindo-se maiores detalhes a respeito.

2.2 ACOPLAMENTO INDUTIVO

Acoplamento indutivo se refere a um arranjo de dois condutores em que variações na corrente no primeiro, provocam o surgimento de tensões no outro, em razão da variação temporal do fluxo magnético concatenado. A maneira mais comum de se utilizar o acoplamento indutivo é utilizando bobinas em diversas aplicações como: transformadores, máquinas elétricas, indutores e eletroímãs. Assim como é um fenômeno útil, ele pode ser um fenômeno indesejável em sistemas acoplados à LTs, induzindo uma tensão no sistema acoplado que pode causar riscos de segurança. Esse fenômeno, chamado de interferência eletromagnética, pode acontecer quando há um paralelismo entre dois condutores, induzindo uma força eletromotriz (FEM) indevida no sistema interferido. A construção afetada pela LT é normalmente referida como alvo e está sujeita a interferências eletromagnéticas do condutor fonte.

Diversas variáveis influenciam na intensidade da interferência eletromagnética e elas depen-

dem de (CIGRÉ WG-36.02, 1995):

- **Corrente no condutor fonte:** Em regime harmônico a FEM depende das correntes de fase. Durante uma falta fase-terra a amplitude da FEM pode ser muito maior do que em situações normais mas sua duração é muito pequena.
- **Distância entre os dois condutores:** A FEM induzida diminui com o aumento da distância entre os condutores dispostos paralelamente.
- **Resistividade do solo:** A resistividade do solo é determinante para os cálculos de impedância mútua, e conseqüentemente, influencia na FEM induzida na tubulação.
- **Comprimento da zona de interferência:** A zona de interferência corresponde à região em que a interferência eletromagnética é significativa. Quanto maior o comprimento da região exposta, maiores os níveis de tensão resultantes.
- **Características dos condutores:** Os efeitos da interferência podem ser diferentes quando os condutores são subterrâneos ou aéreos, providos de revestimento isolante ou não.

2.2.1 Corrente no condutor fonte

A corrente é o principal fator que influencia a tensão induzida no condutor alvo. A representação mais comum deste fenômeno em um regime harmônico é sob a forma de uma impedância mútua multiplicada pela corrente no condutor fonte:

$$E = Z_m \times I, \quad (2.2)$$

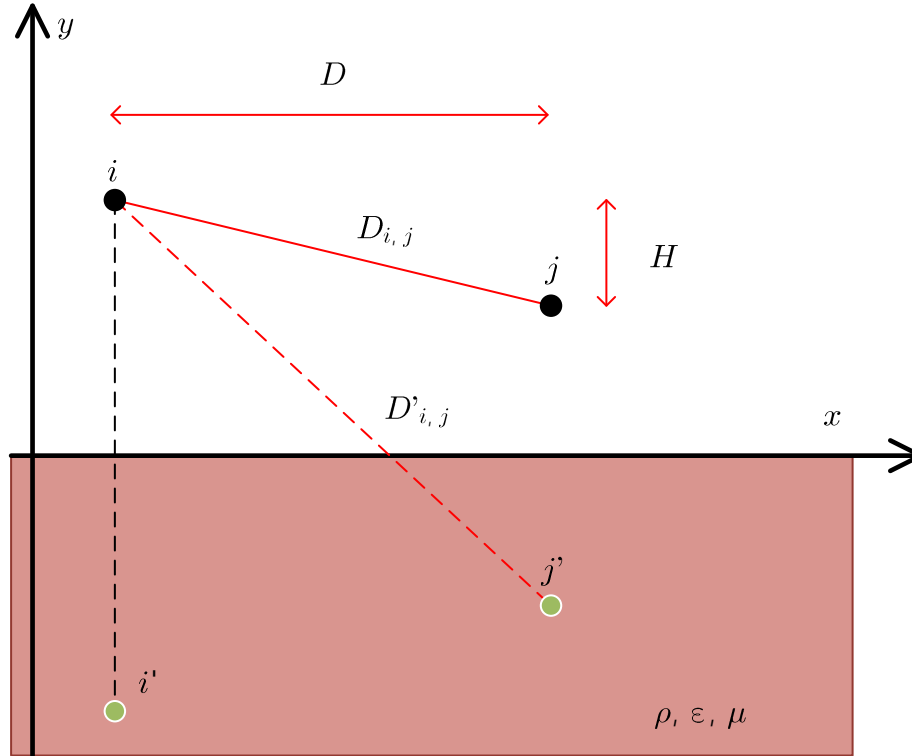
em que Z_m é a impedância mútua, dada em Ω/m ; I é a corrente no condutor fonte, em ampères; e E é a FEM no condutor alvo, expressa em V/m.

2.2.2 Impedância mútua de Carson

Carson (1926) propõe uma solução para impedância mútua com retorno de corrente pelo solo. A Figura 2.3 mostra dois condutores aéreos i e j em um solo uniforme com parâmetros ρ ,

ϵ e μ , em que ρ é a resistividade, ϵ é a permissividade elétrica e μ é a permeabilidade magnética.

Figura 2.3: Dois condutores aéreos em um solo uniforme.



Fonte: Autoria própria.

A equação (2.3) descreve a solução de Carson para a impedância mútua entre os condutores i e j , em Ω/m :

$$Z_{i,j} = Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D'_{i,j}}{D_{i,j}}\right) + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{2e^{-H\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\frac{\omega\mu_0}{\rho} - \omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}} \cos(\lambda D) d\lambda, \quad (2.3)$$

em que $D_{i,j}$ é a distância do condutor i do condutor j e $D'_{i,j}$ é a distância do condutor i à imagem do condutor j , dadas em metros; D é o afastamento entre os condutores, em metros; H é a diferença das alturas dos condutores em relação ao solo, em metros; $\epsilon_0 \approx 8.85 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade elétrica do espaço livre; ϵ_r é a permissividade elétrica relativa do solo; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética no vácuo; ρ é a resistividade do solo, em $\Omega\cdot\text{m}$; e ω é a frequência, em rad/s.

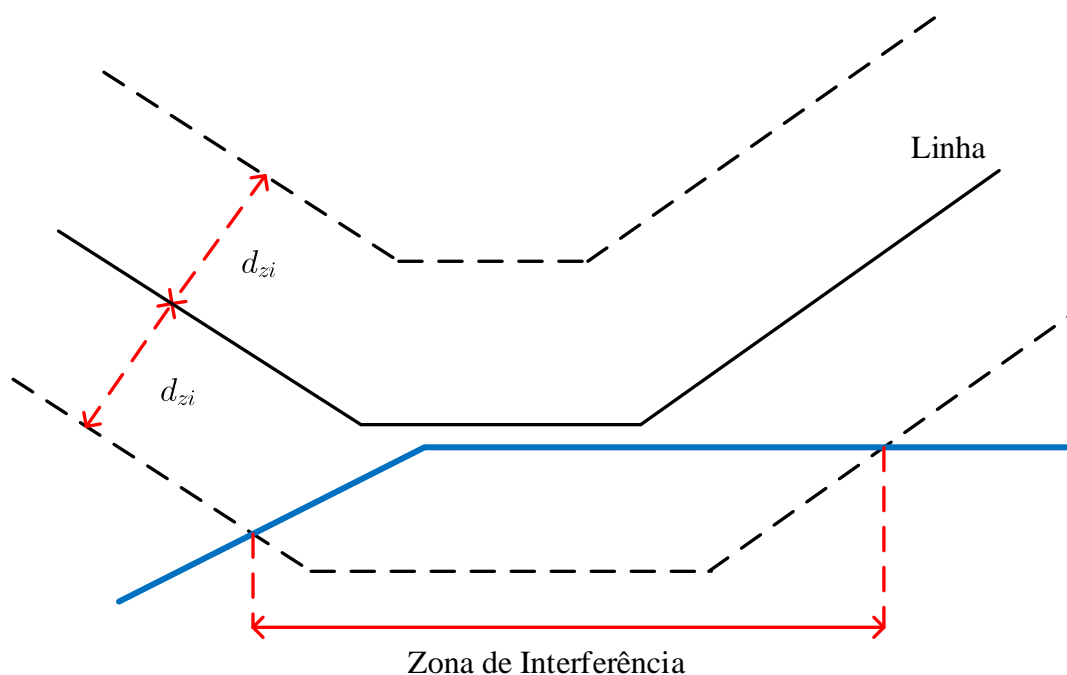
O primeiro termo representa a impedância mútua devido ao retorno de corrente pelo solo de condutividade infinita. O segundo termo, comumente chamado de integral de Carson, representa os efeitos do solo com resistividade finita e considera as perdas causadas pelo solo.

A integral de Carson já foi estudada inúmeras vezes, tendo sido propostas diversas técnicas numéricas e analíticas, para simplificar a integral de difícil resolução (International Telecommunication Union, 1989; DÉRI; TEVAN, 1981). O ATP adota uma técnica conhecida como série de potências adaptativa que foi proposta pelo próprio Carson (DOMMEL, 1996).

2.2.3 Zona de interferência eletromagnética

A zona de interferência eletromagnética é a zona em que a influência da LT é significativa na tubulação. Segundo CIGRÉ WG-36.02 (1995), a influência é considerada significativa quando a FEM induzida devido a uma corrente de falta é maior que 10 V/km para cada 1 kA de corrente de falta. A distância da zona de interferência pode ser aproximada pela expressão $d_{zi} = 200\sqrt{\rho}$, em que ρ é a resistividade do solo, em Ωm e d_{zi} é a zona de interferência, em metros.

Figura 2.4: Zona de interferência eletromagnética.



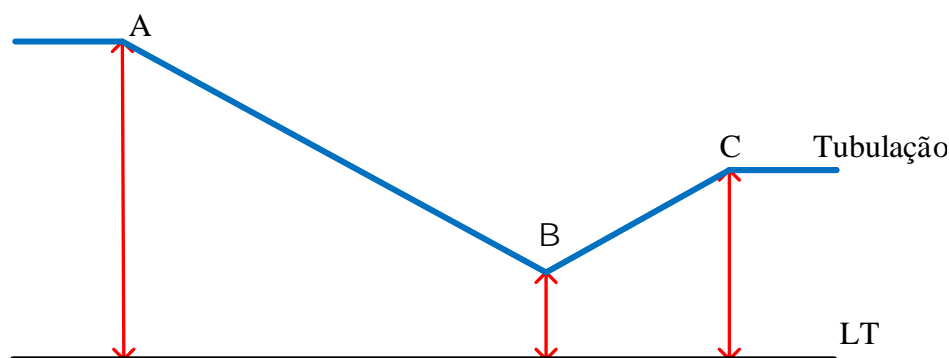
Fonte: Adaptado de CIGRÉ WG-36.02 (1995).

2.2.4 Distâncias equivalentes em paralelismos oblíquos e em cruzamentos

A fórmula de Carson, assim como outras (TSIAMITROS *et al.*, 2008; NAKAGAWA *et al.*, 1973; POLLACZEK, 1926), assumem distância constante ao longo do paralelismo. Em

situações reais, um paralelismo sem obliquidades entre os circuitos é raramente observado. A Figura 2.5 ilustra uma situação de obliquidade. Distâncias equivalentes e comprimentos equivalentes podem ser calculados para representar paralelismo oblíquo. O CIGRÉ WG-36.02 (1995) apresenta uma forma de calcular as distâncias equivalentes nessas situações, conforme exposto nos itens seguintes.

Figura 2.5: Exemplo de obliquidade.



Fonte: Autoria própria.

2.2.4.1 Obliquidades

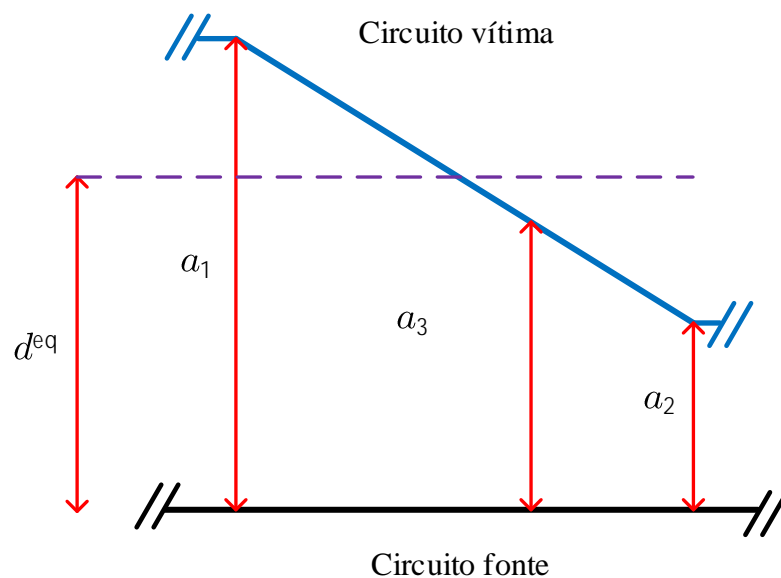
Uma aproximação para os casos de obliquidades com afastamentos a_1 e a_2 , em relação ao eixo do circuito fonte, ilustrada na Figura 2.6, pode ser obtida com a equação (2.4) quando a condição (2.5) é satisfeita. Caso contrário, o trecho deve ser subdividido, sucessivamente, até que a condição seja respeitada:

$$d^{eq} = \sqrt{a_1 a_2}, \quad (2.4)$$

$$\frac{1}{3} \leq \frac{a_1}{a_2} \leq 3, \quad (2.5)$$

em que a_1 e a_2 são os afastamentos das extremidades do trecho, dados em metros; e d^{eq} é a distância equivalente, em metros.

Figura 2.6: Aproximação oblíqua entre LT e tubulação.

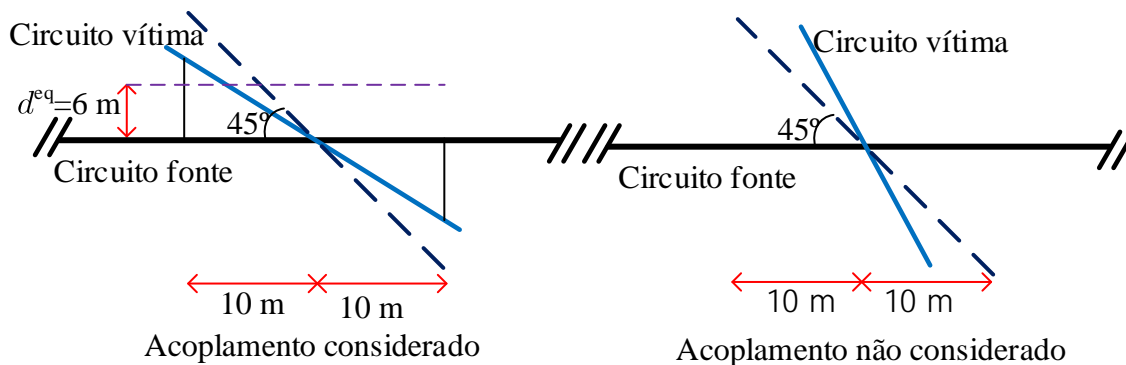


Fonte: Adaptado de Martins-Britto (2017).

2.2.4.2 Cruzamentos

No caso de cruzamentos, a zona situada dentro de 10 m em relação ao ponto de intersecção entre as instalações envolvidas é considerada uma zona especial. Quando o ângulo entre a LT e o duto é maior que 45° , a zona pode ser desconsiderada. Quando o ângulo é menor que 45° , a seção pode ser considerada um paralelismo com distância equivalente de 6 m. A Figura 2.7 ilustra a situação.

Figura 2.7: Exemplos de cruzamento em que o acoplamento é considerado ou não considerado.



Fonte: Adaptado de CIGRÉ WG-36.02 (1995).

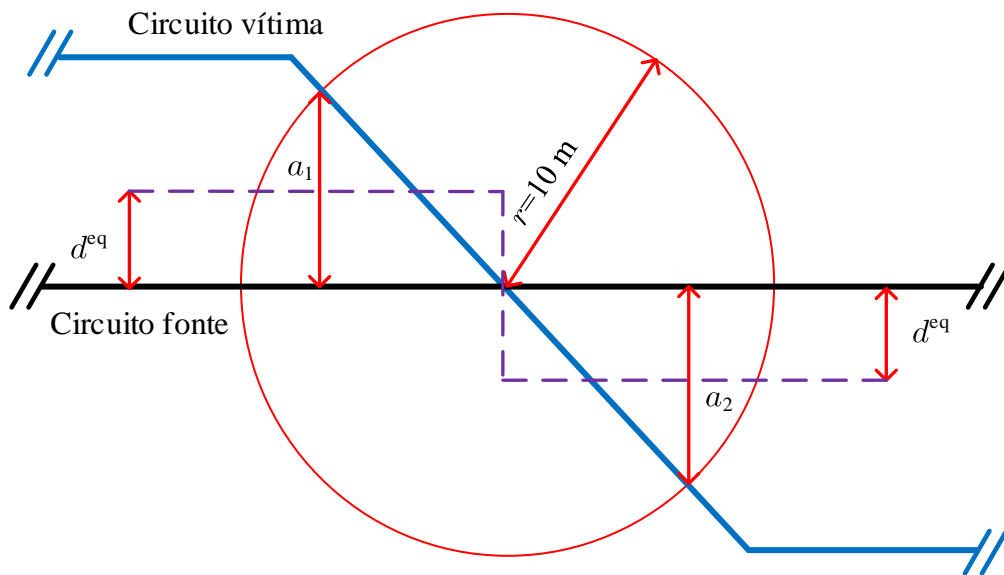
Em outro modelo ligeiramente diferente proposto por Martins-Britto (2017), a tubulação

é seccionada no ponto de cruzamento e é traçado um raio de 10 m onde são calculadas as distâncias equivalentes. As distâncias a_1 e a_2 são divididas por dois para encontrar as distâncias equivalentes d_1^{eq} e d_2^{eq} . A Figura 2.8 ilustra o cruzamento e as equações (2.6) (2.7) descrevem as distâncias equivalentes, em metros.

$$d_1^{eq} = \frac{a_1}{2}, \quad (2.6)$$

$$d_2^{eq} = \frac{a_2}{2}. \quad (2.7)$$

Figura 2.8: Cruzamento entre LT e tubulação.

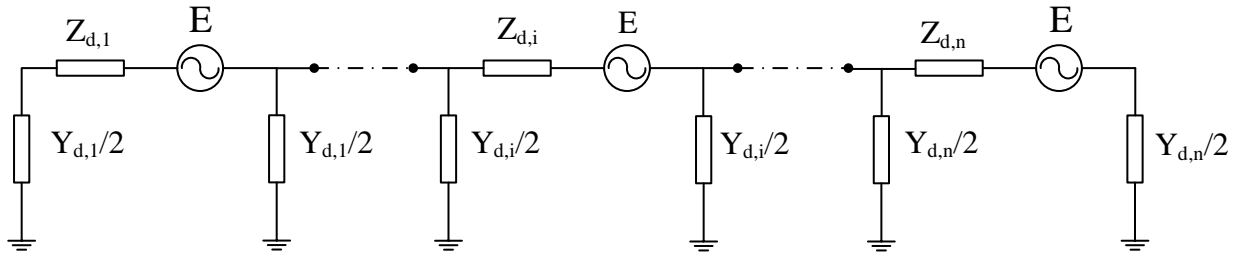


Fonte: Adaptado de Martins-Britto (2017).

2.2.5 Modelo circuital clássico para representação do duto interferido

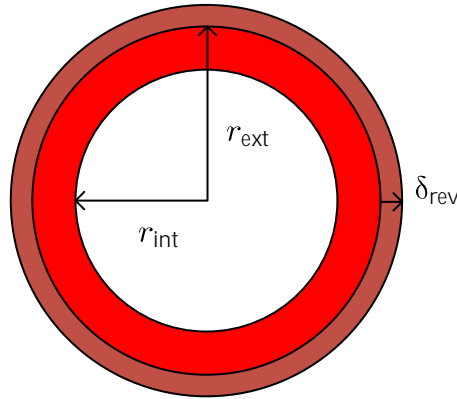
O modelo clássico do relatório técnico CIGRÉ WG-36.02 (1995) permite modelar uma tubulação subterrânea alvo afetada por um condutor fonte com parâmetros circuitais em regime harmônico. O modelo consiste em uma impedância série $Z_{d,i}$, duas admitâncias *shunt* $Y_{d,i}/2$ e uma fonte de tensão E calculada pela equação descrita em (2.2), em que Z_m é a impedância mútua calculada pela equação de Carson. Figura 2.9 representa o modelo.

Figura 2.9: Circuito equivalente de uma tubulação alvo



Fonte: Autoria própria

A Figura 2.10 representa o duto em que a parede metálica é representada na cor vermelha e o revestimento isolante é representado na cor marrom. Pelo fato dos diversos segmentos acoplados serem energizados pelas fontes de tensão “virtuais” de FEM, este modelo circuitual é referido na literatura como método das fontes distribuídas.

Figura 2.10: Seção transversal de uma tubulação com raio interno r_{int} , raio externo r_{ext} com um revestimento de espessura δ_{rev} .

Fonte: Autoria própria.

A impedância Z_d do seguimento, dada em Ω/m , e a admitância *shunt* Y_d , em S/m , podem ser calculadas por (2.8) e (2.9):

$$Z_d = Z_{d,int} + Z_{d,ext}, \quad (2.8)$$

$$Y_d = \frac{2\pi r_{ext}}{\rho_c \delta_c} + j\omega \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_c 2\pi r_{ext}}{\delta_c}, \quad (2.9)$$

em que $Z_{d,int}$ e $Z_{d,ext}$ são as impedâncias interna e externa da tubulação, expressas em Ω/m ; r_{ext} é o raio externo da tubulação, dado em metros; δ_{rev} é a espessura do revestimento isolante, em metros; ρ_c é a resistividade da camada isolante, em $\Omega.m$; ϵ_0 é permissividade elétrica no vácuo, em F/m; e ϵ_c é permissividade elétrica relativa do revestimento.

A equações (2.10) e (2.11) determinam os cálculos das impedâncias interna e externa. A impedância externa é derivada da equação de Carson (2.3), quando $i = j$, $D_{jj} = r_{ef}$, $D_{jj} = H = 2|y_j|$ e $D = 0$. A equação (2.12) de raio efetivo é utilizada para cálculo de todas as impedâncias próprias e mútuas dos condutores (SENEFF, 1947):

$$Z_{d,int} = \frac{\sqrt{\rho_p \mu_0 \mu_p \omega}}{2\pi r_{ext} \sqrt{2}} (1 + j), \quad (2.10)$$

$$Z_{d,ext} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2|y_j|}{r_{ef}}\right) + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \int_0^\infty \frac{2e^{-2|y_j|\lambda}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + j\frac{\omega\mu_0}{\rho} - \omega^2\mu_0\epsilon_0\epsilon_r}} d\lambda, \quad (2.11)$$

$$\ln(r_{ef}) = \ln(r_{ext}) - \frac{\frac{r_{ext}^4}{4} - r_{ext}^2 r_{int}^2 + r_{int}^4 \left[\frac{3}{4} + \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)\right]}{(r_{ext}^2 - r_{int}^2)^2}, \quad (2.12)$$

sendo ρ_p a resistividade elétrica do metal, em $\Omega.m$; μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo, em H/m; μ_p a permeabilidade magnética relativa do metal; r_{int} o raio interno da tubulação, em metros; r_{ef} o raio efetivo, em metros; e y_j a altura do condutor j em relação a superfície do solo, em metros.

2.3 ACOPLAMENTO CAPACITIVO

O acoplamento capacitivo é considerado quando dois condutores estão isolados por um meio dielétrico, a carga acumulada em um condutor resulta em carga acumulada no outro condutor. Assim como o acoplamento indutivo, o acoplamento capacitivo pode ser intencional ou não intencional.

No caso de uma LT e uma tubulação aérea, a tensão de energização da LT provoca o acúmulo de cargas na tubulação por meio do acoplamento capacitivo. As interações entre a linha e a tubulação podem ser diferentes quando a tubulação é isolada ou aterrada. Quando a tubulação

é subterrânea, ela não é sujeita a acoplamento capacitivo devido ao solo servir de blindagem (CIGRÉ WG-36.02, 1995).

A tensão induzida por acoplamento capacitivo é calculada por meio dos coeficientes de potencial de Maxwell próprios $P_{i,i}$ e mútuos $P_{i,j}$ (DABKOWSKI; TAFLOVE, 1978), dados por:

$$P_{i,j} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \left(\frac{D'_{i,j}}{D_{i,j}} \right), \quad (2.13)$$

$$P_{i,i} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \left[\frac{|y_i|}{r_{ext}} + \sqrt{\left(\frac{|y_i|}{r_{ext}} \right)^2 - 1} \right], \quad (2.14)$$

em que ϵ_0 é a permissividade elétrica no vácuo, em F/m; ϵ_r é a permissividade elétrica relativa; $D'_{i,j}$ e $D_{i,j}$ são as distâncias entre os condutores i e j , e entre o condutor i e a imagem do condutor j , respectivamente em metros, referentes a Figura 2.3; y_i é a altura do condutor i em relação ao superfície do solo, em metros; r_{ext} é o raio externo da tubulação, em metros.

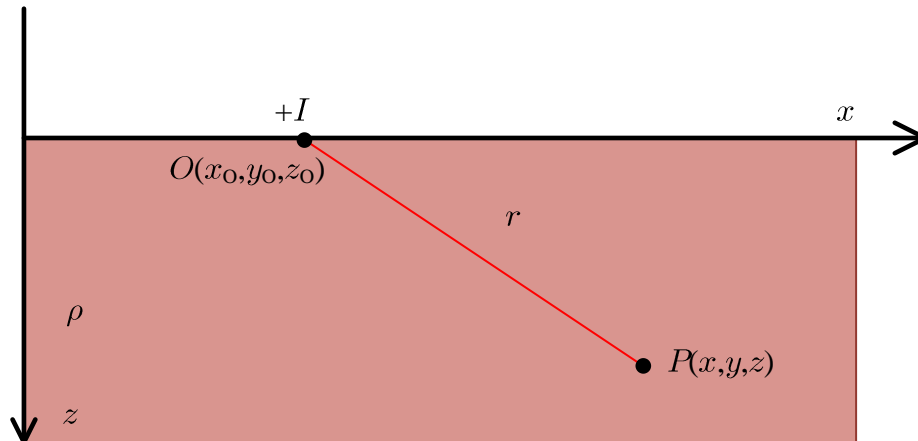
2.4 ACOPLAMENTO CONDUTIVO

O acoplamento condutivo é a elevação de potencial do solo e o potencial transferido ao duto devido à injeção de corrente na terra provocada por uma falta nas proximidades da tubulação. A forma mais simples de calcular a elevação de potencial do solo é considerando um modelo uniforme e assumindo baixa frequência. A equação (2.15) (STEFANESCO *et al.*, 1930) é referente a uma descarga pontual na superfície do solo com resistividade ρ que é ilustrado na Figura 2.11:

$$U_S(P, O) = \frac{\rho I}{2\pi r}, \quad (2.15)$$

em que $U_S(P, O)$ é a elevação de potencial em um ponto O devido a uma injeção de corrente em um ponto P , em V; $r = \sqrt{(x - x_O)^2 + (y - y_O)^2 + z^2}$, em metros; ρ é dado em $\Omega \cdot \text{m}$; e a injeção de corrente I em ampère.

Figura 2.11: Elevação de potencial do ponto P sob influência de corrente no ponto O localizado na superfície.

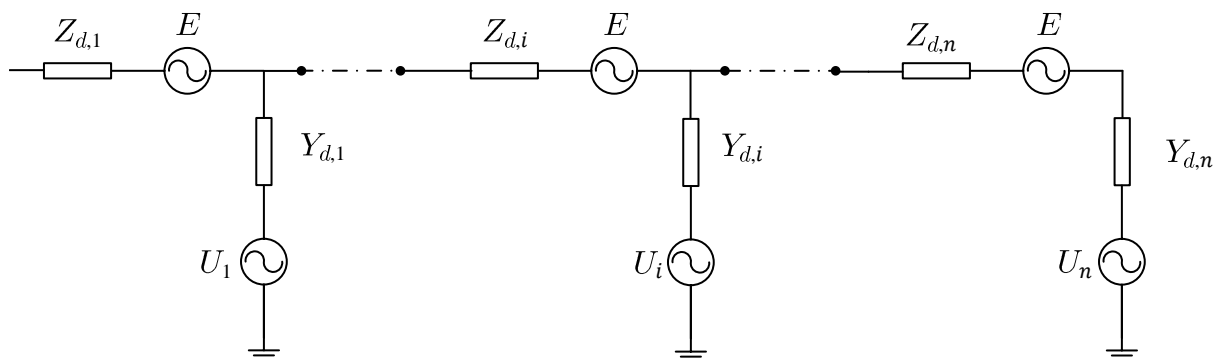


Fonte: Autoria própria.

2.4.1 Modelo modificado do duto

A função de Green apresentada por Li *et al.* (2007) permite calcular a elevação de potencial do solo estratificado e utilizá-la em um modelo circuital que considera o acoplamento condutivo em tubulações subterrâneas proposto por Martins-Britto (2020). O modelo circuital consiste em uma fonte de tensão controlada por corrente acoplada à impedância do revestimento, ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12: Modelagem circuital para o acoplamento condutivo.



Fonte: Autoria própria.

A elevação de potencial do solo $U_{S_{ij}}$ em um ponto P_i (tubulação) causada por uma injeção

de corrente no solo em um ponto O_j (torre) é calculada pela equação (2.16):

$$U_{S_{ij}} = I_j \times \widehat{G}(P_i, O_j), \quad (2.16)$$

em que I_j é a corrente de falta descarregada no solo em um ponto O_j , em ampères, e \widehat{G} é a resposta impulsional de corrente em um ponto O_i observada em um ponto P_i , expressa em Ω , ou seja a função de Green.

Devido ao princípio da superposição, a elevação de potencial total devido à todas as correntes descarregadas nos pontos O_j (torres), observada em um ponto P_i (tubulação), é dada pela equação (2.17):

$$U_{S_i} = \sum_{j=1}^n U_{S_{ij}}. \quad (2.17)$$

2.5 RISCOS ASSOCIADOS AOS ACOPLAMENTOS

As tensões induzidas pelos acoplamentos nas tubulações metálicas ao seu redor podem causar riscos à vida e danos à estrutura metálica da tubulação, como detalhado nos tópicos subsequentes.

2.5.1 Tensão de toque

A tensão de toque é um dos fatores mais importantes pois trata, diretamente, de riscos à vida. O contato com a tubulação metálica acoplada pode acarretar eletrocussão, cuja sua gravidade é determinada pela duração e intensidade da corrente fluindo pelo corpo.

Segundo a NBR 15751 (ABNT, 2013) a tensão de toque é definida como: "diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionalmente igual a 1,0 m".

Todos os acoplamentos, indutivo, capacitivo e condutivo, são eventos que devem ser analisadas tendo em mente os limiares de tensão admissíveis.

2.5.2 Danos no revestimento da tubulação metálica

No caso de tubulações subterrâneas, o revestimento isolante protege a tubulação contra corrosão e, conseqüentemente, protege a sua estrutura metálica. A diferença de potencial entre o solo e a tubulação é chamada de estresse no revestimento, sendo influenciada pelos acoplamentos condutivo e indutivo. O estresse no revestimento é o principal fator para analisar se a rigidez dielétrica pode ser rompida e, conseqüentemente, se há risco de comprometimento da tubulação.

2.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Esse capítulo abordou os conceitos fundamentais clássicos de interferência de eletromagnéticas entre LTs e tubulações metálicas em solo uniforme, considerando o paradigma de modelagem e equacionamento classicamente utilizado na literatura especializada.

Primeiramente foram expostos alguns fundamentos sobre a resistividade do solo e estabelecido que o solo multicamadas representa a grande maioria das situações reais. Em seguida, foi abordado a maneira de calcular a FEM com a solução clássica de Carson. Sequencialmente, foram apresentadas técnicas de aproximação geometrias oblíquas na forma de paralelismos equivalentes. Logo após, o modelo circuital classicamente utilizado para representar a tubulação foi exposto. Por fim, foi apresentada a fórmula de elevação de potencial sob solo uniforme e uma modificação no modelo do duto para considerar o acoplamento condutivo.

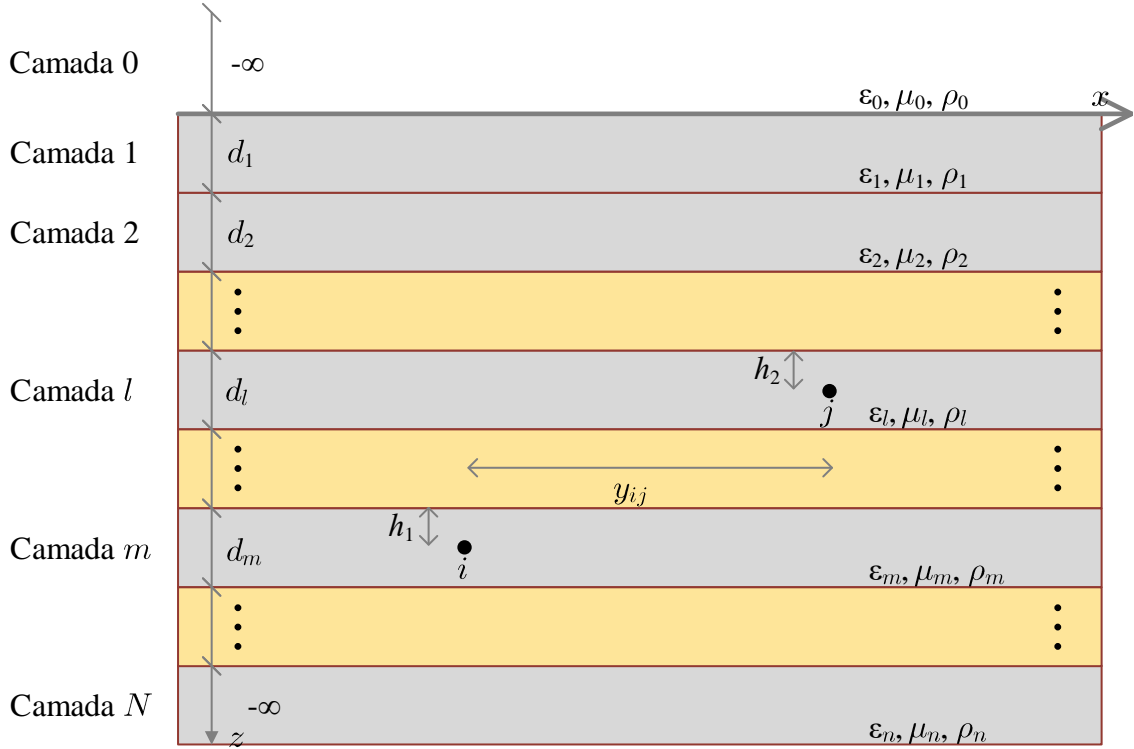
Os capítulos seguintes abordarão propostas de melhorias no modelo circuital clássico, objetivando obter maior precisão nas respostas em casos de solos estratificados.

ESTUDO DO ACOPLAMENTO INDUTIVO

Na seção anterior foram abordados modelos de acoplamento considerando solo uniforme. Este capítulo apresenta um método de cálculo das impedâncias próprias e mútuas de condutores aéreos e subterrâneos em solo estratificado, como originalmente proposto por Tsiamitros *et al.* (2008). Além disso, demonstra como uma equação complexa e sofisticada pode ser implementada no EMTP/ATP para representação adequada dos efeitos de acoplamento indutivo.

3.1 MODELO DE IMPEDÂNCIA MÚTUA PARA SOLO MULTICAMADAS

A solução de impedância mútua proposta por Tsiamitros *et al.* (2008) é um método bem mais abrangente que a solução clássica de Carson (1926), que se restringe a condutores aéreos sobre solo uniforme, que a solução de Nakagawa *et al.* (1973), cuja validade é restrita a condutores aéreos sobre solo multicamadas, assim como a solução de Pollaczek (1926), que representa o comportamento de condutores subterrâneos sob solo uniforme. Esta solução abrange todas as configurações de condutores em solo estratificado, ou seja além de convergir para as soluções de Nakagawa e Pollaczek, no caso de meios uniformes, pode também calcular, satisfatoriamente, as impedâncias entre um condutor aéreo e um subterrâneo em solo estratificado, o que é o principal objetivo deste capítulo.

Figura 3.1: Dois condutores subterrâneos em um solo com N camadas.

Fonte: Autoria própria.

Assumindo regime harmônico em um solo de N camadas com suas respectivas permissividades elétricas ϵ_N , em F/m; permeabilidades magnéticas μ_N , em H/m; condutividades σ_N , em S/m; e espessuras das camadas d_N , em metros, ilustradas na Figura 3.1, pode-se calcular a impedância mútua por unidade de comprimento entre dois condutores por meio da equação (3.1):

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{ij} &= \frac{j\omega\mu_m}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\cos(uy_{ij})}{\bar{\alpha}_m} \\ &\times \left\{ \frac{2^{m-l} (\mu_1\mu_2\mu_3 \dots \mu_{m-1}) (\bar{\alpha}_1\bar{\alpha}_2\bar{\alpha}_3 \dots \bar{\alpha}_{m-1}\bar{\alpha}_m) (e^{-\bar{\alpha}_l d_l} e^{-\bar{\alpha}_{l+1} d_{l+1}} \dots e^{-\bar{\alpha}_m d_m})}{(\mu_1\mu_2\mu_3 \dots \mu_{l-1}) (\bar{\alpha}_1\bar{\alpha}_2\bar{\alpha}_3 \dots \bar{\alpha}_{l-1}\bar{\alpha}_l)} \frac{\bar{F}_1 \bar{F}_2}{D\bar{T}D_0} \right\} du, \\ \bar{F}_1 &= [D\bar{T}D_m e^{\bar{\alpha}_m(d_m-h_1)} + D\bar{T}N_m e^{-\bar{\alpha}_m(d_m-h_1)}], \\ \bar{F}_2 &= [T\bar{D}D_{l-1} e^{\bar{\alpha}_l h_2} + T\bar{D}N_{l-1} e^{-\bar{\alpha}_l h_2}], \end{aligned} \quad (3.1)$$

em que i e j são os condutores localizados nas camadas m e l , respectivamente. Os termos h_1 e h_2 são as alturas relativas à interfaces superiores das respectivas camadas m e l , dadas em metros; y_{ij} é a distância horizontal entre os dois condutores, em metros; ω é a frequência, em

rad/s; $\bar{\alpha}_i = \sqrt{u^2 + \bar{\gamma}_i^2}$ e $\bar{\gamma}_i^2 = j\omega\mu_i(\sigma_i + j\omega\varepsilon_i)$ em que $i = 0,1,2 \dots N$.

Nesta notação, os termos $D\bar{T}N_i$, $D\bar{T}D_i$, $T\bar{D}N_k$ e $T\bar{D}D_k$, expressos em (3.2) a (3.10), relacionam as características eletromagnéticas e as geometrias das camadas sucessoras, em que $i = 0,1,2 \dots N$ e $k = 0,1,2 \dots m$. As primeiras letras $T\bar{D}$ e $D\bar{T}$ denotam o sentido das relações recursivas ("*Down to Top*" e "*Top to Down*").

$$D\bar{T}N_i = (\mu_{i+1}\bar{\alpha}_i - \mu_i\bar{\alpha}_{i+1}) D\bar{T}D_{i+1} + (\mu_{i+1}\bar{\alpha}_i + \mu_i\bar{\alpha}_{i+1}) D\bar{T}N_{i+1}e^{-2\bar{\alpha}_{i+1}d_{i+1}}, \quad (3.2)$$

$$D\bar{T}D_i = (\mu_{i+1}\bar{\alpha}_i + \mu_i\bar{\alpha}_{i+1}) D\bar{T}D_{i+1} + (\mu_{i+1}\bar{\alpha}_i - \mu_i\bar{\alpha}_{i+1}) D\bar{T}N_{i+1}e^{-2\bar{\alpha}_{i+1}d_{i+1}}, \quad (3.3)$$

$$D\bar{T}N_N = 0, \quad (3.4)$$

$$D\bar{T}D_N = 1, \quad (3.5)$$

$$T\bar{D}D_{-1} = 1, \quad (3.6)$$

$$T\bar{D}N_{-1} = 0, \quad (3.7)$$

$$T\bar{D}D_{k-1} = (\mu_{k-1}\bar{\alpha}_k + \mu_k\bar{\alpha}_{k-1}) T\bar{D}D_{k-2} + (\mu_{k-1}\bar{\alpha}_k - \mu_k\bar{\alpha}_{k-1}) T\bar{D}N_{k-2}e^{-2\bar{\alpha}_{k-1}d_{k-1}}, \quad (3.8)$$

$$T\bar{D}N_{k-1} = (\mu_{k-1}\bar{\alpha}_k - \mu_k\bar{\alpha}_{k-1}) T\bar{D}D_{k-2} + (\mu_{k-1}\bar{\alpha}_k + \mu_k\bar{\alpha}_{k-1}) T\bar{D}N_{k-2}e^{-2\bar{\alpha}_{k-1}d_{k-1}}. \quad (3.9)$$

Os coeficientes descritos em (3.2)-(3.10) são determinados simbolicamente por meio de uma função recursiva dependente do número de camadas e posições dos pontos fonte e alvo, a partir do que se determina a forma final do integrando em (3.1). A transformada inversa de Fourier, ou seja, a integral imprópria em (3.1), é determinada numericamente, por meio do algoritmo de quadraturas adaptativas reportado em Shampine (2008).

3.2 VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO

Pretende-se validar a equação dentro do espectro de frequências compreendido até a faixa de 1 MHz por se tratar de um espectro amplo o suficiente para abranger a grande maioria dos transitórios eletromagnéticos mais comuns em sistemas de potência, inclusive os de natureza atmosférica (RAKOV; UMAN, 2003). Nessas condições, pode-se utilizar a seguinte aproximação da constante de propagação: $\bar{\gamma}_i^2 = j\omega\mu_i(\sigma_i + j\omega\varepsilon_i) \approx j\omega\mu_i\sigma_i$, em que $i = 0,1,2, \dots, n$. Então $\bar{\alpha}_i$ pode ser expresso por $\bar{\alpha}_i = \sqrt{u^2 + j\omega\mu_i\sigma_i}$.

As validações têm como referência o programa *Finite Element Method Magnetic* (FEMM) que é reconhecido no meio científico por ser um programa *open-source*, utilizado para modelar campos eletromagnéticos distribuídos sob um domínio discretizado (CROZIER; MUELLER, 2016).

Os erros a serem utilizados nesta validação e nas seguintes são o erro relativo, o erro RMS e o erro RMS normalizado que estão expostos nas equações (3.11) (3.12) (3.13), respectivamente.

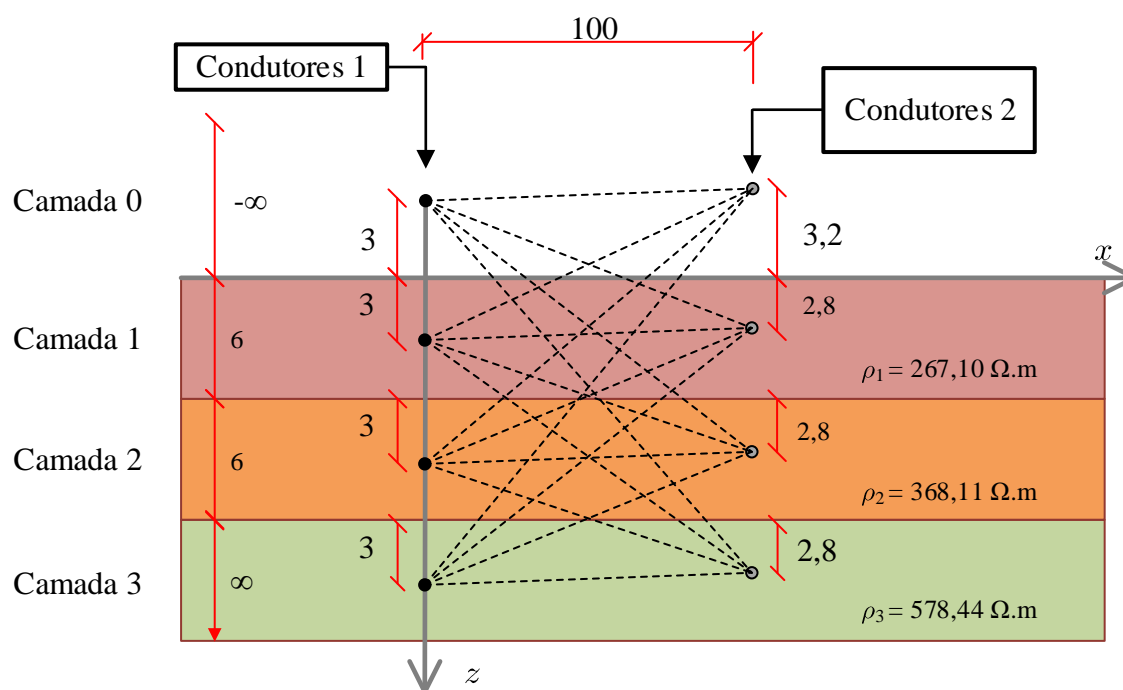
$$E_{rel} = \left| \frac{y - y_{ref}}{y_{ref}} \right|, \quad (3.11)$$

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (y - y_{ref})^2}{T}}, \quad (3.12)$$

$$E_{RMSN} = \frac{E_{RMS}}{y_{max} - y_{min}}, \quad (3.13)$$

em que y_{ref} é o valor de referência; y é o valor calculado; y_{max} e y_{min} são os valores máximos e mínimos das amostras; T é a quantidade total de pontos analisados.

Figura 3.2: Solo de três camadas com condutores em diferentes configurações.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 3.2 ilustra o sistema de três camadas variando as coordenadas dos condutores entre essas camadas, as resistividades das camadas de solo e as espessuras que foram utilizadas para a validação. O cálculo é feito entre um condutor 1 e um condutor 2. As Tabelas 3.1 a 3.5 contêm os erros relativos do modelo do Tsiamitros em relação ao FEMM, em diferentes frequências e em diferentes camadas.

Tabela 3.1: Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o *software* FEMM, para frequência 60 Hz.

| Con. 1 \ Con. 2 | Camada 0 | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Camada 0 | 0.9287 | 0.9167 | 0.8893 | 0.9681 |
| Camada 1 | 0.8962 | 0.8994 | 0.8954 | 0.8830 |
| Camada 2 | 0.9920 | 0.9652 | 0.9499 | 0.8070 |
| Camada 3 | 0.8152 | 0.8982 | 0.9508 | 0.9104 |

Tabela 3.2: Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o *software* FEMM, para frequência 1 kHz.

| Con. 1 \ Con. 2 | Camada 0 | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Camada 0 | 0.2803 | 0.4243 | 0.3673 | 0.4409 |
| Camada 1 | 0.3160 | 0.2616 | 0.2784 | 0.3311 |
| Camada 2 | 0.5414 | 0.4614 | 0.4317 | 0.2331 |
| Camada 3 | 0.2283 | 0.3485 | 0.3479 | 0.4105 |

Tabela 3.3: Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o *software* FEMM, para frequência 10 kHz.

| Con. 1 \ Con. 2 | Camada 0 | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Camada 0 | 1.0095 | 0.9238 | 0.9499 | 0.7695 |
| Camada 1 | 0.4331 | 1.0200 | 1.0778 | 0.8908 |
| Camada 2 | 0.8725 | 0.8486 | 0.6831 | 1.2569 |
| Camada 3 | 0.9604 | 0.8207 | 0.8249 | 0.8657 |

Tabela 3.4: Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o *software* FEMM, para frequência 100 kHz.

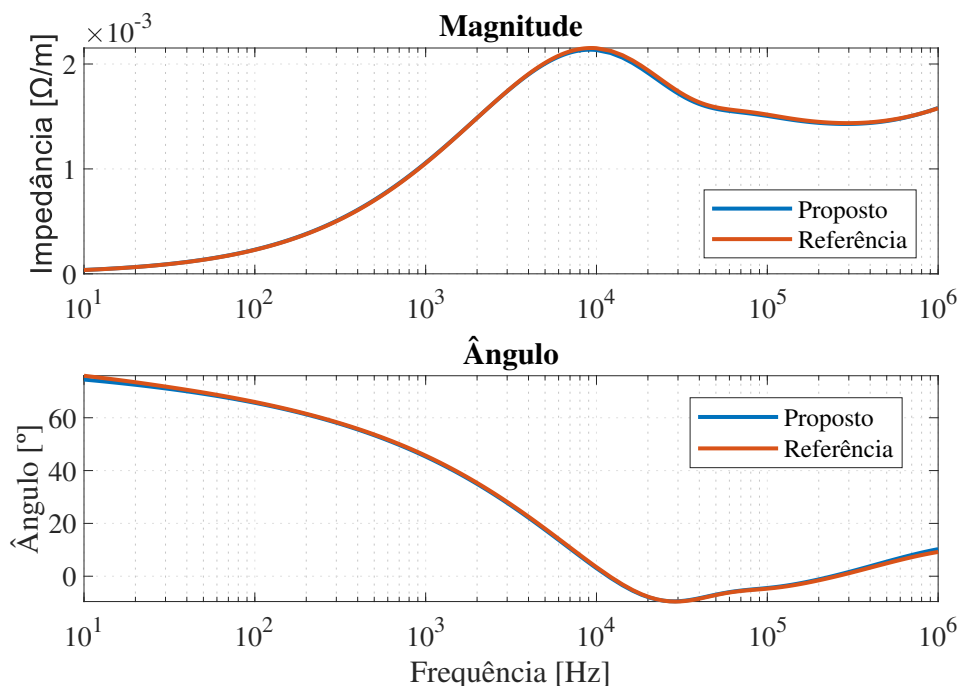
| Con. 1 \ Con. 2 | Camada 0 | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Camada 0 | 0.9685 | 1.0289 | 1.4822 | 1.1099 |
| Camada 1 | 0.2459 | 0.7523 | 0.6927 | 0.0178 |
| Camada 2 | 0.0418 | 1.0266 | 0.2241 | 0.3168 |
| Camada 3 | 1.0290 | 1.5934 | 1.0911 | 1.3988 |

Tabela 3.5: Erro relativo percentual entre a implementação do modelo de Tsiamitros e o *software* FEMM, para frequência 1 MHz.

| Con. 1 \ Con. 2 | Camada 0 | Camada 1 | Camada 2 | Camada 3 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Camada 0 | 0.2260 | 0.3280 | 1.1849 | 1.3407 |
| Camada 1 | 0.9635 | 0.3783 | 0.8569 | 0.4259 |
| Camada 2 | 1.0422 | 1.3682 | 0.9450 | 1.9786 |
| Camada 3 | 1.3165 | 2.4714 | 3.2623 | 5.1448 |

Um segundo teste foi realizado considerando um condutor aéreo a 7 m de altura e um condutor subterrâneo a 1,5 m de profundidade, com os mesmos parâmetros de solo da Figura 3.2 e um espaçamento horizontal de 300 m entre os condutores. Foi realizada uma varredura em frequência, obtendo-se os gráficos de magnitude e ângulo da impedância, assim como seus erros comparados com o FEMM.

Figura 3.3: Impedância versus frequência, modelos de Tsiamitros e FEMM.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 3.3 indica um bom ajuste e um erro RMS normalizado de 0,39% para a magnitude e 0,60% para o ângulo.

Com erros sempre menores que 5,15% a função implementada de Tsiamitros está de acordo com a referência e pode ser utilizada para cálculos de impedância mútua em todos os arranjos

de condutores.

3.3 DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO CIRCUITAL NO EMTP/ATP

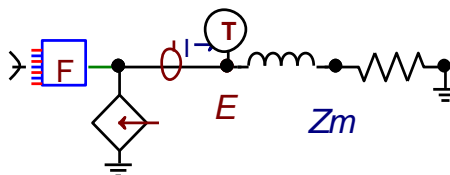
As seções subsequentes apresentam soluções aos desafios da implementação do modelo circuital, utilizando a ferramenta *Transient Analysis of Control Systems* (TACS), nativa do ATP, que permite modelagem de sistemas de controles e componentes não lineares.

3.3.1 Implementação da FEM no ATP

Um desafio foi encontrar uma maneira de multiplicar fasorialmente a corrente que flui nos condutores energizados da LT pelo parâmetro de impedância mútua. A fonte TACS, nativa do ATP, não permite que se multiplique por um fasor, apenas por grandezas escalares. Como já foi explicado na seção 2.2.1, a FEM é dada por $E = I \times Z_m$ e essa equação precisa ser implementada fasorialmente no ATP.

Para tentar solucionar esse problema foi utilizada uma fonte de corrente controlada por corrente associada com uma impedância série, ilustrada na Figura 3.4. Desta forma, o circuito utiliza a lei de Ohm para multiplicar fasorialmente a corrente que flui na LT pela impedância mútua, resultando na tensão no nó E que é numericamente igual a FEM.

Figura 3.4: Implementação circuital de multiplicação fasorial da corrente com a impedância mútua: primeira proposta.



Fonte: Autoria própria.

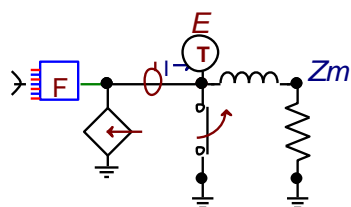
Contudo, a fonte TACS utiliza o valor calculado anteriormente no elemento medidor de corrente, ou seja o valor da fonte é o valor medido atrasado em Δt , o intervalo de tempo da simulação. Portanto, a solução contém um problema de transitório e de oscilação numérica por causa da natureza do indutor que reage a uma mudança brusca de corrente e do método

trapezoidal do ATP.

Para contornar o problema de transitório, foi utilizada uma chave que é programada para abrir quando a corrente é zero, como é ilustrado na Figura 3.5. A chave tem o tempo de abertura de $t = 10^{-8}$ s com objetivo de abrir quando a corrente passar por zero, desta maneira, o transitório não ocorre pois a corrente que fluirá pela impedância sempre terá o valor inicial igual a zero.

Para contornar o problema da oscilação numérica foi utilizado um indutor com fator de amortecimento de $7,5 \Omega$.

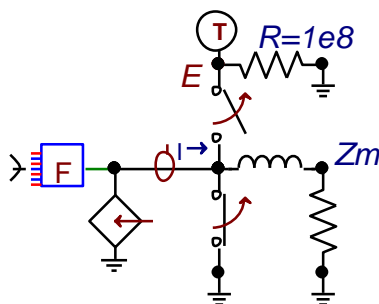
Figura 3.5: Implementação circuital de multiplicação fasorial da corrente com a impedância mútua: segunda proposta.



Fonte: Autoria própria.

Com isso, é possível obter o valor numérico da FEM, porém existem três fases e portanto existem três chaves que abrirão em tempos diferentes podendo causar distorções nos resultados. Para contornar esse problema, foi utilizado outra chave para fechar quando um ciclo da onda de 60 Hz passar, desta maneira, a tensão no nó E é zero até que todas as FEM de todas as fases sejam computadas. A proposta final é ilustrada na Figura 3.6.

Figura 3.6: Implementação circuital de multiplicação fasorial da corrente com a impedância mútua: proposta final.



Fonte: Autoria própria.

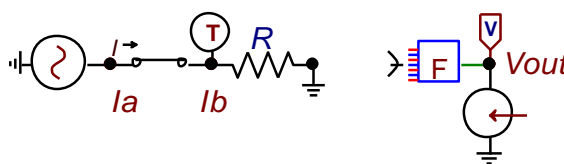
Por fim, essa última solução devidamente testada previamente, é a que foi utilizada nas

seções subsequentes.

3.3.2 Tensão controlada série

Como já foi descrito na seção 2.2.5, o modelo de tubulação subterrânea do CIGRÉ WG-36.02 (1995) necessita de uma fonte de tensão controlada por corrente série, e o ATPDraw não dispõe de elemento nativo que apresente essa funcionalidade. O mais próximo disso é a fonte de tensão controlada por corrente da TACS, porém ela não permite que o elemento seja utilizado em série, visto que um dos nós da fonte é obrigatoriamente conectado ao terminal terra. A Figura 3.7 ilustra como usar esse elemento:

Figura 3.7: Fonte de tensão controlada por corrente.

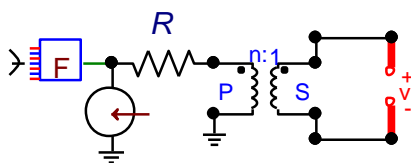


Fonte: Autoria própria.

Para obter os valores corretos de corrente, uma chave fechada é colocada de acordo com a direção da corrente medida de I_a para I_b e uma sonda TACS tipo 91 é colocada em I_b .

Para permitir a conexão da fonte controlada entre dois nós arbitrários, foi utilizado um transformador ideal com relação de transformação igual a um junto com uma resistência de $10^{-8} \Omega$. Essa configuração permite que a fonte, originalmente aterrada, possa ser conectada entre dois nós quaisquer, e utilizada em série para modelar a tubulação no ATP, utilizando o método das fontes distribuídas.

Figura 3.8: Implementação de fonte de tensão não aterrada com transformador ideal.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, foi utilizado a solução descrita na seção 3.3.1 junto com a dessa seção para modelar

a fonte de tensão controlada em série.

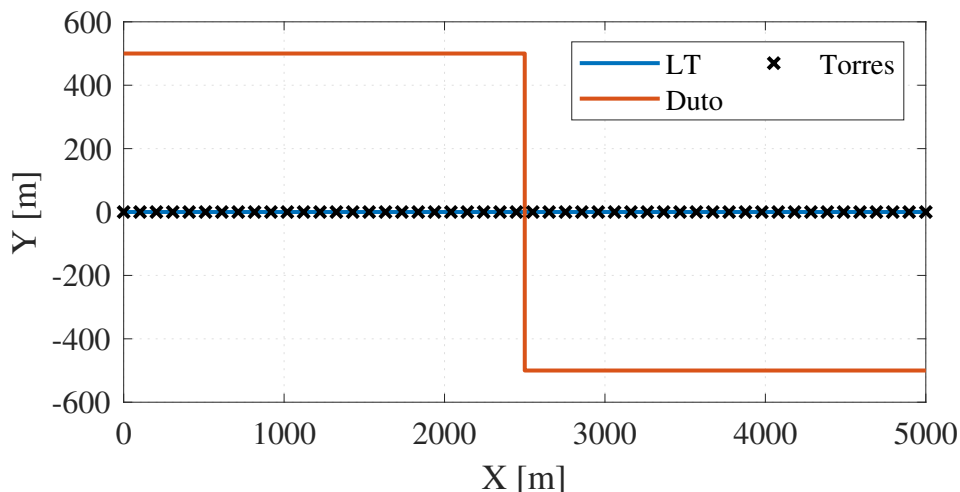
3.4 ESTUDO DE CASO SIMPLES EM REGIME PERMANENTE

O estudo de caso a seguir tem como objetivo validar a implementação do modelo de tubulação do CIGRÉ WG-36.02 (1995) junto com a implementação da solução de Tsiamitros no ATP. Um solo multicamadas é utilizado e a tubulação é considerada enterrada em suas extremidades.

3.4.1 Dados do sistema

O estudo de caso consiste em uma LT de 115 kV reta de 5 km de comprimento acompanhada por um duto de 6 km de extensão, com um afastamento de 500 m nas regiões paralelas. No ponto 2500 m o duto cruza a LT e continua acompanhado a linha. A LT opera com a corrente nominal de 830 A por fase. As torres estão espaçadas a 101 m, e possuem a resistência de aterramento de 10Ω . A Figura 3.9 ilustra a vista de superior da geometria do sistema.

Figura 3.9: Vista superior do caso simples em regime permanente.



Fonte: Autoria própria.

A torre representada na Figura 3.10 tem um tipo de estrutura autoportante com o para-raio em seu topo. Os condutores utilizados para o para-raio e as fases foram o ALCOA 48/48/606 e o Grosbeak, respectivamente, cujos parâmetros estão representados na Tabela 3.6. A tubulação metálica revestida por uma camada isolante está enterrada a 1,2 m do solo, na primeira camada

de um solo estratificado. As especificações da tubulação estão na Tabela 3.7.

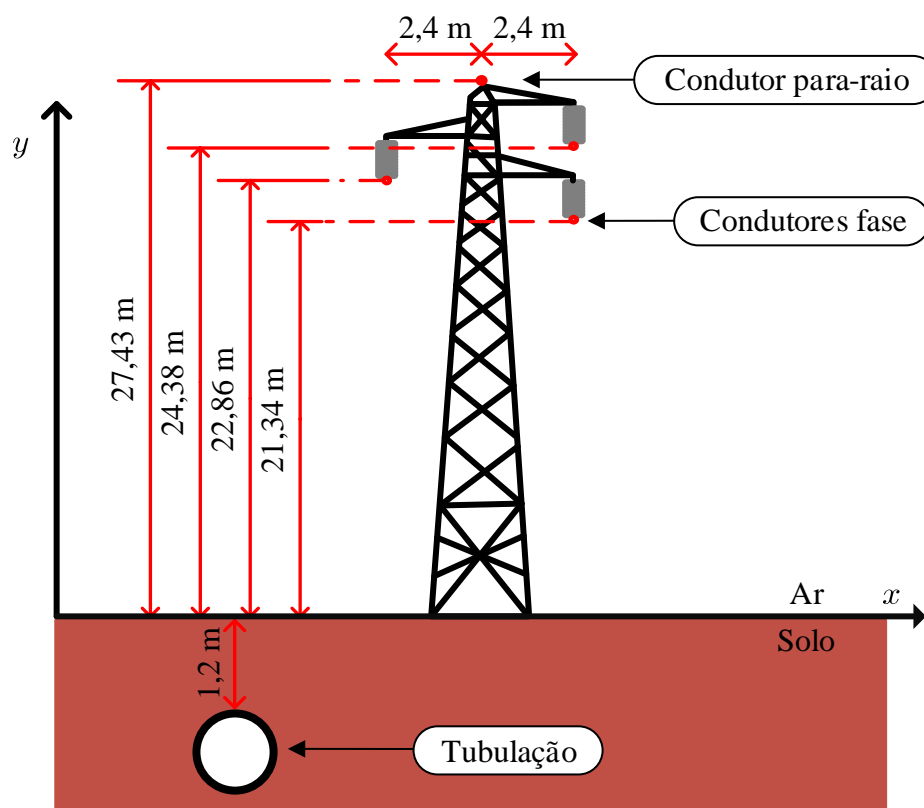
Tabela 3.6: Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso simples em regime permanente.

| Condutor | Raio externo [m] | Resistência AC [Ω/km] | Reatância [Ω/km] |
|-----------------|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Grosbeak | 0,025705 | 0,0922115 | 0,256067 |
| ALCOA 48/48/606 | 0,00770001 | 0,309319 | 0,296208 |

Tabela 3.7: Parâmetros do duto para o caso simples em regime permanente.

| | |
|---|-----------------------|
| Raio interno [m] | 0,295275 |
| Raio externo [m] | 0,3048 |
| Profundidade do duto enterrado [m] | 1,2 |
| Resistividade do metal [$\Omega.m$] | $1,72 \times 10^{-7}$ |
| Permeabilidade relativa do metal | 300 |
| Espessura do revestimento isolante [cm] | 0,3 |
| Resistividade do revestimento isolante [$\Omega.m$] | 10^8 |

Figura 3.10: Seção transversal da torre do estudo de caso simples em regime permanente.

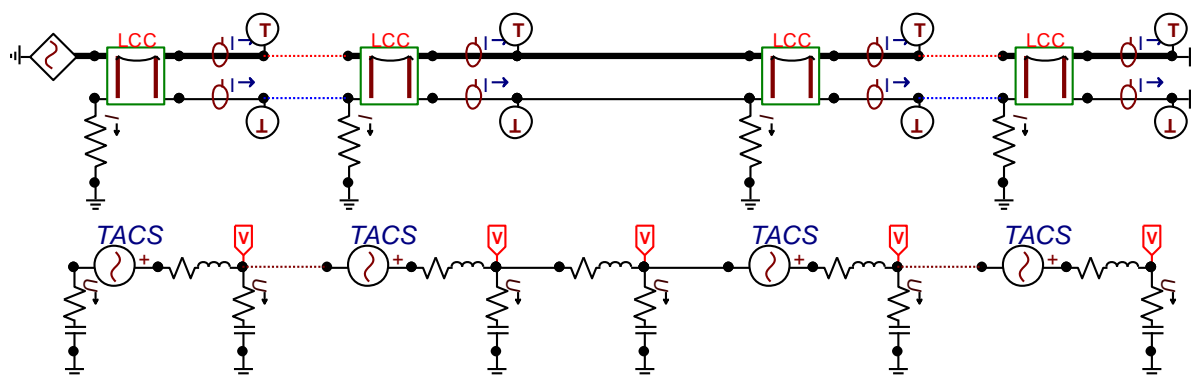


Fonte: Autoria própria.

3.4.2 Modelo no ATP

O modelo no ATP representativo da LT é composto por uma fileira de blocos do *Line Constants* (LCC) em série, em que cada bloco representa os parâmetros de linha dos respectivos vãos entre as torres e no meio da linha existe apenas uma impedância *shunt* e uma série para representar a região perpendicular do duto que, devido ao ângulo de exposição, não acopla com os condutores energizados da LT. A Figura 3.11 representa o sistema utilizado para simulação, em que o elemento fonte de tensão TACS representa a configuração descrita na Figura 3.8 com a soma das FEMs de todas as fases e para-raios. Coloca-se uma sonda de corrente TACS para medir a corrente do que sai de cada vão da LT, valores que são utilizados para construir as fontes de FEM no duto interferido, representado no ATP na parte inferior da figura.

Figura 3.11: Representação do modelo no ATPdraw do estudo de caso simples em regime permanente.



Fonte: Autoria própria.

Vale apenas ressaltar que este modelo não considera as interferências que o duto causa na linha mas como a corrente do duto é muito menor que a corrente da linha pode-se considerar a interferência na linha desprezível para o regime permanente.

3.4.3 Parâmetros do solo

Para análise de um modelo real, os parâmetros do solo foram retirados de Martins-britto *et al.* (2021).

Para a simulação o solo será composto de três camadas. Os dados das medições de resis-

tividade aparente estão representados na Tabela 3.8. O modelo estratificado de três camadas está descrito na Tabela 3.9.

Tabela 3.8: Valores de resistividade aparente para o estudo de caso simples em regime permanente.

| Profundidade [m] | Resistividade aparente [Ω .m] |
|------------------|---------------------------------------|
| 1 | 517.36 |
| 2 | 688.36 |
| 4 | 945.32 |
| 8 | 1220.27 |
| 16 | 1251.95 |
| 32 | 784.20 |

Tabela 3.9: Parâmetros do solo em três camadas para o estudo de caso em regime permanente.

| Camada | ρ [Ω .m] | h [m] | Reflexão | Contraste |
|--------|-----------------------|----------|----------|-----------|
| 1 | 488.71 | 1.73 | -1.00 | 0.00 |
| 2 | 2074.66 | 8.99 | 0.62 | 4.24 |
| 3 | 451.45 | ∞ | -0.64 | 0.22 |

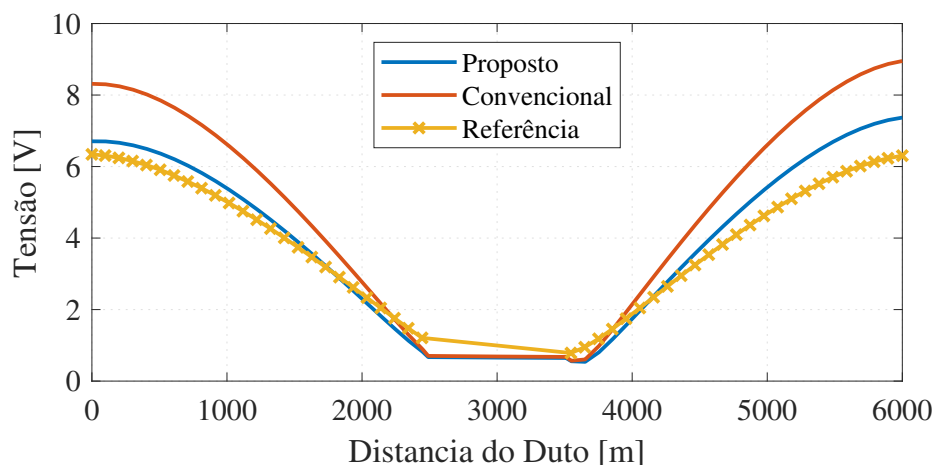
Para comparação, um modelo convencional é utilizado, cujo valor de resistividade uniforme é dado pela média aritmética das resistividades aparentes da Tabela 3.8 (IEEE, 2000). O valor calculado é de 1004.94 Ω .m.

3.4.4 Resultados da simulação em regime permanente

Considerando os valores nominais de regime permanente do sistema, foi realizada uma simulação no EMTP/ATP e, para fins de comparação, no *software* CDEGS (*Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*), que é uma ferramenta de simulação de sistemas sujeitos a interferências eletromagnéticas muito utilizado pela indústria (DAWALIBI; DONOSO, 1993).

A Figura 3.12 representa a tensão na tubulação em função do seu comprimento. Obteve-se um erro RMS normalizado de 7,74% quando comparado com a referência.

Figura 3.12: Tensão induzida na tubulação enterrada sem aterramento.

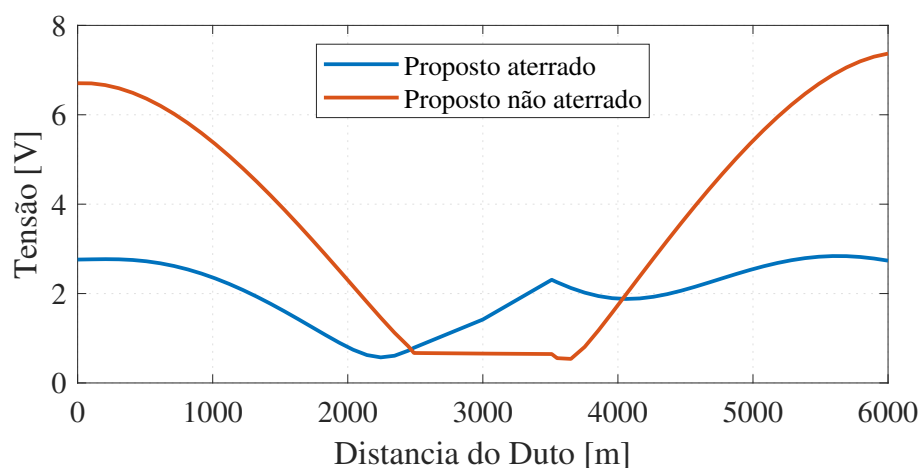


Fonte: Autoria própria.

Existe um erro de 23,97% na extremidade esquerda do duto e um erro de 21,47% quando compara-se o modelo de solo estratificado com o modelo de solo convencional. Nesse caso, esses valores nas extremidades podem ser de apenas 1,6 V e 1,56 V, respectivamente, mas essa diferença pode ser significativa para sistemas maiores e de tensões mais altas com múltiplas fases e múltiplos para-raios.

Como de costume na indústria, quando o valor excede o limite de segurança de 15 V (NACE, 2007), aterram-se as extremidades da tubulação para mitigar os efeitos de interferência. Nesse caso, não é necessário utilizar-se de tal método de mitigação. Não obstante, para fins de ilustração de funcionamento do modelo circuitual, foi executada outra simulação com as extremidades da tubulação aterradas com $R = 1\Omega$ cujos resultados são apresentados na Figura 3.13.

Figura 3.13: Tensão induzida na tubulação subterrânea com e sem aterramento.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico mostra que a estratégia de mitigação de interferência reduz significativamente a tensão máxima da tubulação, em 58% na extremidade esquerda e 62% na extremidade direita, e mostra-se um método eficiente para neutralização de riscos.

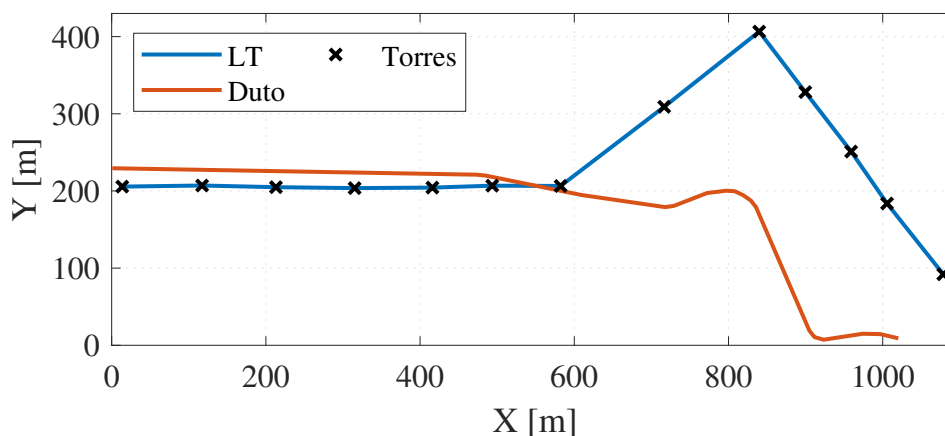
3.5 ESTUDO DE UM CASO REAL EM REGIME PERMANENTE

Após a validação da metodologia proposta por meio do ATP, é verificado o comportamento da metodologia em um caso real mais complexo composto por obliquidades.

3.5.1 Dados do sistema

A Figura 3.14 ilustra a geometria do sistema composto por uma LT de 138 kV energizada com uma corrente de 780 A em cada fase. A linha possui dois circuitos com sequências ABC/ABC, em uma frequência de 60 Hz. Cada torre possui uma resistência de aterramento de 15Ω e a resistência de aterramento das subestações terminais é igual a 1Ω . Os condutores são Grosbeak para as fases e aço 3/8" tipo HS-AG para o para-raio. A Tabela 3.10 descreve os condutores utilizados e suas respectivas características.

Figura 3.14: Vista superior do caso real em regime permanente.



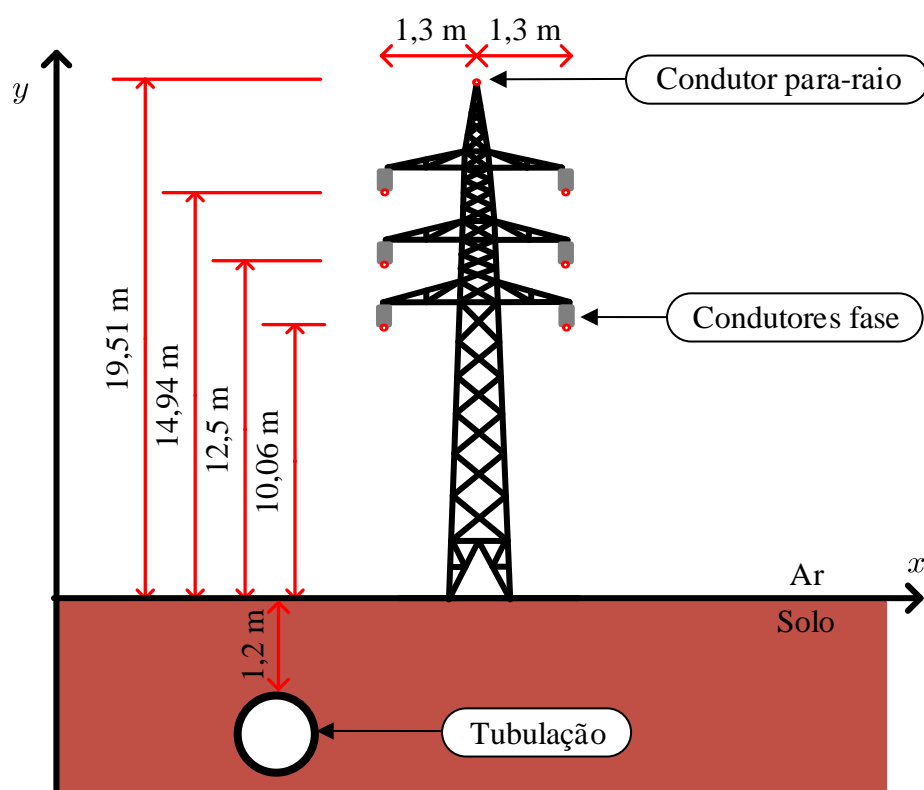
Fonte: Autoria própria.

A tubulação subterrânea que acompanha a linha é construída em aço carbono, possui 14" de diâmetro e está enterrada na primeira camada do solo a 1,2 m de profundidade. A tubulação é aterrada em suas extremidades com resistências de aterramento de 10Ω , e suas características

estão descritas na Tabela 3.11. Como a obtenção do modelo de solo em camadas não é o foco deste trabalho a obtenção do modelo de solo não será demonstrada. O solo é composto por três camadas e suas resistividades e espessuras estão representadas na Tabela 3.12.

A torre é do tipo autoportante com dois circuito para as fases ABC. A Figura 3.15 ilustra a seção transversal da torre assim como as coordenadas de cada condutor.

Figura 3.15: Seção transversal da torre do caso real em regime permanente.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3.10: Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso real em regime permanente.

| Condutor | Raio externo [m] | Resistência AC [Ω/km] | Reatância [Ω/km] |
|-----------|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Grosbeak | 0,025705 | 0,0922115 | 0,256067 |
| 3/8 HS-AG | 0,004572 | 4,7907 | 1,33595 |

Tabela 3.11: Parâmetros do duto para o estudo de caso real em regime permanente.

| | |
|---|-----------------------|
| Raio interno [m] | 0.168275 |
| Raio externo [m] | 0.1778 |
| Profundidade do duto enterrado [m] | 1,2 |
| Resistividade do metal [$\Omega.m$] | $1,72 \times 10^{-7}$ |
| Permeabilidade relativa do metal | 300 |
| Espessura do revestimento isolante [cm] | 0,3 |
| Resistividade do revestimento isolante [$\Omega.m$] | 10^8 |

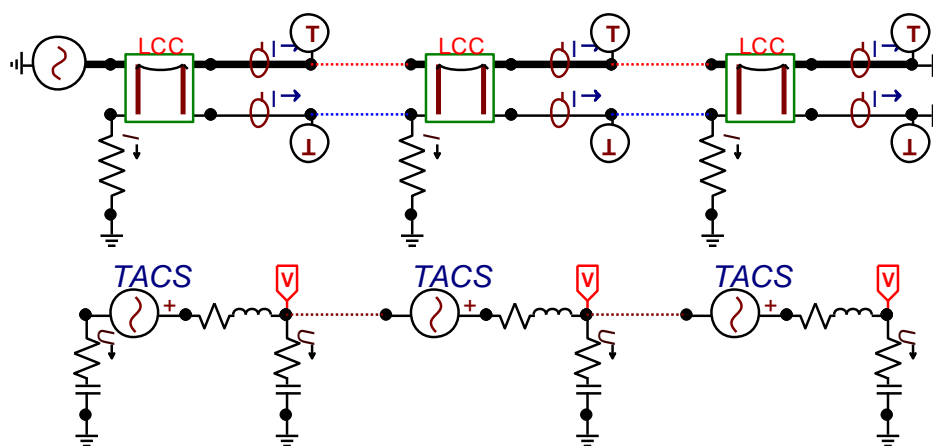
Tabela 3.12: Parâmetros do solo para o estudo de caso real em regime permanente.

| Camada | ρ [$\Omega.m$] | h [m] |
|--------|-----------------------|----------|
| 1 | 488.71 | 1.73 |
| 2 | 2074.66 | 8.99 |
| 3 | 451.45 | ∞ |

3.5.2 Modelo no ATP

O modelo no ATP segue a mesma ideia do descrito na seção 3.4.1, na Figura 3.11. A diferença é que neste estudo de caso a geometria é complexa, composta por obliquidades e cruzamentos, sendo necessário utilizar o método de subdivisão em paralelismos equivalentes, conforme orientações descritas na seção 2.2.4. O diagrama construído no ATP é ilustrado pela Figura 3.16:

Figura 3.16: Representação do modelo no ATPdraw do caso real em regime permanente.



Fonte: Autoria própria.

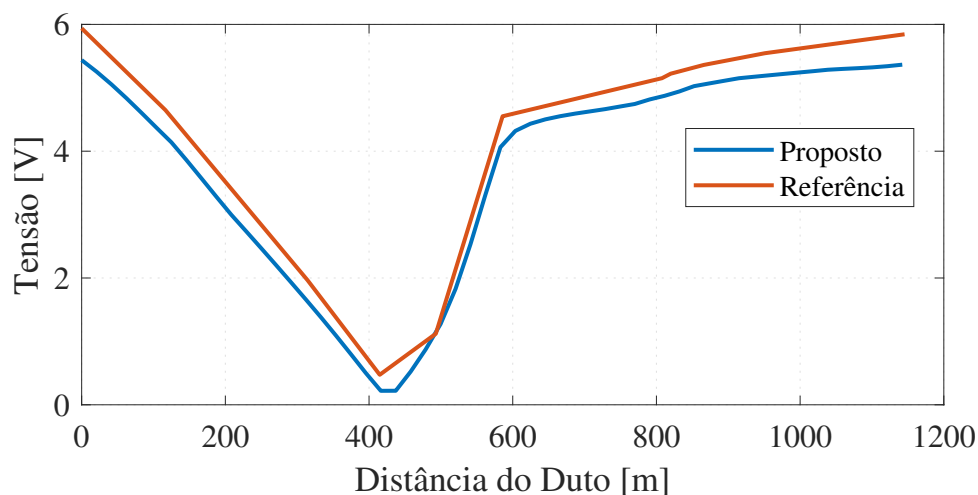
3.5.3 Resultados da simulação em regime permanente

Assumindo regime harmônico, a Figura 3.17 apresenta a resposta da simulação do programa implementado, bem como o comparativo com os resultados obtidos por meio do programa de referência, CDEGS. O perfil da curva de tensão se assemelha ao obtido na simulação anterior, com o valor mínimo ocorrendo na região do cruzamento e os valores máximos nas extremidades.

A simulação demonstra uma boa concordância com programa de referência, com erro RMS normalizado de 7,35%.

Devido ao aterramento nas extremidades da tubulação, a tensão induzida não excede o limite de segurança de 15 V. O aterramento permite um caminho seguro para que as correntes induzidas por acoplamento magnético com a LT em regime permanente sejam conduzidos ao solo, mitigando eventuais riscos à instalação interferida, principalmente o de danos por corrosão em corrente alternada (NACE, 2007).

Figura 3.17: Tensão induzida na tubulação subterrânea com aterramento no caso real em regime permanente.



Fonte: Autoria própria.

3.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Esse capítulo abordou o modelo generalizado de impedâncias mútuas para um solo esterificado estratificado em N camadas, com aplicações voltadas para simulação de um sistema de teste simples, bem como um estudo de caso inspirado em um projeto real da indústria.

A equação implementada de Tsiamitros foi validada variando a frequência e as posições relativas (camadas) dos condutores. Obteve-se uma boa concordância com o programa de referência, com um erro máximo de 5,14%. Foram descritos os principais desafios e dificuldades da implementação do modelo circuital proposto no software ATP, bem como as soluções de engenharia propostas. Por fim, foram executados dois estudos de caso: um sistema simples, para validar e demonstrar que o modelo de solo uniforme pode introduzir erros significativos quando comparado com o modelo de solo estratificado, seguido de um estudo real para analisar e evidenciar alguns aspectos de segurança envolvidos, bem como e demonstrar que a implementação proposta oferece bom desempenho quando aplicada em situações mais complexas.

Vale a pena ressaltar que todas as simulações feitas via ATP foram realizadas via programação do cartão ATP, o que possibilita a simulação de sistemas grandes e complexos de forma transparente, e que todas as figuras ilustradas no ATPDraw são apenas representações do que foi realmente realizado.

No próximo capítulo serão abordadas metodologias para o estudo do acoplamento condutivo em solo estratificado, expandindo a abrangência dos estudos desenvolvidos e permitindo a análise completa dos efeitos de interferências eletromagnéticas em condições de falta na LT..

ESTUDO DO ACOPLAMENTO CONDUTIVO

O objetivo deste capítulo será o estudo acoplamento condutivo provocado pela injeção de corrente elétrica no solo, nos casos de faltas envolvendo a terra na LT. O estudo é baseado na função de Green generalizada para solo multicamadas. Assim como no capítulo anterior, este abordará as dificuldades de implementação no ATP e respectivas soluções.

4.1 A FUNÇÃO DE GREEN PARA SOLO MULTICAMADAS

Em matemática avançada, a função de Green permite resolver equações diferenciais parciais que podem ser de difícil resolução na forma integral. Ela se baseia no métodos dos momentos, que é um método numérico vastamente utilizado no eletromagnetismo (HE *et al.*, 2013; SADIKU, 2000). No problema de acoplamento condutivo, a função de Green representa o potencial produzido no ponto P produzido por uma corrente unitária injetada no ponto O.

A Figura 4.1 ilustra um solo estratificado de N camadas em que o ponto fonte e o ponto de observação são representados pelos pontos O e P , respectivamente.

A função de Green em um solo estratificado em N camadas horizontais foi descrita por He *et al.* (2013) e Li *et al.* (2007) e é expressa matematicamente por:

$$\hat{G}_{k,i}(P, O) = \frac{1}{4\pi\hat{\sigma}_i} \left(\int_0^\infty A_{k,i}(\lambda) \hat{J}_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda + \int_0^\infty B_{k,i}(\lambda) \hat{J}_0(\lambda r) e^{\lambda z} d\lambda + \int_0^\infty \delta_{ki} \hat{J}_0(\lambda r) e^{-\lambda|z|} d\lambda \right), \quad (4.1)$$

em que $r = \sqrt{(x_O - x_P)^2 + (y_O - y_P)^2}$ é o raio no plano xy ; $z = z_O - z_P$ é a diferença de profundidade entre os pontos O e P; $J_0(\lambda r)$ é a função de Bessel de ordem 0. Os termos $A_{k,i}(\lambda)$ e $B_{k,i}(\lambda)$ são constantes determinadas pelas condições de contorno impostas pela equação de Laplace nas interfaces entre as camadas; $\hat{\sigma}_i$ é condutividade complexa da camada i ; λ é a variável de integração auxiliar que representa o número de onda na frequência espacial; δ_{ki} é o

delta de Kronecker, em que k é o número da camada que está o ponto fonte O e $i = 0, 1, 2, \dots, N$.

Define-se o delta de Kronecker como:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j, \end{cases} \quad (4.2)$$

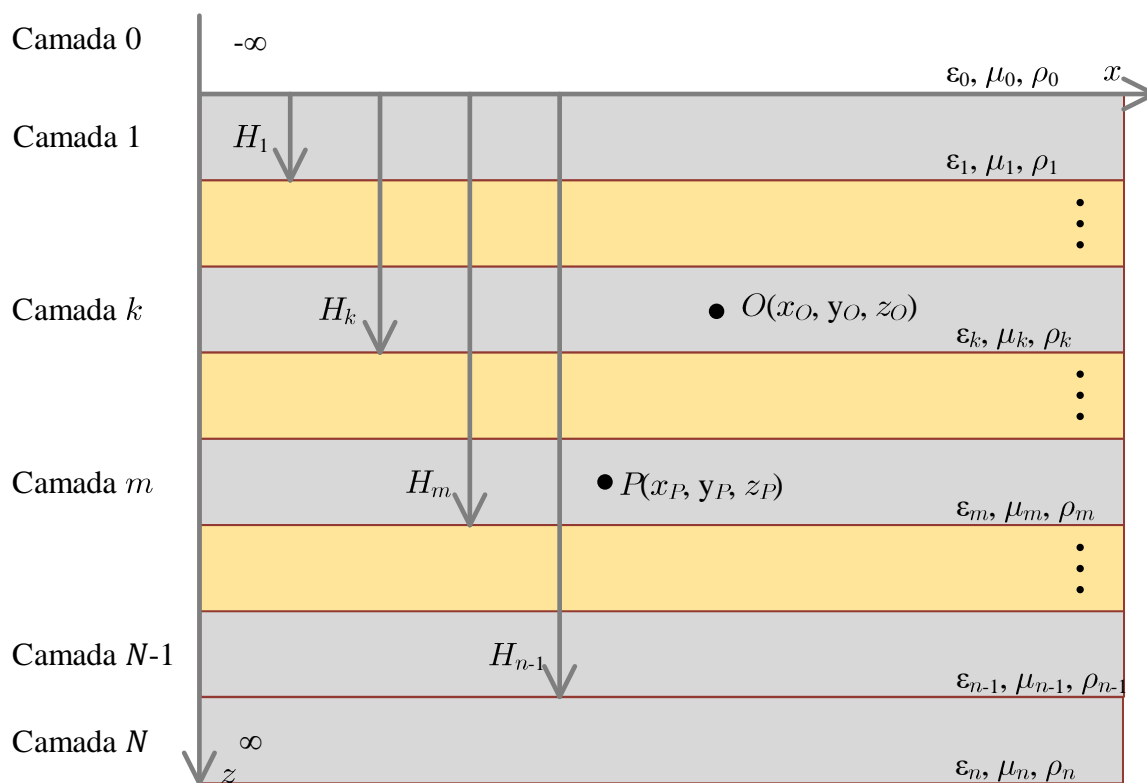
e define-se a condutividade complexa do solo como:

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 + i\omega\epsilon_s \quad (4.3)$$

sendo σ_0 a condutividade real do solo, em S/m; ω a frequência, em rad/s; e ϵ_s a permissividade elétrica, em F/m.

É importante observar que não foi mencionada a camada m . A equação (4.1) descreve a função de Green para cada camada, sendo necessário determinar todas as constantes $A_{k,i}(\lambda)$ e $B_{k,i}(\lambda)$ para expressar completamente a função de Green para a camada onde está situado o ponto alvo P , ou seja $i = m$.

Figura 4.1: Dois pontos em um solo estratificado em que O é o ponto fonte e P é o ponto de observação.



Fonte: Autoria própria.

As equações (4.4) a (4.6) descrevem as condições de contorno nas fronteiras entre camadas adjacentes, bem como na camada de ar (Camada 0) e camada profunda (Camada N).

$$\widehat{G}_{k,i-1}(r, z) \Big|_{z=H_{i-1}} = \widehat{G}_{k,i}(r, z) \Big|_{z=H_{i-1}}, \quad (4.4)$$

$$\hat{\sigma}_{i-1} \frac{\partial \widehat{G}_{k,i-1}(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=H_{i-1}} = \hat{\sigma}_i \frac{\partial \widehat{G}_{k,i}(r, z)}{\partial z} \Big|_{z=H_{i-1}}, \quad (4.5)$$

$$\widehat{G}_{k,n}(r, z) \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0, \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial \widehat{G}_{k,0}(r, z)}{\partial z} \Big|_{z \rightarrow -\infty} = 0, \quad (4.7)$$

em que $i = 1, 2, \dots, N$ e $H_0 = 0$.

Utilizando as condições de contorno descritas e a expressão geral da função de Green, é possível escrever equações matriciais para obter os termos $A_{k,i}(\lambda)$ e $B_{k,i}(\lambda)$ de cada camada. Convém observar que esses termos não são valores numéricos e sim termos em função de λ .

As equações matriciais (4.8) (4.9) (4.10) representam os coeficientes da função de Green descritos acima, sendo que: a equação (4.8) considera que $k = 0$, ou seja a fonte está na camada de ar; a equação (4.9) considera que a fonte está em uma camada intermediária entre a camada de ar ($k = 0$) e a camada profunda ($k = N$); e a equação (4.10) considera que $k = n$, ou seja, a fonte está posicionada na camada profunda do solo :

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_0 & 1 & -a_0 & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_0 & 1 & a_0 b_0 & -b_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & & & \dots & & & & & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_{k-1} & 1 & -a_{k-1} & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_{k-1} & 1 & a_{k-1} b_{k-1} & -b_{k-1} & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_k & 1 & -a_k & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_k & 1 & a_k b_k & -b_k & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & & & \dots & & & & & & & \dots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_{n-1} & 1 & -a_{n-1} & -1 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_{n-1} & 1 & a_{n-1} b_{n-1} & -b_{n-1} & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 1 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{0,0} \\ B_{0,0} \\ A_{0,1} \\ B_{0,1} \\ \vdots \\ A_{0,i-1} \\ B_{0,i-1} \\ A_{0,i} \\ B_{0,i} \\ \vdots \\ A_{0,n} \\ B_{0,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_k \\ -a_k \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_0 & 1 & -a_0 & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-a_0 & 1 & a_0 b_0 & -b_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & & & & \vdots & \dots & & & & & & \vdots & \dots & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_{k-1} & 1 & -a_{k-1} & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_{k-1} & 1 & a_{k-1} b_{k-1} & -b_{k-1} & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_k & 1 & -a_k & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_k & 1 & a_k b_k & -b_k & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & & & & \vdots & \dots & & & & & & \vdots & \dots & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_{n-1} & 1 & -a_{n-1} & -1 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_{n-1} & 1 & a_{n-1} b_{n-1} & -b_{n-1} & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
A_{n,0} \\
B_{k,0} \\
A_{k,1} \\
B_{k,1} \\
\vdots \\
A_{k,k-1} \\
B_{k,k-1} \\
A_{k,k} \\
B_{k,k} \\
\vdots \\
A_{k,n} \\
B_{k,n}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 \\
0 \\
0 \\
\vdots \\
1 \\
b_{k-1} \\
-a_k \\
\vdots \\
0 \\
0 \\
0
\end{bmatrix},
\tag{4.9}$$

$$\begin{bmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
a_0 & 1 & -a_0 & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-a_0 & 1 & a_0 b_0 & -b_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & & & & \vdots & \dots & & & & & & \vdots & \dots & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_{k-1} & 1 & -a_{k-1} & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_{k-1} & 1 & a_{k-1} b_{k-1} & -b_{k-1} & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_k & 1 & -a_k & -1 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_k & 1 & a_k b_k & -b_k & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dots & & & & \vdots & \dots & & & & & & \vdots & \dots & & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & a_{n-1} & 1 & -a_{n-1} & -1 & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -a_{n-1} & 1 & a_{n-1} b_{n-1} & -b_{n-1} & \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
A_{n,0} \\
B_{n,0} \\
A_{n,1} \\
B_{n,1} \\
\vdots \\
A_{n,i-1} \\
B_{n,i-1} \\
A_{n,i} \\
B_{n,i} \\
\vdots \\
A_{n,n} \\
B_{n,n}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
0 \\
0 \\
0 \\
\vdots \\
0 \\
0 \\
0 \\
0 \\
\vdots \\
1 \\
b_{k-1} \\
0
\end{bmatrix},
\tag{4.10}$$

em que $a_i = e^{-2\lambda(H_i - z_0)}$, $b_i = \hat{\sigma}_{i+1}/\hat{\sigma}_i$ e $i = 0, 1, 2, \dots, N$.

Por fim, para encontrar a função de Green de um ponto fonte em O em um ponto alvo P basta calcular a função de Green na camada m com as constantes $A_{k,m}(\lambda)$ e $B_{k,m}(\lambda)$ determinadas a partir das relações matriciais expostas acima.

A partir dessas matrizes, os coeficientes são determinados simbolicamente, a partir do que se escreve a forma final dos integrandos em (4.1). A transformada inversa de Fourier no domínio espectral espacial, ou seja, a integral imprópria em (4.1), é determinada numericamente, por meio do algoritmo de quadraturas adaptativas descrito em Shampine (2008).

4.2 VALIDAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO DE GREEN PROPOSTA

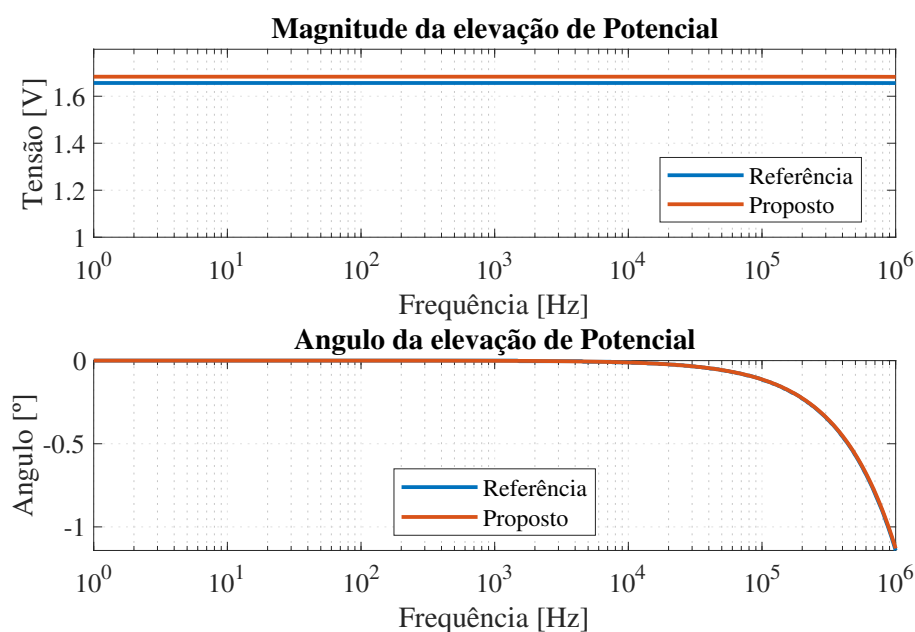
Com o objetivo de validar a implementação da função de Green, foi realizada uma comparação com o *software* de referência CDEGS, utilizando um solo estratificado de quatro camadas com seus parâmetros descritos na Tabela 4.1. Foi executada uma varredura em frequência, assim como o levantamento do perfil de distância em relação ao eixo z .

Tabela 4.1: Parâmetros do solo para validação da função de Green implementada.

| Camada | ρ [$\Omega.m$] | h [m] |
|--------|-----------------------|----------|
| 1 | 500 | 5 |
| 2 | 50 | 11 |
| 3 | 300 | 16 |
| 4 | 150 | ∞ |

A resposta em frequência foi avaliada até a faixa de 1 MHz e os pontos utilizados para o ponto fonte e o ponto de observação foram $O = [0 \ 0 \ 0,5]$ e $P = [0 \ 0 \ 13]$, respectivamente. Para fins de comparação com CDEGS, uma corrente de 1 A foi injetada no solo a partir de um eletrodo puntiforme, para obter a elevação de potencial do solo. A resposta da função é representada na Figura 4.2 e possui um erro RMS normalizado de 9,858% para a magnitude e 0,19% para o ângulo.

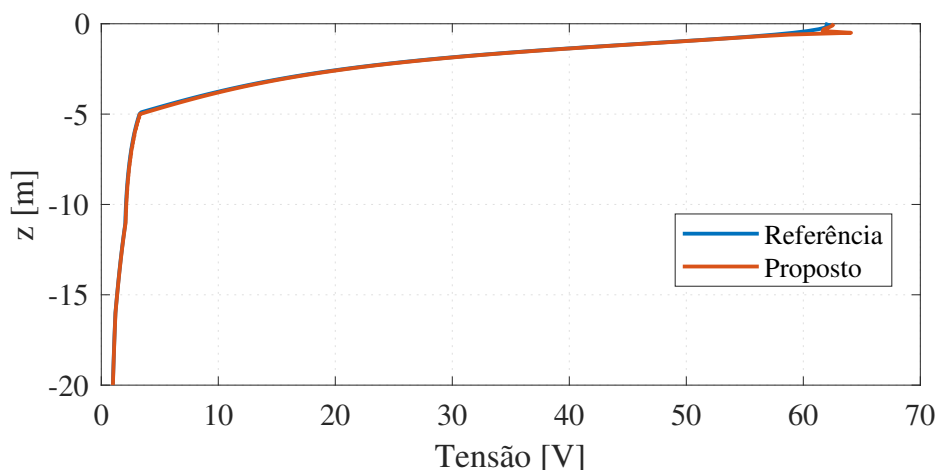
Figura 4.2: Magnitude e ângulo da varredura em frequência dos pontos $O = [0 \ 0 \ 0,5]$ e $P = [0 \ 0 \ 13]$.



Fonte: Autoria própria.

O perfil de distância foi determinado variando apenas a coordenada z . O ponto escolhido para fonte foi $O = [0 \ 0 \ 0,5]$ e, para evitar com que o gráfico passasse por uma singularidade, o perfil foi observado a partir do ponto $P = [0 \ 1 \ 0]$. O gráfico resultante é apresentado na Figura 4.3 e possui um erro RMS de 0,63%.

Figura 4.3: Perfil de distância variando o eixo z .



Fonte: Autoria própria.

4.3 DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO MODIFICADO DE TUBULAÇÃO SUBTERRÂNEA

Para simular a elevação de potencial do solo descrita na equação (2.17), existe a necessidade de utilizar a fonte de tensão controlada pelas correntes injetadas em cada torre, o que impõe desafios inerentes à estrutura de entrada de dados do ATP, como se descreve abaixo.

4.3.1 Quantidade de caracteres no cartão ATP

A estrutura de entrada de dados no cartão ATP possui um número limite de 80 caracteres por linha. Após o caractere 80, o ATP desconsidera toda a entrada de dados subsequente. Isso é um problema quando se pretende implementar uma fonte de tensão controlada por diversos parâmetros de corrente, como é o caso representativo de um ponto da tubulação afetado pelas várias torres que podem vir a injetar correntes de falta no solo no caso de um curto-circuito envolvendo a terra. Pode-se facilmente exceder os 80 caracteres imposto pelo cartão ATP

quando se utiliza uma fonte TACS, no caso da implementação circuital da elevação de potencial do solo baseada na função de Green, precisa-se da contribuição de cada torre em cada um dos pontos de observação contidos na tubulação. A lista 4.1 ilustra um exemplo em que o número de caracteres do argumento da fonte é menor que 80 e a lista 4.2 ilustra um exemplo em que o argumento da fonte é maior que 80. Cada nó com o prefixo T nesse exemplo representa a corrente fluindo para o solo através do resistor equivalente ao sistema de aterramento da respectiva torre e os números associados às correntes são as respostas impulsoriais da função de Green implementada externamente ao ATP.

Lista 4.1: Cartão ATP de uma fonte TACS.

| C | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|--|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 | | | | | | | |
| 98L153 | =T593*0.1204625+T608*0.1129079+T623*0.1044525+T668*.09774049 | | | | | | | |

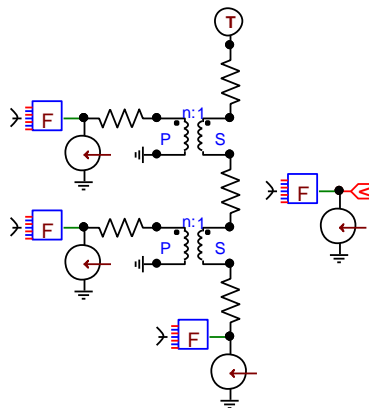
Lista 4.2: Cartão ATP com mais de 80 caracteres de uma fonte TACS.

| C | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|--|---|---|---|---|---|---|---|
| C | 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 | | | | | | | |
| 98L531 | =T8*.08325831+T98*.09448108+T158*0.1079722+T233*0.1272514+T308*0.15414+T368*0.1836 | | | | | | | |

Na lista 4.2 o argumento +T368*0.1836 não é computado, inclusive podendo conduzir o programa a erros em tempo de execução.

Para contornar esse problema, utiliza-se da solução da fonte controlada com um transformador, descrita na seção 3.3.2. Colocam-se em série as fontes de tensão controladas com uma resistência qualquer, e, assim, consegue-se somar mais variáveis multiplicadas pela função de Green. A Figura 4.4 ilustra a ideia.

Figura 4.4: Solução para limitação de caracteres do cartão ATP utilizando transformadores.



Fonte: Autoria própria.

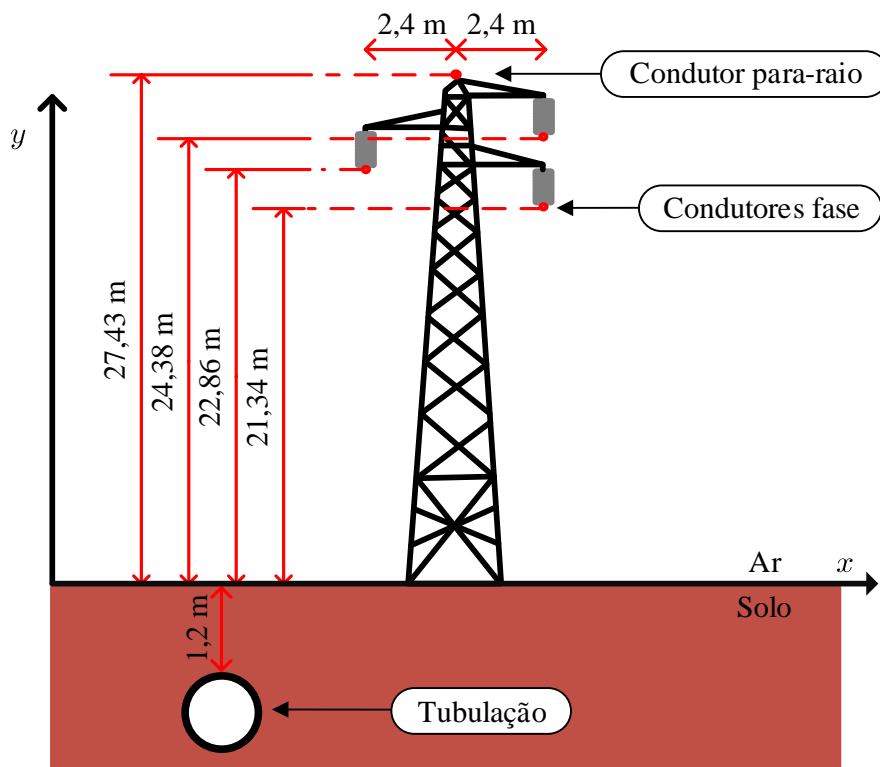
4.4 ESTUDO DE CASO SIMPLES EM SITUAÇÃO DE FALTA

O estudo de caso a seguir tem como objetivo validar a implementação do modelo modificado da tubulação apresentado na seção 2.4.1 junto com a implementação da solução de Tsiamitros e de Green no ATP. Um solo multicamadas é utilizado e a tubulação é considerada aterrada em suas extremidades. É considerada um geometria de cruzamento ligeiramente distinta do que se considerou na seção precedente, o que se faz com o objetivo de conferir maior variabilidade aos testes realizados, validando, dessa forma, a implementação proposta sob diferentes condições. Em seguida será desenvolvido um estudo de caso real.

4.4.1 Dados do sistema

O sistema é descrito por parâmetros similares aos do caso desenvolvido no capítulo anterior. O sistema consiste em uma falta em uma LT de transmissão de 88 kV com um comprimento de vão de 101 m. Cada torre é do tipo autoportante com resistência de aterramento de 10Ω , cujas dimensões são representados na Figura 4.5.

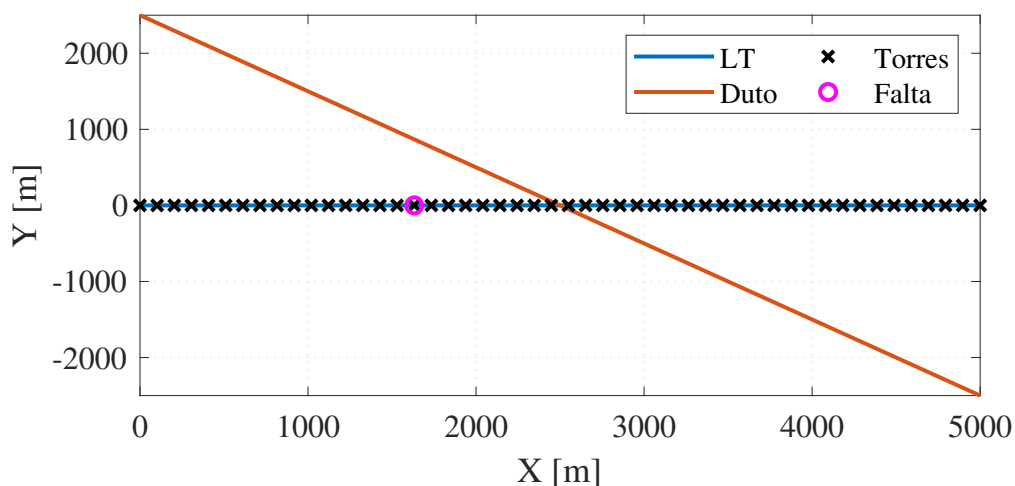
Figura 4.5: Seção transversal da torre do estudo de caso simples em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

Uma tubulação subterrânea reta cruza a LT em um ângulo de 45° no ponto 2500 m da linha, a qual opera em uma corrente de carregamento de 100 A por fase, em condições nominais. As subestações possuem resistência de aterramento de $0,1 \Omega$. A falta ocorre na torre de número 16, localizada em 1632 m ao longo do eixo da LT. A geometria do sistema está representada na Figura 4.6.

Figura 4.6: Vista superior do estudo de caso simples em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

Parâmetros dos condutores utilizados estão descritos na Tabela 4.2, os parâmetros do duto estão descritos na Tabela 4.3 e os parâmetros do solo estão descritos na Tabela 4.4.

Tabela 4.2: Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso simples em situação de falta.

| Condutor | Raio externo [m] | Resistência AC [Ω/km] | Reatância [Ω/km] |
|------------|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Grosbeak | 0,025705 | 0,0922115 | 0,256067 |
| 3/8 EHS-AG | 0,4572 | 4,86472 | 1,28686 |

Tabela 4.3: Parâmetros do duto para o estudo de caso simples em situação de falta.

| | |
|--|-----------------------|
| Raio interno [m] | 0,101359 |
| Raio externo [m] | 0,109538 |
| Profundidade do duto enterrado [m] | 1,5 |
| Resistividade do metal [$\Omega \cdot \text{m}$] | $1,72 \times 10^{-7}$ |
| Permeabilidade relativa do metal | 300 |
| Espessura do revestimento isolante [cm] | 0,3 |
| Resistividade do revestimento isolante [$\Omega \cdot \text{m}$] | 10^8 |

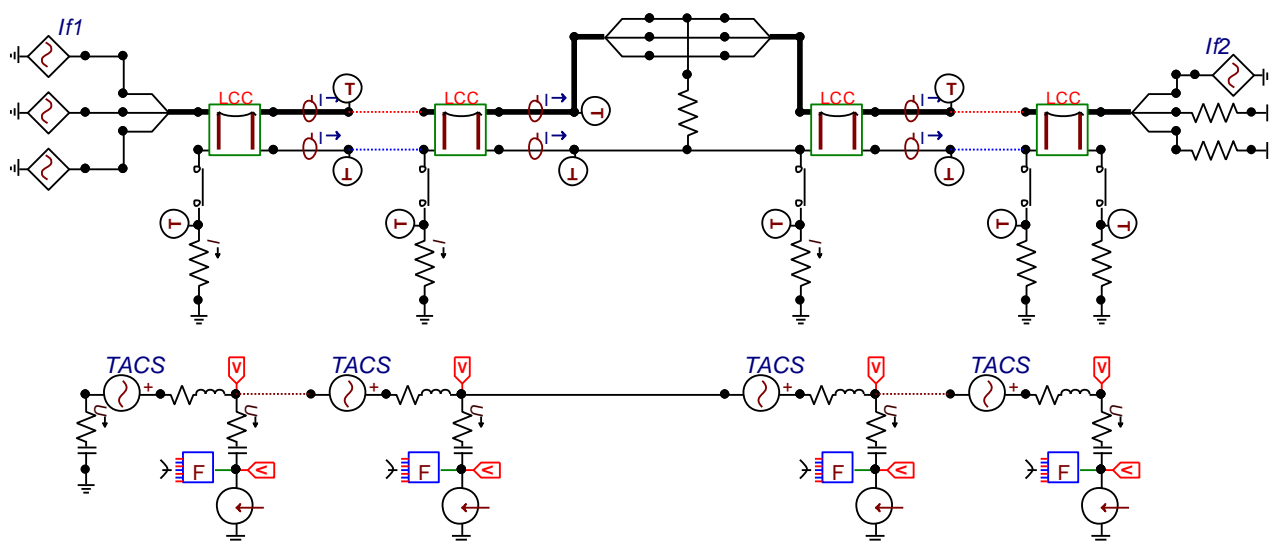
Tabela 4.4: Parâmetros do solo para o estudo de caso simples em situação de falta.

| Camada | ρ [$\Omega.m$] | h [m] |
|--------|-----------------------|----------|
| 1 | 263,89 | 1,38 |
| 2 | 491,24 | 9,96 |
| 3 | 280,04 | ∞ |

4.4.2 Modelo no ATP

O modelo que representa o sistema no ATP está descrito na Figura 4.7. Cada vão da LT é representado por um bloco LCC conectado a três fases e um para-raio. Na extremidade de cada bloco LCC a resistência de aterramento é colocada para cada torre e para cada subestação.

Figura 4.7: Modelagem do sistema no ATPDraw do caso simples em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

O modelo do duto é construído de acordo com o modelo de duto modificado descrito na seção 2.4.1. O modelo de cálculo é baseado na subdivisão do sistema em segmentos de paralelismos equivalentes. Fontes TACS são utilizadas para representar a tensão induzida pelo acoplamento indutivo, que também ocorre simultaneamente em condições de curto-circuito, e a elevação de potencial do acoplamento condutivo, utilizando a solução descrita na seção 4.3.1. A fonte TACS do acoplamento condutivo inclui os efeitos de acoplamento de todas as torres em cada ponto de subdivisão do duto.

Como o objetivo desta simulação é avaliar somente o regime permanente de falta (isto é,

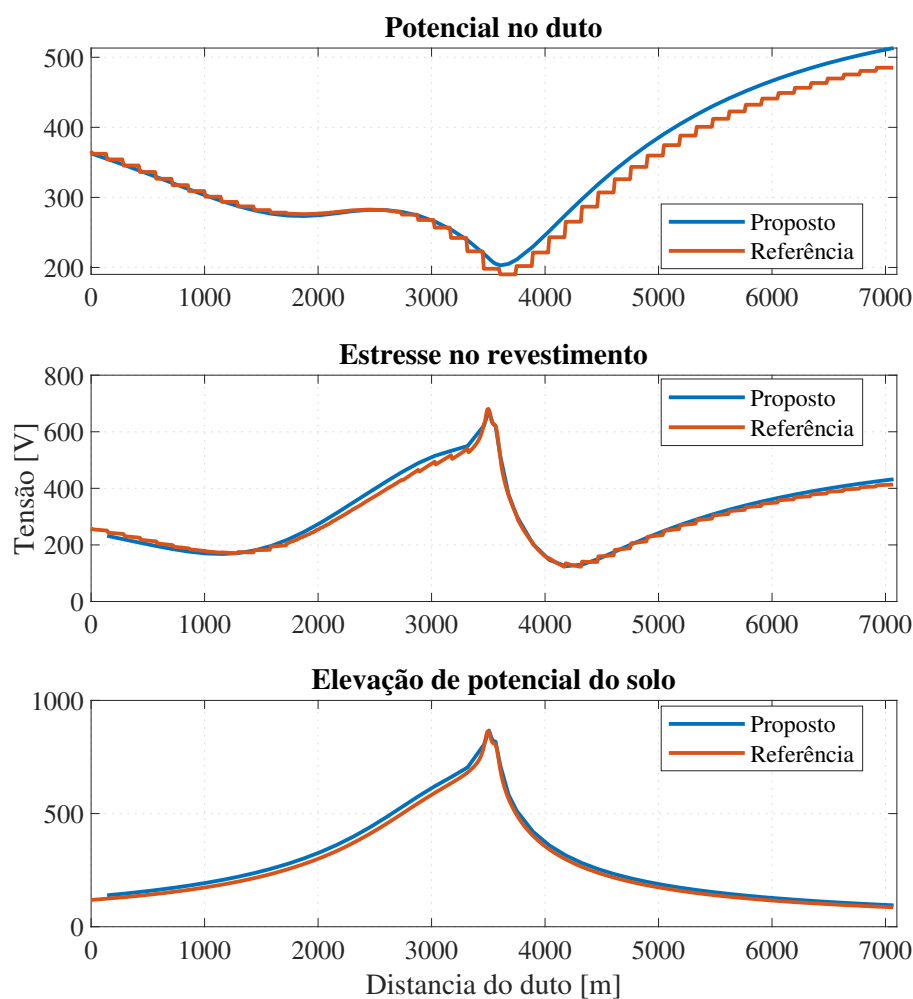
os efeitos transitórios subsequentes ao chaveamento da falta não são o objeto de interesse), são dadas como premissas as contribuições de corrente das subestações representadas pelas fontes $I_{f1} = 6 \text{ kA}$ e $I_{f2} = 3 \text{ kA}$.

4.4.3 Resultados da simulação em situação de falta

A simulação assume regime permanente pós-falta, ou seja, a falta é chaveada no ATP em $t = -1$. A simulação pretende analisar todas as tensões envolvidas devido aos acoplamentos indutivo e condutivo usando o ATP.

Para validação do modelo circuital é utilizado o programa profissional de referência CDEGS, que permite calcular os potenciais induzidos na tubulação subterrânea considerando um solo de múltiplas camadas.

Figura 4.8: Tensões induzidas na tubulação para falta na torre 16.

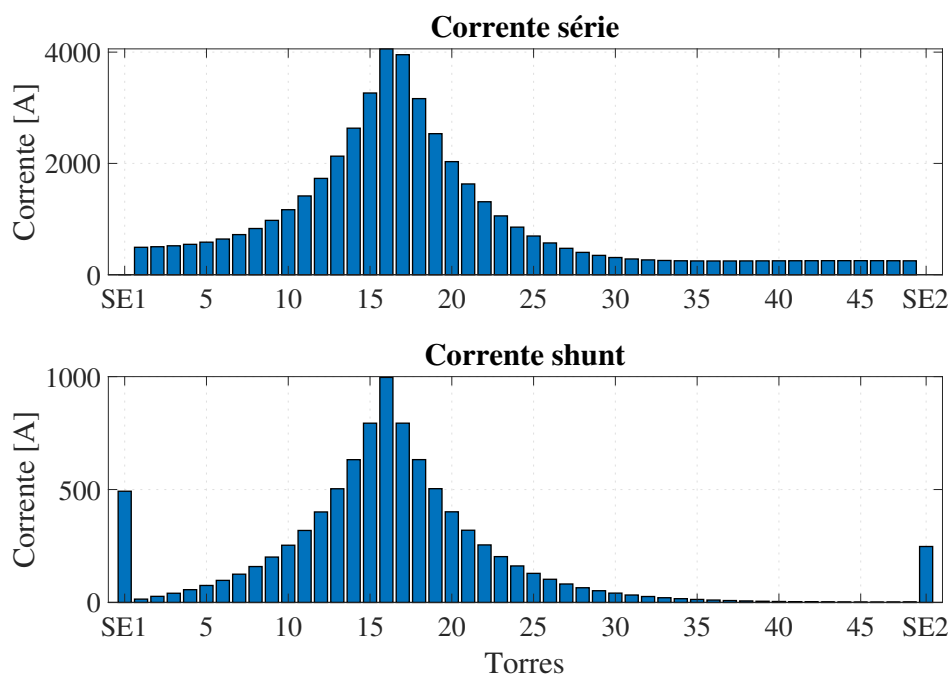


Fonte: Autoria própria.

O potencial transferido para o duto, o estresse no revestimento e a elevação de potencial do solo são representadas na Figura 4.8. Os resultados obtidos têm uma boa concordância com os valores de referência, com erros RMS normalizados de 5,07% para o potencial transferido, 2,63% para o estresse no revestimento e 2,53% para a elevação de potencial do solo. A curva do estresse, com valores máximo e mínimo de, respectivamente, 676 V e 124 V, pode representar riscos reais à integridade do revestimento e, também, à segurança de pessoas. O pico de tensão do estresse no revestimento ocorre em 3521 m ao longo do duto, no ponto do cruzamento com a LT.

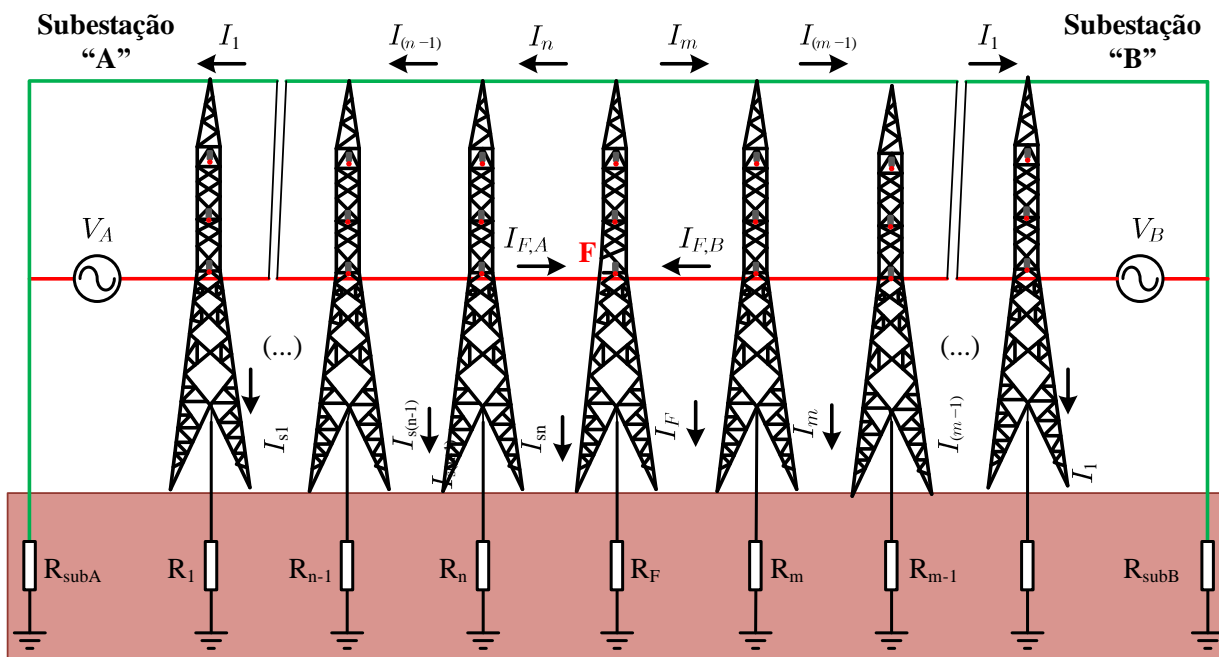
As correntes série e *shunt* do para-raio estão representadas na Figura 4.9. A torre 16 em que a falta é simulada, apresenta o maior valor de corrente *shunt* e série, porém o ponto de pico da elevação de potencial é próximo à torre 24. A torre 24 é a torre mais próxima da tubulação alvo e, assim, tem maior influência sobre o potencial no solo. A figura 4.10 ilustra a distribuição de correntes de forma que a resistência do caminho que a corrente injetada no solo da subestação pode ser menor que a resistência das torres, o que explica as correntes *shunts* serem maiores nas subestações nesse estudo de caso.

Figura 4.9: Correntes em cada torre do estudo de caso simples em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.10: Figura representativa das distribuições de correntes.

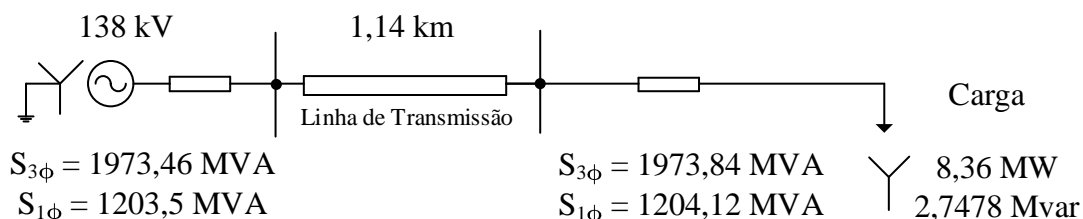


Fonte: adaptado de Martins-Britto (2020).

4.5 ESTUDO DE CASO REAL EM SITUAÇÃO DE FALTA

Os parâmetros do sistema consistem nos mesmos do estudo de caso real do capítulo anterior porém são apresentados dados complementares a mais para o estudo de falta. A Figura 4.11 ilustra o digrama de linha dupla do sistema que consiste em uma LT de 138 kV conectada a uma carga com ligação Y, fator de potência 0,95 e de corrente nominal de 780 A. A linha se estende por 1,14 km da conexão do terminal até a carga. Os parâmetros de curto-circuito são considerados como premissa e foram obtidos a partir de consulta às base de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

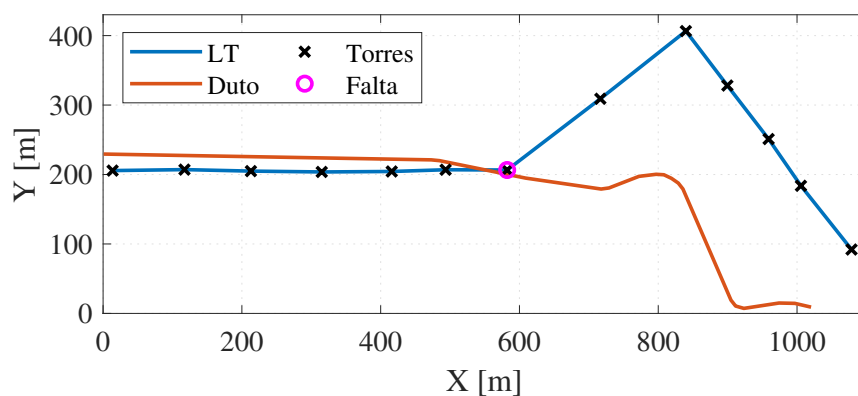
Figura 4.11: Diagrama unifilar do sistema de potência real.



Fonte: Autoria própria.

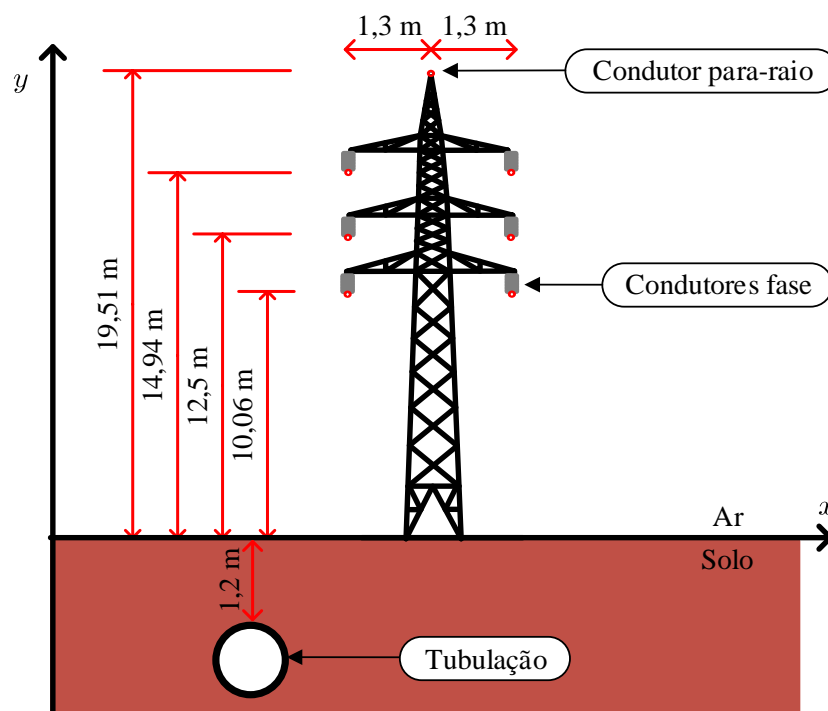
A Figura 3.14 ilustra a geometria do sistema, o qual é composto por dois circuitos fase e um para-raio, sendo a seção transversal da torre ilustrada na Figura 4.13. Os condutores utilizados são Grosbeak para as fases e 3/8” tipo HS-AG para o para-raio, conforme características apresentadas na Tabela 4.5. A falta ocorre na torre de número sete que é a torre mais próxima da tubulação para obter o pior cenário possível. Cada torre possui uma resistência de aterramento de 15Ω e as subestações possuem uma resistência de 1Ω , sendo a seção transversal da torre ilustrada na Figura 4.13.

Figura 4.12: Vista superior do caso real em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.13: Seção transversal da torre do estudo de caso real em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.5: Parâmetros dos condutores da LT para o estudo de caso real em situação de falta.

| Condutor | Raio externo [m] | Resistência AC [Ω/km] | Reatância [Ω/km] |
|-----------|------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Grosbeak | 0,025705 | 0,0922115 | 0,256067 |
| 3/8 HS-AG | 0,004572 | 4,7907 | 1,33595 |

A estrutura interferida pela LT é um gasoduto com 14” de diâmetro instalado na primeira camada de um modelo estratificado em três camadas e suas características estão descritas nas Tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6: Parâmetros do duto para o estudo de caso real em situação de falta.

| | |
|--|-----------------------|
| Raio interno [m] | 0.168275 |
| Raio externo [m] | 0.1778 |
| Profundidade do duto enterrado [m] | 1,2 |
| Resistividade do metal [$\Omega.\text{m}$] | $1,72 \times 10^{-7}$ |
| Permeabilidade relativa do metal | 300 |
| Espessura do revestimento isolante [cm] | 0,3 |
| Resistividade do revestimento isolante [$\Omega.\text{m}$] | 10^8 |

Tabela 4.7: Parâmetros do solo para o estudo de caso real em situação de falta.

| Camada | ρ [$\Omega.\text{m}$] | h [m] |
|--------|------------------------------|----------|
| 1 | 488.71 | 1.73 |
| 2 | 2074.66 | 8.99 |
| 3 | 451.45 | ∞ |

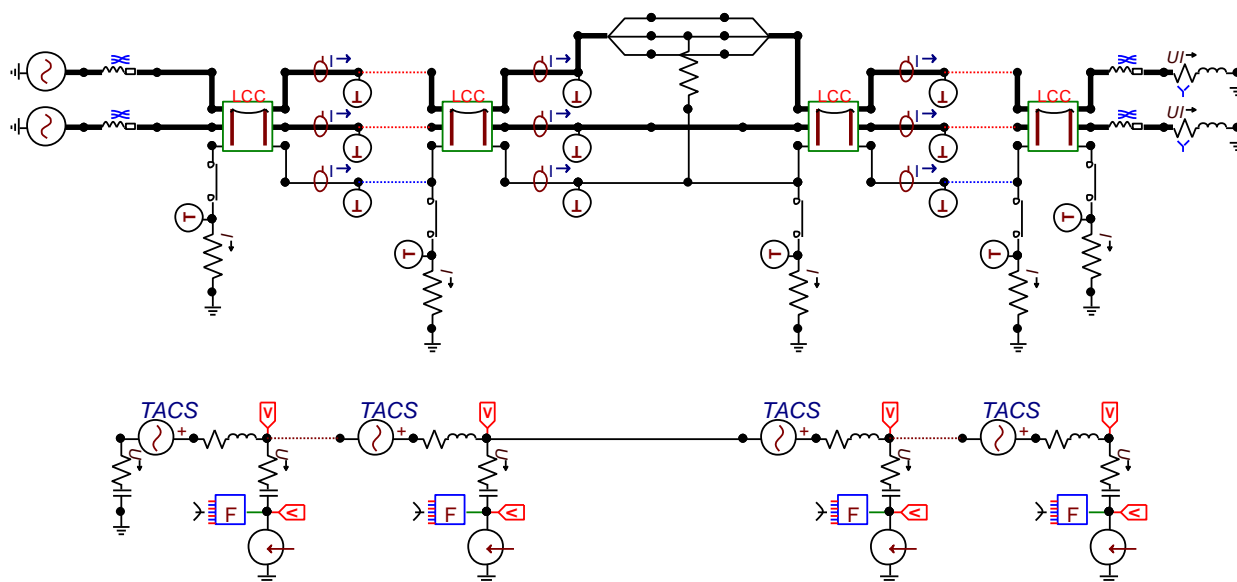
4.5.1 Modelo no ATP

O modelo que representa o sistema no ATP está descrito na Figura 4.14. O modelo é composto por uma fileira de blocos LCC de seis fases e um para-raio, em que cada bloco possui os parâmetros de linha dos respectivos vãos entre as torres. Adjunto aos blocos LCC, a resistência de aterramento é colocada para cada torre e para cada subestação. Os mesmos métodos de modelagem da tubulação no ATP do estudo de caso da seção anterior 4.4 foram utilizados nesta simulação.

A energização consiste em duas fontes de tensão trifásicas associados aos equivalentes de Thévenin representativos dos níveis de curto-circuito nos terminais da LT. A carga indutiva é calculada com as especificações do sistema e é colocada no final da linha. A falta é do tipo

fase-terra, simulada por meio de um curto entre a fase B e o para-raios, por serem os condutores mais próximos na silhueta da torre. A impedância de falta é de $0,001 \Omega$.

Figura 4.14: Modelo no ATPDraw do estudo de caso real em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

4.5.2 Resultados da simulação em situação de falta

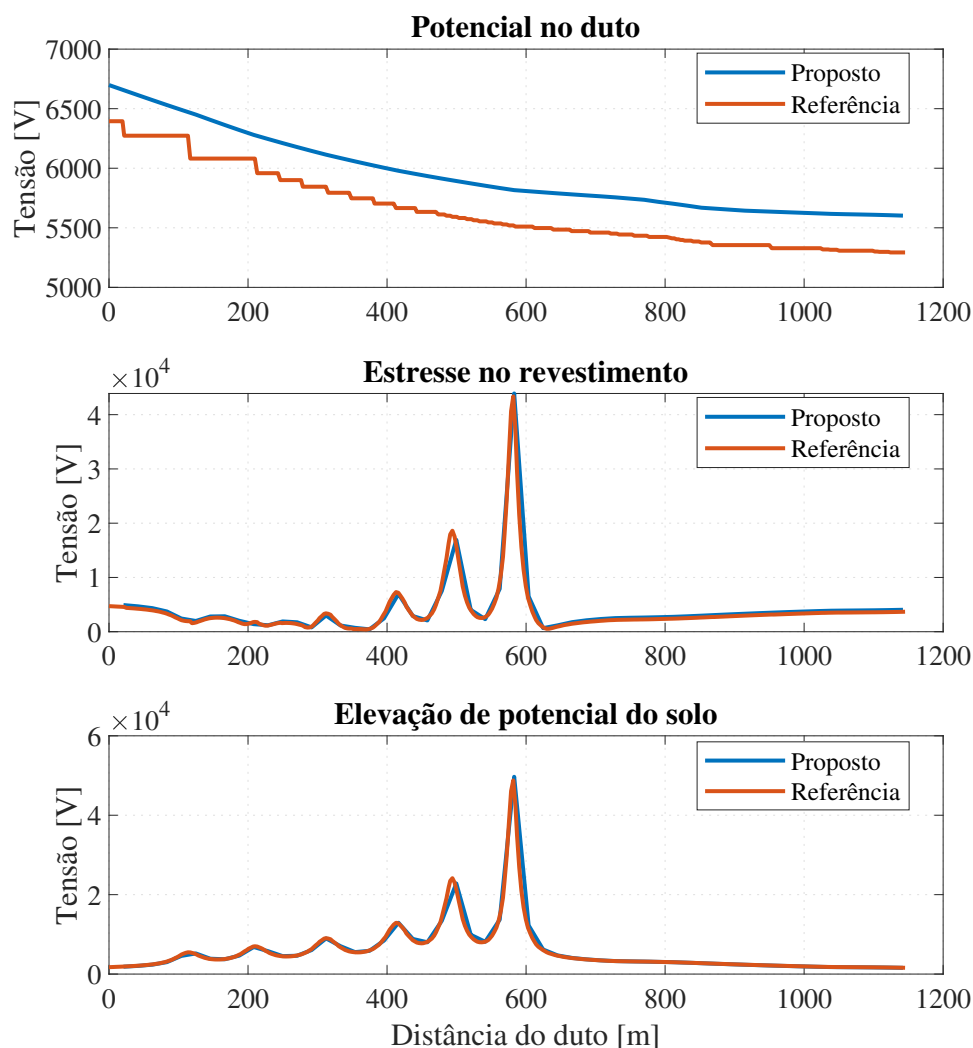
A simulação assume regime permanente em uma condição de falta. A simulação pretende analisar todas as tensões envolvidas devido aos acoplamento indutivo e condutivo usando o EMTP/ATP.

Assim como as simulações anteriores, para fins de validação, o programa profissional de referência CDEGS é utilizado.

O potencial transferido para o duto, o estresse no revestimento e a elevação de potencial do solo são representadas na Figura 4.15. Os resultados obtidos de elevação de potencial do solo e de estresse no revestimento têm uma boa concordância com os valores de referência com erros RMS normalizados de 1,42 % para o estresse no revestimento e de 1,21% para a elevação de potencial do solo. O potencial transferido possui um erro RMS normalizado de 21,17 %, contudo é mais apropriado utilizar o erro relativo em cada ponto por ser um gráfico de valores aproximadamente constantes. Quando se considera o erro relativo, um valor de aproximadamente 5,5% é obtido, como é ilustrado na Figura 4.16. O erro absoluto aproximadamente constante

ao redor do gráfico faz com que o erro RMS seja mais elevado.

Figura 4.15: Tensões induzidas na tubulação para falta na torre sete.



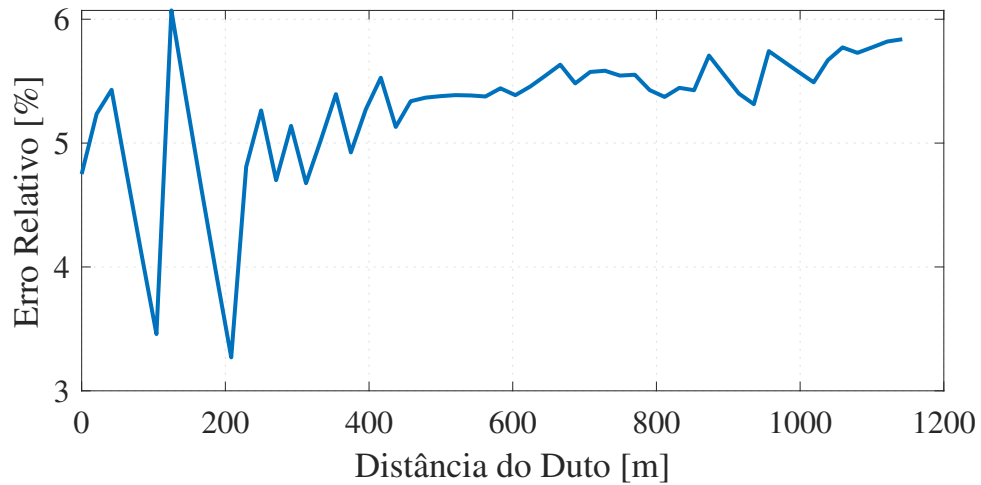
Fonte: Autoria própria.

O estresse no revestimento, com valor máximo 43905 V, no ponto da tubulação mais próximo da torre, é consideravelmente maior que o valor da tensão induzida em regime permanente, e excede os limites de segurança preceituados para a tubulação interferida, bem como o limite de isolamento nominal de 25 kV do revestimento utilizado na instalação real, podendo levar à ruptura da rigidez dielétrica do revestimento. Contudo, o tempo de duração da falta é um fator determinante para ter uma análise completa dos riscos a estrutura do gasoduto.

As correntes série e *shunt* dos para-raios estão representadas na Figura 4.9. A torre sete, em que ocorreu a falta, possui o maior valor de corrente *shunt* e série. Essa simulação obteve valores de tensão bem mais elevados, em virtude das magnitudes das correntes de contribuição

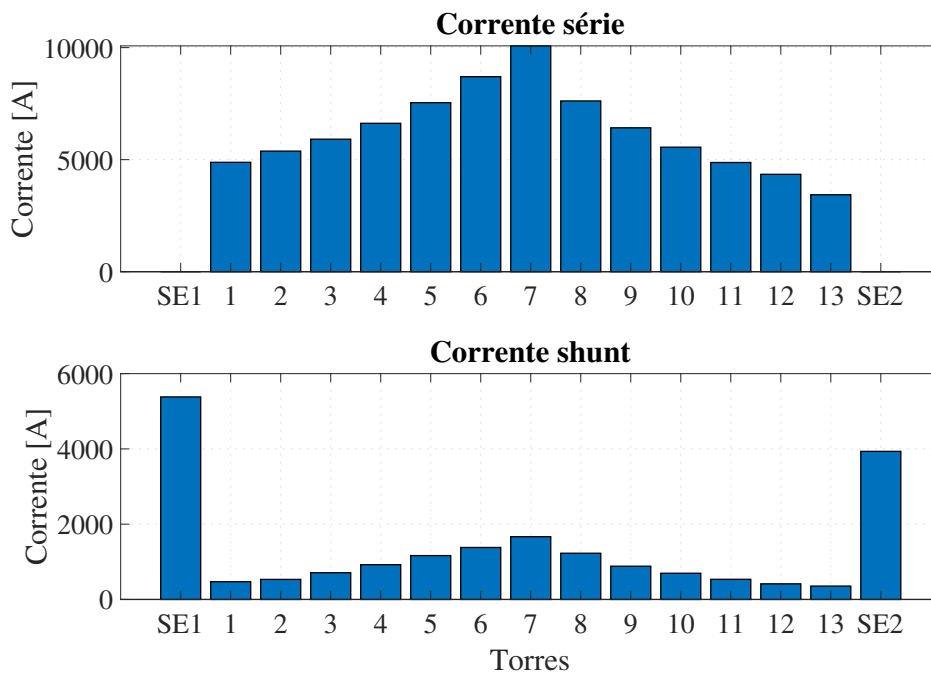
ao curto-circuito, assim como das componentes injetadas no solo pelos aterramentos das torres e da proximidade.

Figura 4.16: Erro relativo do potencial no duto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.17: Correntes em cada torre no estudo de caso real em situação de falta.



Fonte: Autoria própria.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo abordou a função de Green generalizada para um solo estratificado e aplicações em simulações de acoplamento condutivo entre LTs e tubulações.

A validação obteve ótimos resultado com erros inferiores a 9,9%. Foram expostas as principais dificuldades encontradas para inclusão do modelo de acoplamento condutivo na estrutura de dados do ATP, com as respectivas soluções de engenharia implementadas e testadas. Por último, foram executados estudos de casos envolvendo simulações de curto-circuito na LT interferente, por meio dos quais se evidenciou os principais aspectos de segurança e riscos envolvidos.

Assim como o capítulo anterior, todas as simulações realizada via ATP foram realizadas via programação do cartão ATP, sendo o ATPDraw utilizado na construção dos circuitos mostrados no decorrer deste capítulo para fins unicamente ilustrativos.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões desse trabalho, assim como algumas propostas de trabalhos futuros a serem desenvolvidos pelo autor.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentados os fundamentos de interferências eletromagnéticas que ocorrem em tubulações subterrâneas acopladas a LT, os riscos de segurança à pessoas e possíveis danos a estrutura metálica das tubulações.

Ao implementar o modelo circuital de interferência entre LTs e tubulações utilizando uma solução de impedância mútua para solo estratificado, bons resultados foram obtidos, tanto na validação da solução de impedância mútua como nos estudos de casos realizados. Erros menores que 8% foram encontrados quando comparado ao programa de referência CDEGS e erros superiores a 23% foram encontrados quando comparados com resultados aproximados por meio de um modelo de solo uniforme, o que demonstra que utilizar o modelo de solo estratificado é mais realista e acarreta maior precisão nos resultados.

A respeito da implementação da função de Green e do modelo circuital que simula acoplamento condutivo, erros menores que 10% foram observados tanto na validação quanto nos estudos de caso.

Foram encontrados diversos desafios na implementação, em ambiente ATP, do modelo circuital e métodos matemáticos descritos neste trabalho, para os quais se propuseram soluções de engenharia interessantes, resultando em uma metodologia final válida e precisa.

Finalmente, a implementação proposta pode ser aprimorada e ser utilizada para estudos de trabalhos futuros. O autor pretende tratar dos seguintes assuntos:

- Melhorar o tempo de processamento dos dados a serem escritos no cartão ATP.
- Aplicações do modelo circuital implementado em estudos transitórios de faltas em LT.
- Aplicações do modelo circuital implementado em estudos transitórios de descargas atmosféricas.

- Implementar todas as soluções teóricas em apenas um bloco LCC sem a necessidade de utilizar fontes controladas.
- Implementar uma rotina própria para simulação de transitórios eletromagnéticos, permitindo a execução de simulações de interferências no domínio do tempo sem dependência do ambiente ATP.

REFERÊNCIAS

- ABNT. *NBR 7117 - Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo*. 2012. 1–72 p. Cited in page 7.
- ABNT. *NBR 15751 - Sistemas de Aterramento de Subestações - Requisitos*. 2013. 1–47 p. Cited in page 19.
- CARSON, J. R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. *Bell Syst. Tech. J.*, v. 5, p. 539–554, 1926. Cited 2 times in pages 9 and 21.
- 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, 2003. ISSN 03787796. Cited in page 1.
- CIGRÉ WG-36.02. *Technical Brochure n. 95 - Guide on the Influence of High Voltage AC Power Systems on Metallic Pipelines*. Paris: CIGRÉ, 1995. 1–135 p. Cited 10 times in pages 1, 4, 9, 11, 12, 13, 14, 17, 29, and 30.
- CROZIER, R.; MUELLER, M. A New MATLAB and Octave Interface to a Popular Magnetics Finite Element Code. In: *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Lausanne, Switzerland: IEEE, 2016. p. 1251–1256. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7732685>>. Cited in page 24.
- DABKOWSKI, J. I. R. I.; TAFLOVE, A. *Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines And Gas Transmission Pipelines Volume 2: Prediction and Mitigation Procedures*. 1978. 1–186 p. Cited in page 17.
- DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. Impedance-based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application. *IEEE Access*, v. 2, p. 537–557, 2014. ISSN 21693536. Cited in page 2.
- DAWALIBI, F. P.; DONOSO, F. Integrated Analysis Software for Grounding, EMF, and EMI. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 6, n. 2, p. 19–24, 1993. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/207467>>. Cited 2 times in pages 3 and 33.
- DÉRI, Á.; TEVAN, G. Mathematical verification of dubanton's simplified calculation of overhead transmission line parameters and its physical interpretation. *Archiv für Elektrotechnik*, Springer, v. 63, n. 4, p. 191–198, 1981. Cited in page 11.
- DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. [S.l.]: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996. Cited in page 11.
- ELKATEB, T.; CHALATURNYK, R.; ROBERTSON, P. K. An Overview of Soil Heterogeneity: Quantification and Implications on Geotechnical Field Problems. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 40, p. 1–15, 2003. Cited in page 6.

HE, J.; ZENG, R.; ZHANG, B. *Methodology and Technology for Power System Grounding*. Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013. 1–566 p. ISBN 9781118255001. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118255001>>. Cited 3 times in pages 2, 6, and 40.

IEEE. *Guide for Safety In AC Substation Grounding*. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2000. 202 p. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7109076>>. Cited 3 times in pages 1, 6, and 33.

International Telecommunication Union. *Directives Concerning the Protection of Telecommunication Lines Against Harmful Effects from Electric Power and Electrified Railway Lines*. Geneva: [s.n.], 1989. Cited in page 11.

LI, Z.-x.; FAN, J.-b.; CHEN, W.-j. Numerical Simulation of Substation Grounding Grids Buried in both Horizontal and Vertical Multilayer Earth Model. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v. 69, n. August 2006, p. 2359–2380, 2007. Cited 3 times in pages 2, 18, and 40.

MARTINS-BRITTO, A. RTFS - Realistic Transmission Line Fault Simulator (<https://github.com/amaurigmartins/rtfs/releases/tag/1.0.0.1>), github. retrieved may 25, 2021. 2021. Cited in page 4.

MARTINS-BRITTO, A. G. *Modeling of the Electromagnetic Interferences between Power Lines and Underground Metallic Pipelines and Impact Analysis*. 121 p. Tese (Master's Thesis) — University of Brasília, 2017. Cited 2 times in pages 13 and 14.

MARTINS-BRITTO, A. G. *Realistic Modeling of Power Lines for Transient Electromagnetic Studies*. 187 p. Tese (Doctoral Thesis) — University of Brasília, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unb.br/handle/10482/39434>>. Cited 4 times in pages 1, 2, 18, and 52.

MARTINS-BRITTO, A. G.; LOPES, F.; RONDINEAU, S. Multi-layer Earth Structure Approximation by a Homogeneous Conductivity Soil for Ground Return Impedance Calculations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 35, n. 2, p. 881–891, 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8770107>>. Cited in page 2.

MARTINS-BRITTO, A. G.; MORAES, C. M.; LOPES, F. V. Inductive Interferences Between a 500 kV Power Line and a Pipeline with a Complex Approximation Layout and Multilayered Soil. 2021. Cited in page 32.

MUALEM, Y. Anisotropy of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 48, n. 3, p. 505, 1984. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800030007x>>. Cited in page 6.

NACE. *SP0177-2007 - Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems*. 2007. 1–25 p. Cited 2 times in pages 34 and 38.

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, 1973. ISSN 00203270. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/piee.1973.0312>>. Cited 3 times in pages 2, 11, and 21.

- POLLACZEK, F. On the Field Produced by an Infinitely Long Wire Carrying Alternating Current. *Electrische Nachrichtentechnik*, III, n. 9, p. 339–359, 1926. Cited 2 times in pages 11 and 21.
- QI, L.; YUAN, H.; LI, L.; CUI, X. 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, 2013. Cited in page 1.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning: Physics and Effects*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. 706 p. ISBN 9780521583275. Cited in page 23.
- SADIKU, M. N. *Numerical Techniques in Electromagnetics*. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2000. 760 p. ISBN 9781420063097. Cited in page 40.
- SENEFF, H. L. Study of the Method of Geometric Mean Distances Used in Inductance Calculations. 1947. Cited in page 16.
- SHAMPINE, L. Vectorized adaptive quadrature in matlab. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, v. 211, n. 2, p. 131–140, 2008. ISSN 0377-0427. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037704270600700X>>. Cited 2 times in pages 23 and 43.
- 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. ISSN 0368-3842. Cited in page 17.
- TAKAHASHI, T.; KAWASE, T. Analysis of Apparent Resistivity in a Multi-Layer Earth Structure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 5, n. 2, p. 604–612, 1990. Cited in page 8.
- TSIAMITROS, D. A.; CHRISTOFORIDIS, G. C.; PAPAGIANNIS, G. K.; LABRIDIS, D. P.; DOKOPOULOS, P. S. Earth conduction effects in systems of overhead and underground conductors in multilayered soils. Cited in page 2.
- TSIAMITROS, D. A.; PAPAGIANNIS, G. K.; DOKOPOULOS, P. S.; POWER, A. O.; LINES, T. Earth Return Impedances of Conductor Arrangements in Multilayer Soils - Part II : Numerical Results. v. 23, n. 4, p. 2401–2408, 2008. Cited 3 times in pages 2, 11, and 21.
- WENNER, F. A Method for Measuring Earth Resistivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, v. 5, n. 16, p. 561–563, 1915. Cited in page 7.
- WHELAN, J. M.; HANRATTY, B.; MORGAN, E. Earth Resistivity in Ireland. In: *CDEGS Users' Group*. Montreal: Safe Engineering Services - SES, 2010. p. 155–164. Cited in page 6.
- ZHANG, B.; CUI, X.; LI, L.; HE, J. Parameter Estimation of Horizontal Multilayer Earth by Complex Image Method. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2 II, p. 1394–1401, 2005. ISSN 08858977. Cited in page 7.