



DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL E
ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGATÓRIAS NÃO CONVENCIONAIS EM REGIÕES COM
RESTRIÇÕES AMBIENTAIS

Vitor Rocha de Almeida Rego Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Rio de Janeiro
Novembro de 2020

DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL E
ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGATÓRIAS NÃO CONVENCIONAIS EM REGIÕES COM
RESTRICÇÕES AMBIENTAIS

Vitor Rocha de Almeida Rego Lima

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Aprovada por: Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima

Prof. Rafael Silva Alípio

Prof. Robson Francisco da Silva Dias

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
NOVEMBRO DE 2020

Lima, Vitor Rocha de Almeida Rego

Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Ferramenta Computacional e Análise de Medidas Mitigatórias Não Convencionais em Regiões com Restrições Ambientais/
Vitor Rocha de Almeida Rego Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XV, 104 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 95-101.

1. Linhas de Transmissão. 2. Transitórios Eletromagnéticos. 3. Desempenho frente a Descargas Atmosféricas. 4. Sistemas de Aterramento. I. Lima, Antonio Carlos Siqueira. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o princípio de tudo, por ter me proporcionado e continuar a proporcionar tanta força durante essa longa e densa jornada.

Aos meus pais Edmundo e Delma, obrigado pelo imensurável apoio, carinho e compreensão que sempre me deram ao longo dos anos. Sem vocês com certeza eu não chegaria até aqui.

A minha esposa Patrícia pelo carinho e pela compreensão durante o período que dediquei à elaboração desta dissertação. Agradeço o incentivo e as palavras de apoio, que certamente foram fundamentais para que eu conseguisse seguir em frente.

Ao professor e orientador Antonio por ter me aceitado como seu aluno e pela sua orientação precisa que possibilitou a conclusão deste trabalho e meu amadurecimento acadêmico.

Aos colegas da Marte Engenharia pelo convívio, troca de conhecimentos e experiências que possibilitam meu crescimento como profissional.

A todos os meus amigos e colegas que de alguma forma estiveram presentes em minha vida, me dando o apoio necessário para que na minha caminhada houvesse sucesso.

*“Nossa maior fraqueza está em desistir.
O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez.”*

Thomas Edison

“Enquanto há vida, há esperança.”

(Eclesiastes 9:4)

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL E
ANÁLISE DE MEDIDAS MITIGATÓRIAS NÃO CONVENCIONAIS EM REGIÕES COM
RESTRICÇÕES AMBIENTAIS

Vitor Rocha de Almeida Rego Lima

Novembro/2020

Orientador: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Programa: Engenharia Elétrica

As descargas atmosféricas representam o principal fator responsável pelos desligamentos não programados das linhas de transmissão. A avaliação do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é fundamental e representa, portanto, uma área de pesquisa de grande relevância para o sistema elétrico. Devido à complexidade e a atuação simultânea de diversos elementos do sistema, as ferramentas tradicionalmente utilizadas para mensurar o desempenho de uma linha de transmissão na ocasião da incidência de uma descarga atmosférica apresentam aproximações e limitações que podem desviar os resultados do fenômeno real.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma ferramenta computacional capaz de simular as sobretensões obtidas na ocasião de uma descarga atmosférica em uma estrutura e apresentar o número de desligamentos estimado para uma linha de transmissão, incluindo uma modelagem precisa do sistema de aterramento. Uma extensa revisão bibliográfica é realizada sobre os principais trabalhos publicados na literatura técnica sobre a modelagem de cada um dos elementos necessários para a elaboração desta ferramenta. Por fim, a ferramenta computacional é utilizada para obter diversos resultados de interesse prático, contemplando simulações de sistemas reais com diferentes topologias de sistemas de aterramento instalados em áreas com restrições ambientais, como também, medidas mitigatórias não convencionais como a instalação de cabos para-raios adicionais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

LIGHTNING FLASH PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES: DEVELOPMENT
OF A COMPUTATIONAL TOOL AND ANALYSIS OF NON-CONVENTIONAL
MITIGATORY MEASURES IN REGIONS WITH ENVIRONMENTAL RESTRICTIONS

Vitor Rocha de Almeida Rego Lima

November/2020

Advisor: Antonio Carlos Siqueira de Lima

Department: Electrical Engineering

Lightning strikes represent the main factor responsible for non-scheduled transmission lines outages. The evaluation of the performance of the transmission lines against lightning strikes is fundamental and represents, therefore, an area of research of great relevance for the electrical system. Due to the complexity and the simultaneous performance of several elements of the system, the tools traditionally used to measure the performance of a transmission line at the time of the incidence of a lightning flash present approximations and limitations that can deviate the results of the real phenomenon.

In this context, the present work presents a computational tool capable of simulating the overvoltages obtained during an lightning flash in a structure and presenting the estimated number of outages of the transmission line, including an accurate modeling of the grounding system. An extensive bibliographic review is made on the main works published in the technical literature regarding the modeling of each of the elements needed for the elaboration of this tool. Finally, the computational tool is used to obtain several results of practical interest, including simulations of real systems with different grounding systems topologies installed in areas with environmental restrictions, as well as unconventional mitigation measures such as the installation of additional ground wires.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Abreviaturas.....	xv
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações Iniciais	1
1.2 Objetivo do Trabalho	1
1.3 Organização do Texto	3
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS BÁSICOS ACERCA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	5
2.1 Introdução	5
2.2 Tipificação	5
2.3 Processo de Formação das Descargas Descendentes Negativas	6
2.4 Nível Ceráunico	8
2.5 Densidade de Descargas para o Solo.....	10
2.6 Tipos de Desligamentos devido a Descargas Atmosféricas.....	12
2.6.1 Flashover	13
2.6.2 Backflashover	14
CAPÍTULO 3. MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA	16
3.1 Introdução	16
3.2 Forma de Onda da Corrente da Descarga Atmosférica	16
3.2.1 Modelo Função Dupla Exponencial	16
3.2.2 Modelo Somatório de Funções de Heidler.....	17
3.3 Parâmetros da Linha de Transmissão	19
3.3.1 Admitância da Linha de Transmissão.....	20
3.3.2 Impedância da Linha de Transmissão	20
3.3.3 Modelagem Adotada	23
3.4 Estruturas Metálicas	24
3.4.1 Impedância de Surto das Estruturas.....	24
3.4.2 Velocidade de Propagação nas Estruturas	26
3.5 Impedância de Aterramento	26
3.5.1 Modelos e Trabalhos Existentes	27
3.5.2 Modelagem Adotada para o Sistema de Aterramento	29
3.5.3 Ionização do Solo	34

3.6	Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência	36
CAPÍTULO 4. FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO		38
4.1	Introdução	38
4.2	Configuração do Sistema	38
4.3	Transformada Numérica de Laplace	39
4.4	Taxa de Desligamento Anual Estimada	42
4.5	Programa Desenvolvido	45
CAPÍTULO 5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS		49
5.1	Introdução	49
5.2	Considerações Iniciais	49
5.2.1	Configuração Utilizada	49
5.2.2	Densidade de Descargas para o Solo	51
5.2.3	Topologias de Sistemas de Aterramento	51
5.2.4	Parâmetros de Simulação Computacional.....	54
5.2.5	Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i>	55
5.3	Simulação da Influência da Modelagem dos Parâmetros do Solo	57
5.4	Simulação das Sobretensões nas Cadeias de Isoladores da Estrutura	61
5.5	Simulação da Influência da Topologia do Sistema de Aterramento.....	63
5.6	Simulação da Influência do Comprimento dos Cabos Contrapesos	71
5.7	Simulação da Influência dos Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i>	80
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....		90
6.1	Conclusões Gerais.....	90
6.2	Propostas de Continuidade do Trabalho.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		95
APÊNDICE A. ARQUIVOS DE DADOS DE ENTRADA DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL <i>PRTL-mHEM</i>		102
A.1	Inserção da Disposição Geométrica da Estrutura Metálica	102
A.2	Inserção dos Dados da Simulação.....	103
A.3	Inserção da Disposição Geométrica dos Cabos Contrapesos	104

Lista de Figuras

Figura 2.2-1 – Tipos de Descargas entre Nuvem e o Solo (Adaptada de [3]).....	6
Figura 2.3-1 – Distribuição de Cargas na Nuvem (Adaptada de [5])	7
Figura 2.4-1 – Curvas Isocerânicas - Mapa Mundial [7].....	9
Figura 2.4-2 – Curvas Isocerânicas – Mapa do Brasil [8].....	9
Figura 2.5-1 – Mapa Mundial de Densidades de Descargas Atmosféricas [9].....	10
Figura 2.5-2 – Mapa do Brasil de Densidades de Descargas Atmosféricas (Adaptada de [10]).....	11
Figura 2.5-3 – Densidade de Descargas Atmosféricas das Linhas de Transmissão dos Leilões da ANEEL (2001 a 2019).....	12
Figura 2.6-1 – Desenho Esquemático do <i>Flashover</i>	13
Figura 2.6-2 – Desenho Esquemático do <i>Backflashover</i>	14
Figura 2.6-3 – Momento de Ocorrência do <i>Backflashover</i> (Adaptada de [16])	15
Figura 3.2-1 – Representação da Forma de Onda da Corrente de Descarga (Morro do Cachimbo) [24]	19
Figura 3.3-1 – Disposição dos Condutores	20
Figura 3.4-1 – Formato de Estrutura Típica (Adaptada de [47])	25
Figura 3.4-2 – Modelo da Estrutura Adotado.....	26
Figura 3.5-1 – Correntes em cada Condutor [63].....	30
Figura 3.5-2 – Definição das Distâncias entre os segmentos [71].....	32
Figura 3.5-3 – Região de Ionização em um Eletrodo de Aterramento (Adaptada de [3])	35
Figura 3.5-4 – Ionização do Solo em um Sistema de Aterramento de Pequeno Porte (Adaptada de [3])	35
Figura 4.2-1 – Configuração do Sistema Adotado	39
Figura 4.4-1 – Método de Integração DE.....	43
Figura 4.5-1 – Relacionamento entre as Classes.....	45
Figura 4.5-2 – Fluxograma de Etapas da Ferramenta Computacional	48
Figura 5.2-1 – Configuração Geométrica da Estrutura Utilizada	50
Figura 5.2-2 – Cadeia de Isoladores e Distância de Arco	51
Figura 5.2-3 – Configurações da Topologia 1 do Sistema de Aterramento.....	52
Figura 5.2-4 – Configurações da Topologia 2 do Sistema de Aterramento – Comprimentos Totais de 120, 240, 360 e 540 metros	53
Figura 5.2-5 – Configurações da Topologia 3 do Sistema de Aterramento.....	54
Figura 5.2-6 – Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i>	55
Figura 5.2-7 – Configuração da Estrutura Utilizada com Para-raios <i>Underbuilt</i>	57

Figura 5.3-1 – Comparação das Modelagens do Solo e seus Parâmetros	59
Figura 5.4-1 – Comparação das Sobretensões nas Cadeias de Isoladores	62
Figura 5.5-1 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 100 ohm.m	64
Figura 5.5-2 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	65
Figura 5.5-3 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m	66
Figura 5.5-4 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m	67
Figura 5.5-5 - Sobretensões obtidas nas cadeias de Isoladores para as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	71
Figura 5.6-1 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 100 ohm.m	73
Figura 5.6-2 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	74
Figura 5.6-3 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m	75
Figura 5.6-4 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m	76
Figura 5.7-1 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 100 ohm.m	82
Figura 5.7-2 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	83
Figura 5.7-3 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m	84
Figura 5.7-4 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m	85

Lista de Tabelas

Tabela 3.2-1 – Parâmetros utilizados para Correntes da Primeira Descarga de Retorno Negativa Medidas na Estação Morro do Cachimbo e no Monte San Salvatore [25]....	18
Tabela 4.4-1 – Desempenho Exigido das LTs Frente a Descargas Atmosféricas [88]	42
Tabela 5.2-1 – Características dos Cabos Utilizados.....	50
Tabela 5.2-2 – Sistema de Aterramento – Tempos de Execução das Simulações.....	55
Tabela 5.3-1 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 100 ohm.m.....	60
Tabela 5.3-2 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m.....	60
Tabela 5.3-3 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m.....	60
Tabela 5.3-4 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m...	61
Tabela 5.4-1 – Comparação das Sobretensões nas Cadeias de Isoladores para Solos com Resistividades Distintas.....	62
Tabela 5.5-1 – Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 100 ohm.m	68
Tabela 5.5-2 – Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	68
Tabela 5.5-3 Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m	69
Tabela 5.5-4 Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m	69
Tabela 5.6-1 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 100 ohm.m	77
Tabela 5.6-2 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	77
Tabela 5.6-3 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m	78
Tabela 5.6-4 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m	78
Tabela 5.7-1 – Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 100 ohm.m	86
Tabela 5.7-2 – Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m	86
Tabela 5.7-3 Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m	87
Tabela 5.7-4 Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios <i>Underbuilt</i> - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m	87

Lista de Símbolos

Nesta dissertação os símbolos em negrito representam matrizes.

ω	Frequência angular em rad/s
h_i	Altura do condutor i acima do solo
x_{ij}	Separação horizontal entre os condutores i e j
b	Distância entre os para-raios da linha de transmissão em metros
CFO	Tensão Crítica em kV
d	Distância de arco da cadeia de isoladores em metros
d_{ij}	Distância entre o condutor i e o condutor j
D_{ij}	Distância entre o condutor i e a imagem do condutor j
e_0	Tensão mínima para iniciar o processo de ruptura do isolamento em kV
f	Frequência em Hertz
f_Ω	Maior frequência de interesse em Hertz
H_T	Altura da Torre em metros
I_0	Amplitude máxima da corrente de descarga
\mathbf{I}_{in}	Vetor de injeção de corrente
K_d	Constante utilizada no método de integração DE
L_j	Comprimento em metros do segmento j
N	Número de amostras de frequências
N_L	A incidência média de descargas atmosféricas em uma linha de transmissão
N_g	Densidade de descargas atmosféricas para o solo por km ² por ano
p	Distância complexa abaixo do solo
\mathbf{P}	Matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell
P_I	Probabilidade de ocorrência de uma corrente com valor de pico acima de I
R_a	Raio de Atração Médio em metros
T_d	Quantidade de dias com trovoadas em um ano
t	Tempo em segundos
T	Tempo total em segundos
T_{anual}	Taxa de desligamento anual
τ_1	Constantes de tempo da frente de onda
τ_2	Constantes de tempo do término do sinal
\mathbf{Y}	Matriz de admitância da linha de transmissão em ohms/m
\mathbf{Y}_c	Matriz da admitância característica
\mathbf{Y}_g	Matriz de admitância nodal
\mathbf{Y}_{system}	Matriz do Sistema adotado
\mathbf{H}	Matriz de propagação
l	Comprimento do vão em metros
\mathbf{Z}	Matriz de impedância da linha de transmissão em ohms/m

Z_{in}	Matriz de impedância interna dos condutores em ohms/m
Z_e	Matriz de impedância espacial devido ao meio externo em ohms/m
Z_g	Matriz de impedância de retorno pelo solo em ohms/m
\bar{Z}_T	Matriz da impedância transversal
\bar{Z}_L	Matriz da impedância longitudinal
r_{int}	Raio interno do condutor i
r_e	Raio externo do condutor i
r_i	Raio do condutor i
s	Frequência complexa
η	Fator de correção da amplitude da corrente
η_k	Fator de correção da amplitude da corrente k
ρ_{solo}	Resistividade do solo em ohms.metros
ρ_i	Resistividade do meio i em ohms.metros
u_0	Permeabilidade magnética do vácuo
u_i	Permeabilidade magnética do meio i
σ_i	Condutividade elétrica do meio i
σ_{100Hz}	Condutividade elétrica do solo em baixa frequência
ϵ_0	Permissividade elétrica do vácuo
ϵ_i	Permissividade elétrica do meio i
ϵ_r	Permissividade relativa
γ_i	Constante de propagação do meio i
ϕ	Ângulo entre os vetores associados aos segmentos j e k
ϕ^i	Ângulo entre os vetores associados ao segmento j e a imagem do segmento k
Γ	Coefficiente de reflexão associado com o modo magnético transversal
λ	Comprimento de onda

Lista de Abreviaturas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

FFT – *Fast Fourier Transform*

HEM – *Hybrid Electromagnetic Model*

LPNE – Linhas de Potência Natural Elevada

LT – Linha de Transmissão

MHEM - *Modified Hybrid Electromagnetic Model*

NLT – *Numerical Laplace Transform*

ONS – Operador Nacional do Sistema

SIN – Sistema Interligado Nacional

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O desenvolvimento de uma nação é diretamente proporcional ao seu consumo de energia elétrica, portanto, para países em desenvolvimento, há a constante necessidade de se expandir o seu sistema elétrico, porém preservando a confiabilidade do mesmo. Como a maioria dos desligamentos de linhas de transmissão em alta tensão são devido a descargas atmosféricas, a avaliação da resposta da linha de transmissão na ocorrência de uma descarga atmosférica é fundamental.

O estudo e a avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é um trabalho complexo que envolve diversos temas que estão, de certa maneira, interligados como, por exemplo, a formação das descargas atmosféricas nas nuvens, a forma de onda das correntes de descargas, resistividade do solo, modelagem do sistema de aterramento, geometria das estruturas, entre outros. Vale ressaltar que, apesar da pesquisa e dos diversos trabalhos publicados sobre estes temas, os mesmos ainda apresentam alto grau de incerteza. Em virtude da complexidade envolvida, nem sempre o projeto das linhas de transmissão consegue obter o desempenho desejado e necessário para sua operação. Neste cenário, medidas adicionais são necessárias para fazer com que estas linhas de transmissão sejam adequadas quanto a sua confiabilidade.

Historicamente, esta adequação era realizada através da redução da resistência de aterramento, também denominada de resistência de pé de torre. Todavia, esta medida nem sempre se apresenta como a mais adequada. Novas maneiras não convencionais vêm sendo avaliadas e adotadas em casos específicos nos últimos anos, sendo uma delas a instalação de cabos para-raios abaixo ou na mesma altura dos cabos condutores.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo atender a demanda por modelagens cada vez mais precisas no que diz respeito ao desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. O desempenho de uma linha de transmissão pode ser mensurado através do número de interrupções no fornecimento de energia elétrica, ou seja, através da quantificação do número de desligamentos devido à incidência de descargas atmosféricas. A avaliação deste desempenho é de notória relevância visto que as descargas atmosféricas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos não programados. Os modelos existentes apresentam excessivas simplificações que, no geral, resultam em resultados superestimados. Ao mesmo tempo, diversas

modelagens não estão disponíveis para os usuários realizarem adequações nas mesmas de maneira a atender situações específicas, ou seja, a falta de generalidade nos modelos existentes acaba por limitar sua utilização em alguns casos. Neste contexto, foi criada como resultado da presente dissertação de mestrado a ferramenta computacional *PRTL-mHEM*, baseada em modelagens recentes dos elementos necessários para avaliação transitória do sistema na ocasião da incidência de uma descarga atmosférica. O código do *PRTL-mHEM* está disponível em plataforma online, de maneira que os usuários possam realizar adequações na mesma, podendo assim atender a demandas específicas que venham a existir.

Outra questão é a respeito das principais medidas utilizadas para reduzir o número de desligamentos provocados por descargas atmosféricas. Atualmente as principais medidas são reduzir a resistência de aterramento ou a instalação de protetores contra surtos nas linhas de transmissão, sendo que a última medida é raramente utilizada devido aos custos associados à sua manutenção. Portanto, a principal medida utilizada para adequar o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas é diminuir a sua resistência de aterramento. Isto pode ser feito das seguintes maneiras: Aumentando os comprimentos dos cabos contrapesos utilizados, aumentando a quantidade de ramais de cabos contrapesos, ou ainda uma combinação de ambas destas medidas. Todavia, embargos ambientais são cada vez mais comuns atualmente, fazendo com que seja necessária a disposição dos cabos contrapesos em áreas cada vez mais limitadas. Isto faz com que os cabos contrapesos fiquem dispostos mais próximos um dos outros, em arranjos que não são comuns, podendo assim prejudicar a eficiência do sistema de aterramento. Portanto, é necessário que a modelagem do sistema de aterramento apresente precisão suficiente para que seja possível obter resultados confiáveis no que diz respeito ao desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas, porém mantendo o tempo de processamento computacional em valores aceitáveis.

Adiciona-se ainda mais complexidade a questão ao considerar que, mais recentemente, medidas não convencionais vêm sendo adotadas nos casos onde linhas de transmissão existentes não tem alcançado bom desempenho frente a descargas atmosféricas. Uma destas medidas é a instalação de cabos para-raios abaixo ou na mesma altura dos cabos condutores, sendo estes cabos denominados como para-raios *Underbuilt*. Este fato motiva a realização de estudos para se avaliar qual a melhor medida a ser adotada para estes casos: Instalar diferentes topologias de sistemas de aterramento ou instalar cabos para-raios *Underbuilt*.

Portanto, a partir do que foi exposto acima, foram definidos os objetivos principais desta dissertação como sendo:

- i. Desenvolvimento da ferramenta computacional *PRTL-mHEM*, que possibilita calcular a taxa de desligamentos anual estimada e obter as sobretensões obtidas em diferentes pontos do sistema após a incidência de uma descarga atmosférica em uma estrutura do sistema, incluindo uma modelagem precisa do sistema de aterramento, em concordância com a bibliográfica técnica sobre este tema;
- ii. Aplicação da ferramenta computacional *PRTL-mHEM* para avaliação das diferentes topologias de sistemas de aterramento frequentemente utilizadas em áreas que possuem restrições ambientais;
- iii. Aplicação da ferramenta computacional *PRTL-mHEM* para avaliação de possíveis medidas mitigatórias convencionais e não convencionais, como a aplicação de cabos para-raios *Underbuilt*, avaliando o impacto no desempenho de uma linha de transmissão com configurações típicas de estrutura, cabos condutores e para-raios após a incidência de uma descarga atmosférica.

1.3 Organização do Texto

O presente texto é dividido em 6 capítulos. Nos parágrafos a seguir é realizada uma breve apresentação de cada capítulo.

O capítulo 1 é referente à introdução atual e apresenta explicações acerca dos principais objetivos e motivações que levaram a investigação do tema desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

O capítulo 2 apresenta as principais características e conceitos sobre descargas atmosféricas. Neste capítulo, de caráter mais qualitativo, é feita uma breve apresentação sobre o processo de formação das descargas atmosféricas, os principais tipos de descargas existentes e sobre os fenômenos responsáveis pelos desligamentos das linhas de transmissão na ocorrência de uma descarga atmosférica.

O capítulo 3 apresenta a modelagem dos elementos necessários para o estudo transitório do desempenho das linhas de transmissão quando uma descarga atmosférica incide sobre uma estrutura. Baseando-se na literatura técnica existente, serão apresentados os modelos utilizados para representar a forma de onda da corrente de retorno da descarga atmosférica, os parâmetros das linhas de transmissão, as estruturas metálicas e o sistema de aterramento. Neste capítulo também é apresentado o histórico das principais pesquisas e trabalhos que foram

realizados ao longo dos anos até o estado atual da modelagem de cada um destes elementos. Os modelos matemáticos apresentados no capítulo 3 são então utilizados no capítulo 4 para a elaboração da ferramenta computacional desenvolvida neste trabalho.

O capítulo 4, juntamente com o capítulo 5, representam as maiores contribuições desta dissertação. No capítulo 4 é apresentada a ferramenta computacional desenvolvida, *PRTL-mHEM*, que permite simular o desempenho de qualquer linha de transmissão juntamente com o seu sistema de aterramento na ocorrência de uma descarga atmosférica. São destacados alguns aspectos práticos de utilização da ferramenta, assim como algumas limitações acerca do desempenho computacional, dependendo do sistema a ser simulado. A ferramenta computacional desenvolvida é então utilizada no capítulo 5 nas simulações apresentadas.

O capítulo 5 apresenta simulações e análises de interesse prático envolvendo uma configuração típica de uma linha de transmissão e considerando diferentes estratégias usualmente utilizadas para melhorar o seu desempenho frente a descargas atmosféricas. Serão simuladas diferentes topologias de sistemas de aterramento com disposições distintas dos cabos contrapesos instalados, como também é apresentada a estratégia não convencional de instalar cabos para-raios *Underbuilt*. Com o objetivo de poder avaliar o comportamento transitório do sistema e o desempenho da linha de transmissão em aplicações distintas, os cenários são simulados para uma ampla faixa de valores de resistividade do solo.

No capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões, ressaltando as principais implicações desta dissertação e dos resultados obtidos, como também são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS E CONCEITOS BÁSICOS ACERCA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.1 Introdução

A descarga atmosférica pode ser definida como sendo uma descarga elétrica de curta duração com alto valor de magnitude de corrente associada que atinge quilômetros de extensão podendo atingir a superfície da Terra. Este fenômeno ocorre quando nuvens atingem uma quantidade suficiente de cargas elétricas para gerar campos elétricos com intensidade suficiente para superar a rigidez dielétrica do ar, provocando a sua ruptura. As descargas podem ocorrer no interior de tempestades de neve e de areia, em nuvens sobre vulcões em erupção, porém na maioria das vezes ocorre em nuvens de tempestades [1], sendo este o caso de interesse desta dissertação.

As descargas atmosféricas quando atingem diretamente objetos como, por exemplo, estruturas e sistemas elétricos podem gerar incêndios e destruir o objeto atingido. No caso da incidência em seres vivos causa a morte na maioria das ocorrências. O fenômeno é agravado, pois além da complexidade física envolvida, as descargas atmosféricas apresentam natureza aleatória, cujo alguns parâmetros de interesse são caracterizados através de distribuição estatística, determinada através de medições experimentais realizadas através de trabalhos e pesquisas que foram elaborados ao longo dos anos.

Portanto, torna-se relevante a apresentação das principais características intrínsecas ao estudo de descargas atmosféricas, as quais serão abordadas neste capítulo. Nas seções seguintes serão apresentados alguns conceitos e nomenclaturas fundamentais para o entendimento do fenômeno das descargas atmosféricas e dos objetivos desta dissertação. Será feita uma breve explanação sobre como ocorre o processo de formação das descargas atmosféricas, apresentando os tipos de descargas atmosféricas e alguns conceitos, como o nível ceráunico, a densidade de descargas para o solo e os tipos de desligamentos. Será realizada uma abordagem mais qualitativa dos conceitos necessários, postergando a definição dos conceitos mais matemáticos para o capítulo seguinte.

2.2 Tipificação

As descargas atmosféricas podem ser classificadas quanto ao seu percurso, que pode ser estabelecido entre nuvem e estratosfera, internamente à nuvem, entre nuvens distintas e entre nuvem e o solo, sendo a última de maior interesse nesta dissertação por abranger as descargas atmosféricas que atingem as estruturas

metálicas que estão localizadas no solo [2]. As descargas entre a nuvem e o solo por sua vez podem ser classificadas com relação à direção de propagação do canal precursor em descargas atmosféricas descendentes ou ascendentes, como também podem ser classificadas em negativas ou positivas, dependendo da polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo por este percurso, conforme Figura 2.2-1, adaptada de [3].

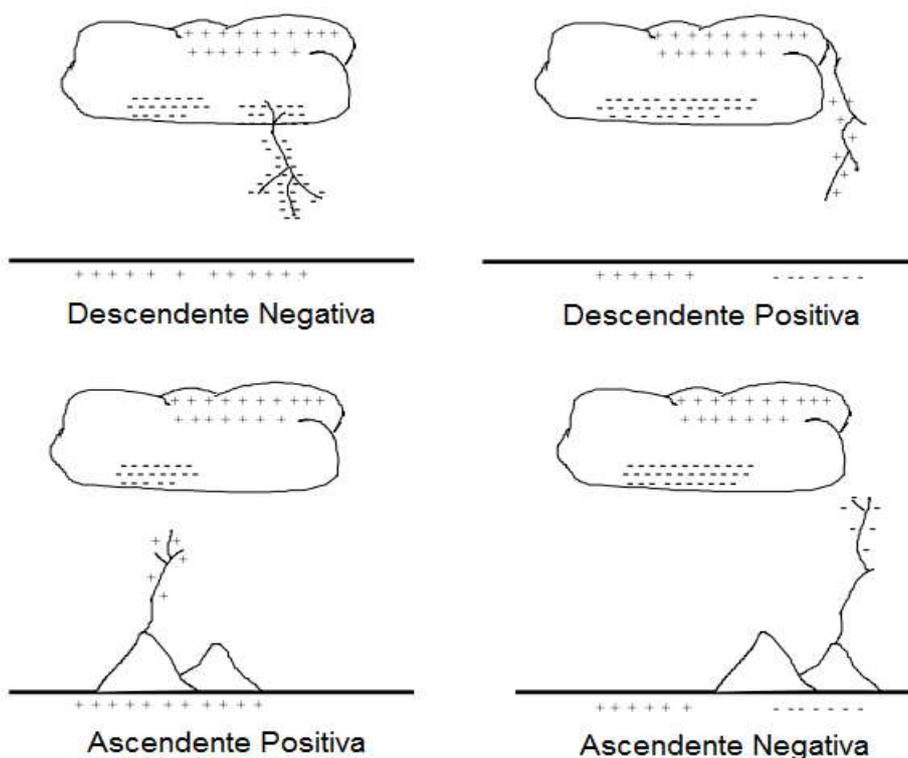


Figura 2.2-1 – Tipos de Descargas entre Nuvem e o Solo (Adaptada de [3])

As descargas descendentes negativas ocorrem usualmente em estruturas não muito altas, como é o caso das estruturas metálicas de uma linha de transmissão, e representam aproximadamente 90% dos casos [4]. Portanto, as descargas atmosféricas descendentes negativas são usualmente utilizadas para os estudos de desempenho de linhas de transmissão.

2.3 Processo de Formação das Descargas Descendentes Negativas

São apresentadas a seguir as principais etapas que permitem a formação das descargas, entre a nuvem e o solo, do tipo descendente negativa.

As descargas atmosféricas têm sua origem principal nas nuvens de tempestades denominadas Cúmulo-nimbo. Este tipo de nuvem é caracterizado por um grande desenvolvimento vertical e geralmente está associada a eventos meteorológicos extremos, como a ocorrência de tempestades com descargas. A

formação de nuvens Cúmulo-nimbos ocorre a partir do encontro de vigorosas correntes ascendentes de ar quente e úmido e de frentes frias superiores que se deslocam a maiores altitudes e que envolvem intensos fluxos descendentes. As dimensões dessas nuvens são elevadas e seu diâmetro são de aproximadamente 10 km, com a base e o topo alcançando altitudes de 1 e 20 km, respectivamente [1].

Em um processo ainda não precisamente determinado, as correntes ascendentes e descendentes de ar e a interação entre as partículas em suspensão e em precipitação nas nuvens atuam para separar cargas positivas e negativas no interior da nuvem. Este processo de eletrificação faz com que as cargas positivas sejam transferidas para a parte superior da nuvem, enquanto a parte da base da nuvem fica carregada negativamente [5]. Esta estrutura de separação de cargas na nuvem já é conhecida desde a década de 30, quando Simpson e Scrase [6], utilizando balões instrumentados, realizaram medições que comprovaram a existência desta separação de cargas na nuvem, porém com algumas regiões na base da nuvem apresentando cargas positivas também, conforme apresentado na Figura 2.3-1, adaptada de [5].

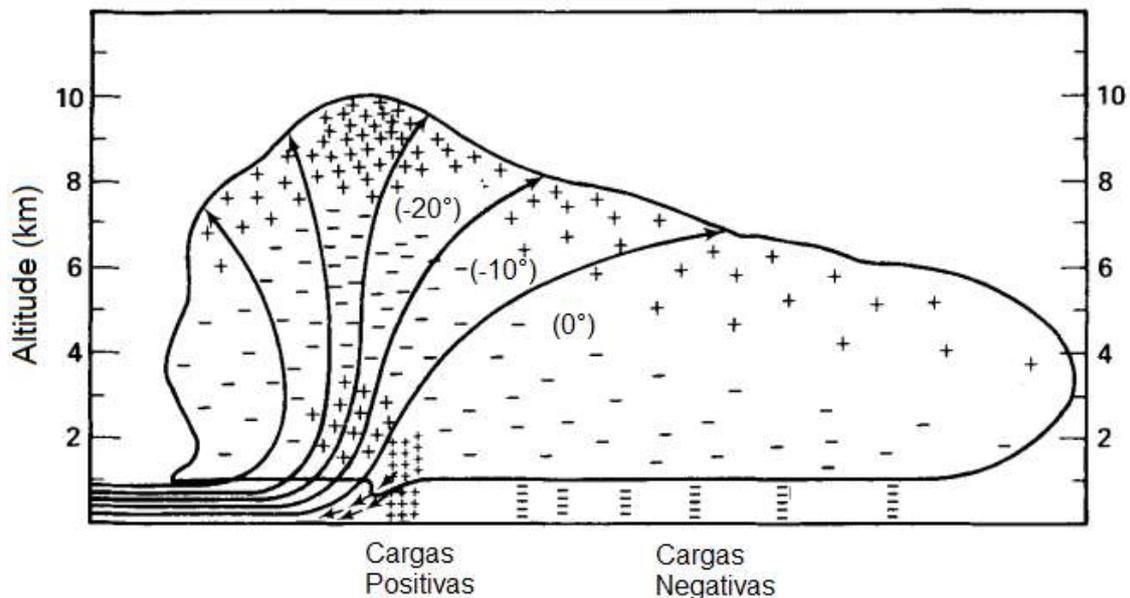


Figura 2.3-1 – Distribuição de Cargas na Nuvem (Adaptada de [5])

Devido à presença de grandes blocos de cargas no interior da nuvem, campos elétricos começam a ultrapassar a rigidez dielétrica no interior das nuvens, dando origem a um primeiro canal ionizado. Esta ruptura torna moveis novas cargas elétricas e formando assim uma coluna negativa que é empurrada em direção ao solo. Ocorre então a progressão desses canais acumulando grande quantidade de carga negativa, configurando desta maneira o canal precursor da descarga [5]. Quando o canal

precursor da descarga se aproxima do solo ou de algum objeto no solo como, por exemplo, as torres de uma linha de transmissão, o campo elétrico começa a ser capaz de induzir o surgimento de canais de descarga ascendentes. Quando a distância entre os canais ascendente e descendente é inferior a um determinado valor, ocorre uma descarga de conexão entre as extremidades destes canais. Nesta condição a nuvem carregada fica conectada ao potencial de terra, gerando uma corrente de descarga de retorno que se estabelece através do canal ionizado. Esta corrente é caracterizada por possuir elevada magnitude e atingir seu valor de pico em poucos microssegundos. Durante a passagem da corrente de descarga de retorno no canal ionizado há a produção do efeito luminoso e expansão deste canal, devido ao seu aquecimento, provocando o deslocamento de uma grande massa de ar que gera o efeito sonoro característico das descargas atmosféricas [2] [3].

Após o término do fluxo de corrente referente à corrente de descarga de retorno, a descarga atmosférica pode cessar ou não, pois caso uma quantidade de carga adicional seja inserida no topo do canal ionizado, podem ter início uma ou mais descargas de retorno subsequentes. As correntes de descarga de retorno subsequentes apresentam magnitudes de menor valor e ocorrem em intervalos de tempo mais curtos quando comparado com a primeira corrente de retorno [2].

2.4 Nível Ceráunico

O nível ceráunico representa o número de dias com trovoadas em um ano. Conforme apresentado na Figura 2.4-1, retirada de [7], países localizados abaixo da linha do Equador concentram os maiores níveis ceráunicos. Na Figura 2.4-2, retirada de [8], são apresentadas as curvas isocerânicas para todo o território do Brasil, onde é possível observar a existência de regiões com níveis ceráunicos elevados.

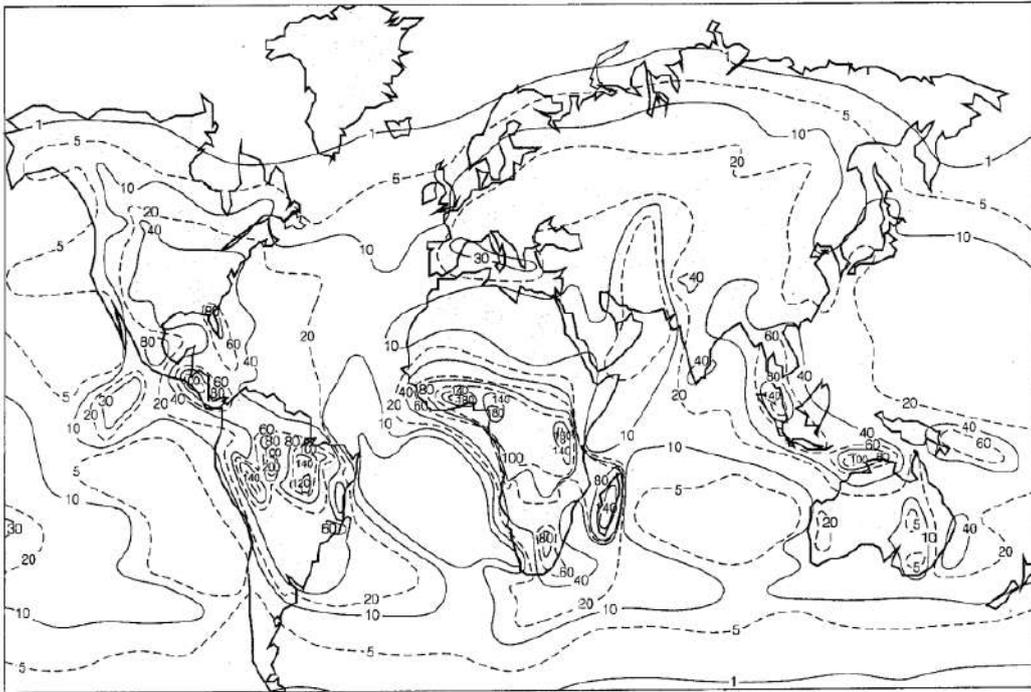


Figura 2.4-1 – Curvas Isocerânicas - Mapa Mundial [7]



Figura 2.4-2 – Curvas Isocerânicas – Mapa do Brasil [8]

2.5 Densidade de Descargas para o Solo

O nível cerâmico e as curvas isocerâmicas representam apenas o número de dias com trovoadas por ano, não fazendo distinção se em um dia ocorre uma ou mais descargas atmosféricas e se as descargas foram para o solo. Enquanto que a densidade de descargas atmosféricas para o solo é um índice que estabelece um número médio de descargas que incidem no solo em uma área a cada ano. Em função disso, este índice é um parâmetro de maior relevância para determinar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Diversos fatores influenciam no valor deste índice, principalmente a distribuição de chuvas na região, a latitude e o tipo de relevo local, pois regiões montanhosas e altas tendem a apresentar índices elevados. Na Figura 2.5-1, retirada de [9], são apresentadas as densidades de descargas atmosféricas para o solo para o mapa mundial.

No Brasil, os valores médios de densidade de descargas atmosféricas para o solo são elevados quando comparados com os de outros países, principalmente com países localizados nas zonas temperadas do globo terrestre. O Operador Nacional do Sistema (ONS) fornece os valores de densidade de descargas atmosféricas para o solo para todo o mapa do Brasil, conforme apresentado na Figura 2.5-2, adaptada de [10]. Atualmente, estes valores são utilizados para o dimensionamento das novas linhas de transmissão que são leiloadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para serem construídas para a expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN).

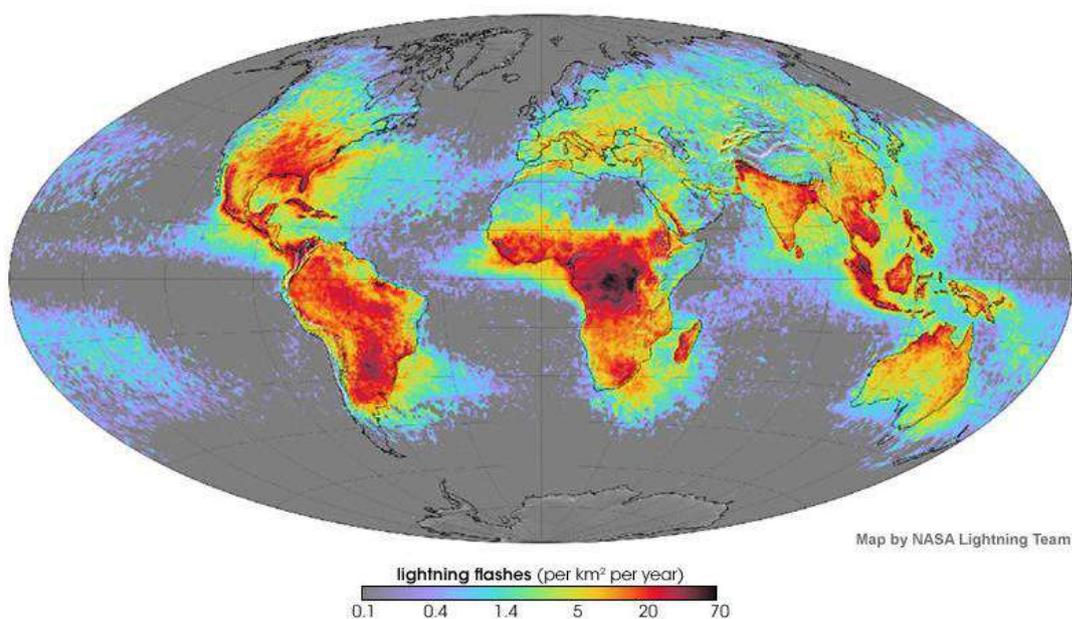


Figura 2.5-1 – Mapa Mundial de Densidades de Descargas Atmosféricas [9]

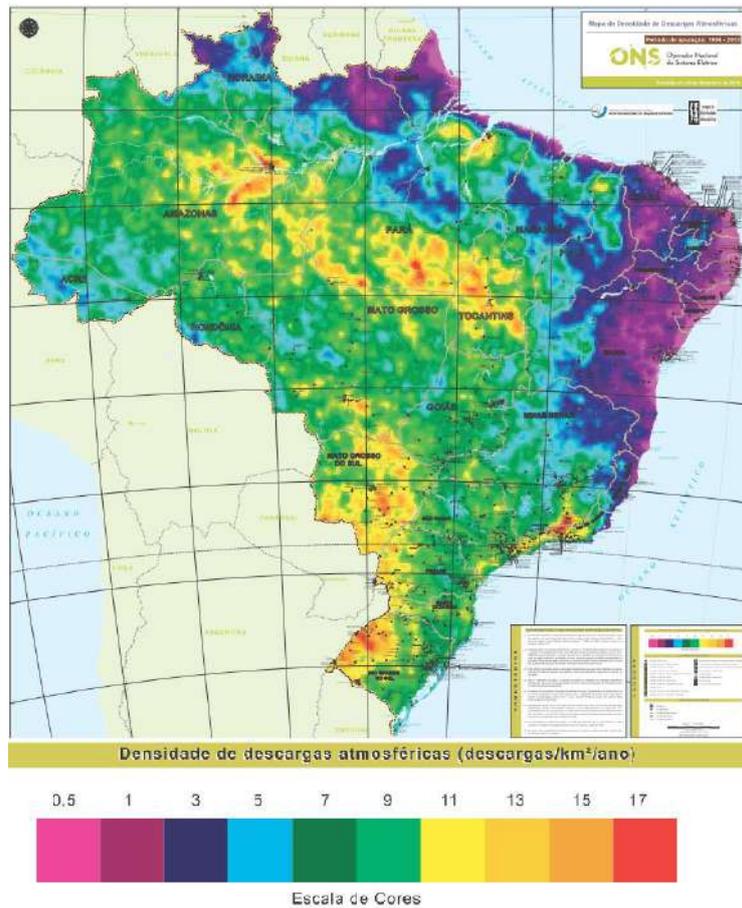


Figura 2.5-2 – Mapa do Brasil de Densidades de Descargas Atmosféricas (Adaptada de [10])

A Figura 2.5-3 apresenta a distribuição das linhas de transmissão que foram leiloadas pela ANEEL no Brasil quanto ao valor da densidade de descargas atmosféricas anual para os anos de 2001 a 2019 [11]. É possível observar que a maioria das linhas de transmissão são construídas em regiões com alto valor de densidade de descargas atmosféricas para o solo, com valores entre 9 a 17 descargas por km² por ano. Isto reforça a relevância do correto dimensionamento das linhas de transmissão quanto ao seu desempenho frente a descargas atmosféricas dentro do território do Brasil. É possível também, a partir do número de dias com trovoadas em um período de um ano, T_d , ser obtido o valor do índice de densidade de descargas atmosféricas para o solo, N_g , conforme equação a seguir [12]:

$$N_g = 0,04 T_d^{1,25} \quad (2.5-1)$$

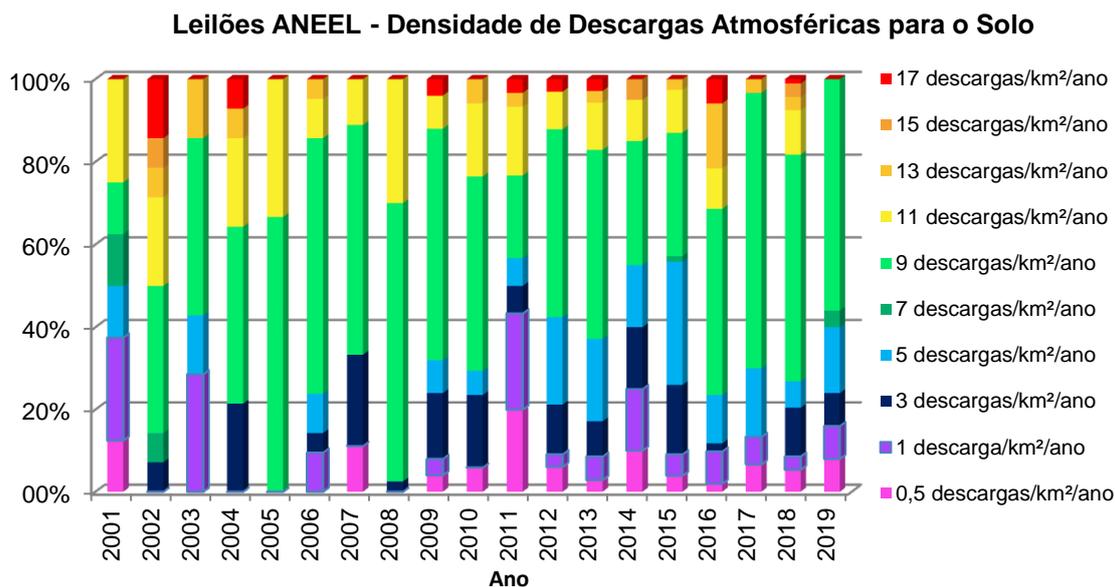


Figura 2.5-3 – Densidade de Descargas Atmosféricas das Linhas de Transmissão dos Leilões da ANEEL (2001 a 2019)

2.6 Tipos de Desligamentos devido a Descargas Atmosféricas

Conforme previamente mencionado, as descargas atmosféricas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos não programados das linhas de transmissão, onde há a ruptura do isolamento em função das sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores [4]. As descargas atmosféricas podem ser classificadas em descargas diretas e indiretas em função do local de incidência. As descargas diretas são as descargas que atingem uma das estruturas de uma linha de transmissão, um dos cabos para-raios ou um dos cabos de fase. Enquanto que as descargas indiretas referem-se às descargas que atingem o solo nas proximidades da linha de transmissão, porém neste caso não há o estabelecimento de níveis elevados de sobretensões induzidas, representando neste caso uma preocupação para sistemas elétricos de baixa e média tensão [1] [2] [3]. Por este motivo, as descargas indiretas não serão abordadas nesta dissertação.

Quando há a incidência de uma descarga direta em uma torre da linha ou nos cabos para-raios, ocorre um fenômeno eletromagnético transitório, que se propaga pelos cabos para-raios e pelos cabos de fase, em função do acoplamento mútuo entre os cabos, pelas estruturas das torres e também pelos sistemas de aterramento. Como resultado deste fenômeno transitório, ocorrem sobretensões, por exemplo, junto à torre entre um ponto desta e um cabo de fase, e entre um cabo de fase e um cabo para-raios. Se uma dessas sobretensões exceder a tensão suportável do isolamento em questão, um curto-circuito ocorre, sendo este tipicamente entre fase e terra.

Processo similar ocorre na ocasião de uma descarga direta sobre um dos cabos de fase, também originando um fenômeno eletromagnético transitório que se propaga pelos cabos de fase e para-raios, podendo ocasionar sobretensões que podem vir a provocar um curto-circuito fase-terra [3]. Nesta dissertação serão abordados os efeitos na ocorrência de uma descarga direta sobre uma estrutura de uma linha de transmissão.

As descargas diretas incidindo sobre uma linha de transmissão podem interromper seu funcionamento através de três formas [13]: *Flashover*, *Flashover* no meio do vão (também denominado de ruptura a meio de vão) e *Backflashover*.

2.6.1 Flashover

O *Flashover*, também denominado como descarga disruptiva ou descarga de contornamento [2], ocorre quando há uma falha de blindagem e ocorre a incidência de descargas diretas sobre os condutores energizados da linha de transmissão, conforme apresentado na Figura 2.6-1. Enquanto que as descargas que atingem os cabos para-raios no meio de vãos extensos podem ocasionar *Flashover* entre os para-raios e os condutores no meio do vão, devido ao espaçamento reduzido entre os cabos de fase e os para-raios [14]. Vale ressaltar que nem toda falha de blindagem provoca o desligamento, pois isto só ocorre quando a corrente da descarga é intensa o suficiente para gerar campos elétricos que causem a ruptura da rigidez dielétrica dos isoladores.

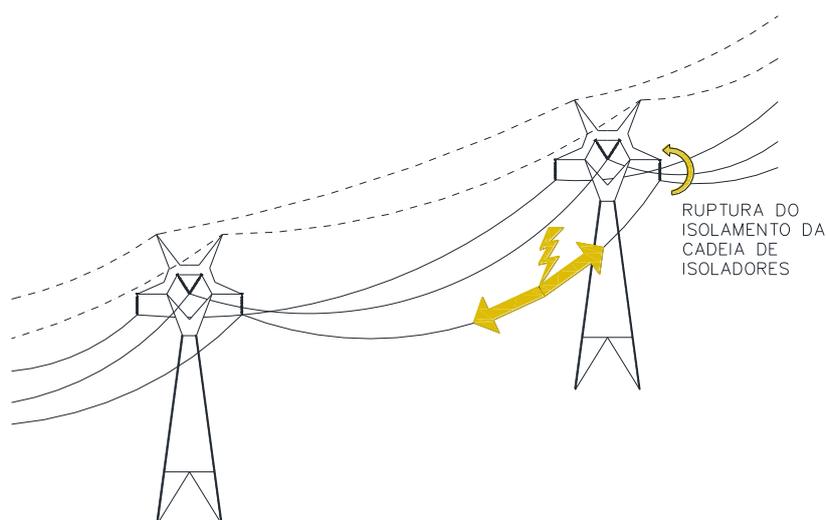


Figura 2.6-1 – Desenho Esquemático do *Flashover*

Com o objetivo de captar as descargas atmosféricas de maior magnitude e proteger os cabos de fase, cabos para-raios são instalados no topo das estruturas. Os cabos para-raios atuam também reduzindo as sobretensões induzidas nas linhas de transmissão na ocasião de incidência de descargas atmosféricas na linha de transmissão ou nas proximidades dela. Todavia, vale ressaltar que descargas

atmosféricas de menor magnitude podem incidir sobre os cabos de fase mesmo havendo cabos para-raios instalados, devido a eventuais falhas de blindagem, ocasionando *Flashover*.

2.6.2 Backflashover

O *Backflashover*, também denominado como descarga disruptiva de retorno [1], descarga disruptiva inversa ou descarga de contornamento inverso [2], ocorre quando a sobretensão obtida nas cadeias de isoladores não é suportada pela linha de transmissão na ocorrência de descargas na torre ou nos cabos para-raios, produzindo um arco elétrico de contornamento entre uma fase e a torre, conforme apresentado na Figura 2.6-2. Os diversos elementos que compõem uma linha de transmissão como a geometria da torre (posição dos cabos condutores e para-raios), tipo e quantidade de condutores por fase, se a linha de transmissão é circuito simples ou duplo, impedância de aterramento, entre outros, influenciam a resposta do sistema e as sobretensões obtidas em cada uma das cadeias de isoladores na ocorrência de uma descarga atmosférica [14].

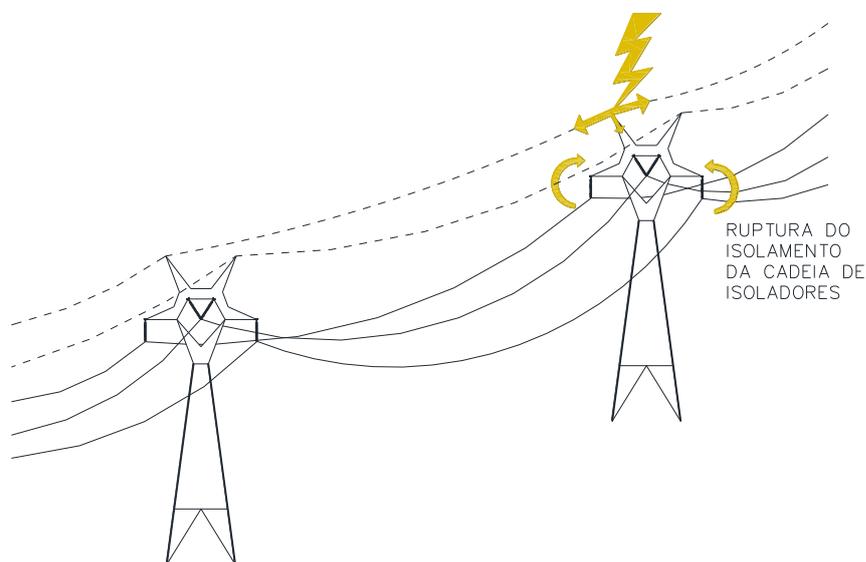


Figura 2.6-2 – Desenho Esquemático do *Backflashover*

De acordo com Hileman [15], o processo de formação do *Backflashover* ocorre quando, na ocasião de uma descarga atmosférica incidindo sobre uma torre, os cabos para-raios conduzem a corrente da descarga interceptada até as estruturas adjacentes aterradas. Quando a corrente da descarga atmosférica e a sobretensão associada trafegam pelos cabos para-raios e encontram a primeira estrutura aterrada, elas se dividem em componentes. Sendo que uma destas componentes é refletida, uma segunda componente continua trafegando através dos cabos para-raios e uma terceira componente trafega pela estrutura em direção ao solo. Quando esta terceira

componente atinge o solo, ela é submetida a uma reflexão, devido à descontinuidade da impedância de surto da torre com a impedância de aterramento. Caso a impedância de aterramento não seja bastante inferior à impedância de surto da estrutura, a amplitude da onda de sobretensão resultante que trafega até o topo da estrutura poderá ser de valor muito elevado. A sobretensão na cadeia de isoladores é então obtida pela diferença entre a sobretensão no topo e a tensão da fase. Desta maneira, há a possibilidade da suportabilidade do isolamento da linha ser excedida, provocando uma falha no isolamento da estrutura para a fase, ocasionando assim o fenômeno do *Backflashover*. Este fenômeno pode se manifestar em uma ou mais das cadeias de isoladores da estrutura atingida pela descarga atmosférica, conforme Figura 2.6-3, adaptada de [16].

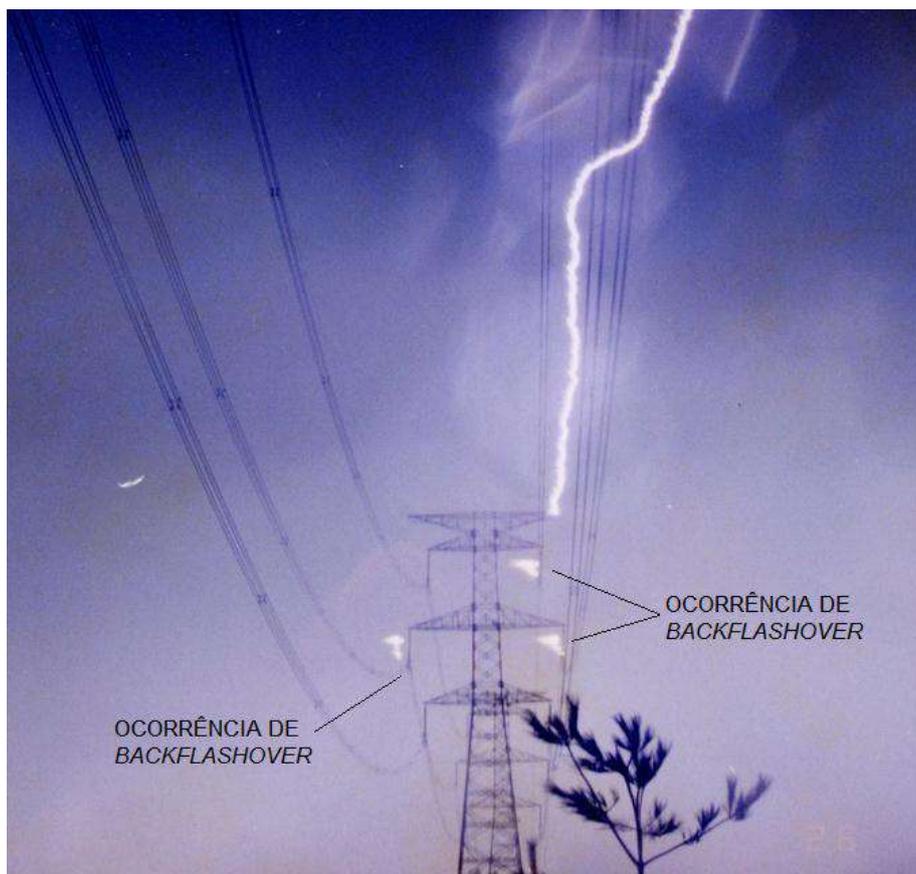


Figura 2.6-3 – Momento de Ocorrência do *Backflashover* (Adaptada de [16])

Desligamentos por *Backflashover* representam o fenômeno de maior ocorrência entre os desligamentos não programados em linhas de transmissão [13] [17], sendo assim objeto da maioria dos trabalhos e pesquisas realizados sobre o desempenho de linhas de transmissão na ocorrência de descargas atmosféricas. Portanto, o presente trabalho realizado nesta dissertação também abordará os desligamentos ocasionados por *Backflashover*.

CAPÍTULO 3. MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SISTEMA

3.1 Introdução

A modelagem de um sistema tem como objetivo a compreensão de um fenômeno. Diferentes modelos podem possuir diferentes objetivos, podendo omitir parte da informação que não contribui para o fenômeno que está sendo modelado, permitindo assim o melhor entendimento da informação que se deseja destacar e analisar. A criação de um modelo é parte fundamental de qualquer área da ciência. O modelo, portanto, pode ser considerado como o resultado do processo de elaborar uma representação abstrata ou conceitual de um fenômeno, em geral com o objetivo de melhor compreender, controlar ou prever estes fenômenos.

O estudo do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas apresenta considerável complexidade e a atuação simultânea de diversos elementos e conceitos existentes em um sistema de transmissão. Alguns destes conceitos mais qualitativos foram apresentados no Capítulo 2. O presente capítulo tem como objetivo apresentar os elementos necessários, e seus respectivos modelos matemáticos, para a elaboração da ferramenta computacional de simulação do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Será realizada também uma breve apresentação do histórico dos trabalhos que foram desenvolvidos ao longo dos anos até o estado atual da modelagem destes elementos.

3.2 Forma de Onda da Corrente da Descarga Atmosférica

A forma de onda da corrente da descarga atmosférica possui influência significativa nos resultados gerados. A análise do desempenho de uma linha de transmissão frente a uma descarga atmosférica é fortemente relacionada com o pico e a forma de onda das sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores das estruturas que, por sua vez, é diretamente relacionada com a corrente da descarga atmosférica sendo injetada no sistema. Portanto, utilizar formas de onda que não representam adequadamente o comportamento da corrente de descargas atmosféricas pode levar a resultados distantes da realidade [14]. Em função disso, nesta seção será apresentada a evolução das diversas formas e equações de corrente de descargas atmosféricas adotadas em diversos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos.

3.2.1 Modelo Função Dupla Exponencial

Em 1941, Bruce e Golde [18] apresentaram originalmente a forma de onda da corrente de descarga atmosférica representada através de uma função dupla exponencial, que é constituída pela soma de duas formas de onda exponenciais com constantes de tempo diferentes e de sinais contrários, conforme equação abaixo:

$$i(t) = I_0(e^{\frac{-t}{\tau_1}} - e^{\frac{-t}{\tau_2}}), \text{ para } t \geq 0 \quad (3.2-1)$$

Sendo:

I_0 – amplitude máxima da corrente de descarga;

τ_1, τ_2 – são as constantes de tempo da frente de onda e do término do sinal, respectivamente.

Em 1969, Uman e McLain [19] adicionaram o fator de correção η de maneira que o valor máximo da amplitude da corrente seja igual a I_0 :

$$i(t) = (I_0/\eta)(e^{\frac{-t}{\tau_1}} - e^{\frac{-t}{\tau_2}}), \text{ para } t \geq 0 \quad (3.2-2)$$

Todavia, o uso das equações (3.2-1) e (3.2-2) apresenta como desvantagem o fato da derivada em $t = 0$ não ser nula, o que pode gerar problemas computacionais em sua implementação. Em função disso, em 1977, Jones [20] apresenta a equação abaixo como uma alternativa para reduzir a descontinuidade da derivada no tempo em $t = 0$:

$$\begin{cases} i(t) = (I_0/\eta)(e^{\frac{-t'}{\tau_1}} - e^{\frac{-t'}{\tau_2}}), \text{ para } t \geq 0 \\ t' = t + \frac{\tau_2^2}{\tau_1} \end{cases} \quad (3.2-3)$$

Em 1985, Gardner *et al.* [21] apresentam a equação abaixo com intenção semelhante de reduzir a descontinuidade da derivada no tempo em $t = 0$:

$$\begin{cases} i(t) = (I_0/\eta)(e^{\frac{-t'}{\tau_1}} - e^{\frac{-t'}{\tau_2}}), \text{ para } t \geq 0 \\ t' = t - \tau_1 \end{cases} \quad (3.2-4)$$

Outra desvantagem em modelar a forma de onda de corrente de descarga atmosférica utilizando a função dupla exponencial é que, mesmo sendo tradicionalmente utilizada em ensaios laboratoriais a impulso atmosférico e em estudos computacionais para proteção de sistemas de transmissão, este modelo é capaz de reproduzir apenas parcialmente as características observadas em medições de correntes de retorno de descargas atmosféricas reais [1].

3.2.2 Modelo Somatório de Funções de Heidler

Em função das dificuldades de implementação e da imprecisão do modelo utilizando função dupla exponencial, Heidler [22], em 1987, apresenta um novo método para representar a forma de onda das correntes de descargas. Utilizando este método, a forma de onda da corrente de descargas atmosféricas pode então ser

representada através de um somatório de funções de Heidler, conforme equação abaixo [23] [24]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_0}{\eta_k} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{1k}}\right)^{n_k}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{1k}}\right)^{n_k}} e^{-\frac{t}{\tau_{2k}}} \\ \eta_k = e^{(-\tau_{1k}/\tau_{2k})(n_k \tau_{1k}/\tau_{2k})^{1/n_k}} \end{array} \right. \quad (3.2-5)$$

Sendo:

I_0 – amplitude máxima da corrente de descarga;

η_k – fator de correção para amplitude da corrente;

τ_1, τ_2 – são as constantes de tempo da frente de onda e do término do sinal, respectivamente;

n_k – é o expoente responsável por controlar a inclinação de cada onda de corrente.

A função de Heidler permite representar adequadamente curvas médias de corrente, obtidas a partir de registros de medições diretas em torres instrumentadas, sendo possível obter formas de onda bem próximas das ondas de corrente de descargas reais. Visacro *et al.*, em [25], apresenta que é possível representar a forma de onda de correntes de descargas de retorno subsequentes utilizando apenas o somatório de duas funções de Heidler, apresentando como resultado uma forma de onda simplificada com apenas um pico. Todavia, para representar a forma de onda da corrente mais severa e de maior ocorrência, que é a corrente da primeira descarga de retorno negativa, é necessário utilizar o somatório de sete funções de Heidler. Desta maneira, a forma de onda da corrente irá apresentar dois picos. As referências [24] e [25] apresentam os parâmetros necessários na equação (3.2-5) para representar as formas de onda da primeira descarga de retorno negativa medidas na Estação Morro do Cachimbo, localizada no estado de Minas Gerais no Brasil, e no Monte San Salvatore, localizado na Suíça. Estes valores são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 3.2-1 – Parâmetros utilizados para Correntes da Primeira Descarga de Retorno Negativa Medidas na Estação Morro do Cachimbo e no Monte San Salvatore [25]

Curva	Monte San Salvatore				Estação Morro do Cachimbo			
	I_k (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_k (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	3,0	2,0	3,0	76,0	6,0	2,0	3,0	76,0
2	4,5	3,0	3,5	25,0	5,0	3,0	3,5	10,0
3	3,0	5,0	5,2	20,0	5,0	5,0	4,8	30,0
4	3,8	7,0	6,0	60,0	8,0	9,0	6,0	26,0
5	13,6	44,0	6,6	60,0	16,5	30,0	7,0	23,2
6	11,0	2,0	100,0	600,0	17,0	2,0	70,0	200,0
7	5,7	15,0	11,7	48,5	12,0	14,0	12,0	26,0

Em função do que foi exposto acima e da ampla aceitação do uso do somatório de funções de Heidler na literatura técnica referente a desempenho de linhas de transmissão, neste trabalho serão utilizados os parâmetros referentes à Estação Morro do Cachimbo no somatório de funções de Heidler para representar a corrente de maior relevância, sendo esta a corrente da primeira descarga de retorno negativa. A Figura 3.2-1, adaptada de [24], apresenta a forma de onda da corrente a ser utilizada nesta dissertação.

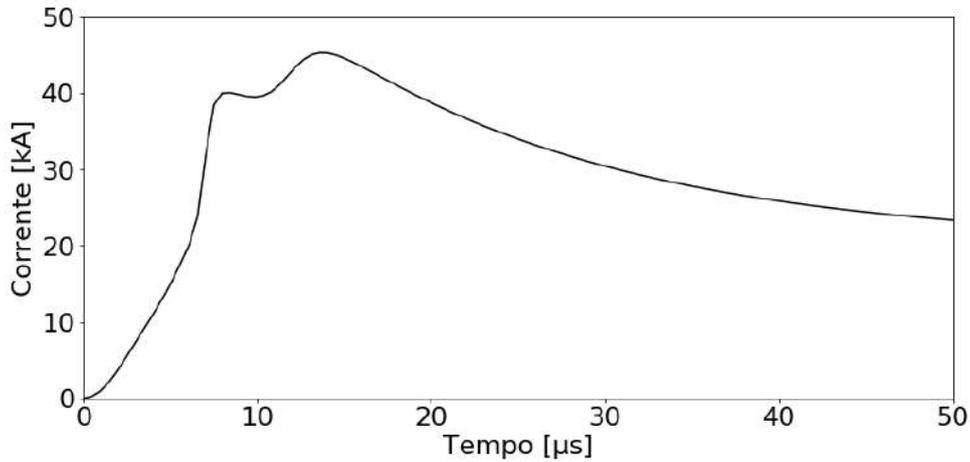


Figura 3.2-1 – Representação da Forma de Onda da Corrente de Descarga (Morro do Cachimbo) [24]

3.3 Parâmetros da Linha de Transmissão

Os vãos da linha de transmissão são representados cada um pela matriz de admitância nodal Y_n apresentada abaixo [26] [27]:

$$\begin{cases} Y_n = \begin{bmatrix} Y_{L1} & Y_{L2} \\ Y_{L2} & Y_{L1} \end{bmatrix} \\ Y_{L1} = Y_c \cdot (I + H^2) \cdot (I - H^2)^{-1} \\ Y_{L2} = -2Y_c \cdot H \cdot (I - H^2)^{-1} \end{cases} \quad (3.3-1)$$

Sendo I a matriz identidade, Y_c a matriz da admitância característica e H a matriz de propagação definidas pelas equações abaixo:

$$Y_c = Z^{-1} \sqrt{ZY} \quad (3.3-2)$$

$$H = e^{-l\sqrt{ZY}} \quad (3.3-3)$$

Sendo l o comprimento do vão em metros. Y é a matriz de admitância da linha de transmissão por unidade de comprimento e Z a matriz de impedância da linha de transmissão por unidade de comprimento, definidas nas seções a seguir.

3.3.1 Admitância da Linha de Transmissão

Em linhas de transmissão a admitância por unidade de comprimento é obtida através da equação [28]:

$$Y = 2\pi(j\omega u_0)(\mathbf{P})^{-1} \quad (3.3-4)$$

Sendo a matriz \mathbf{P} a matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell e seus elementos definidos conforme abaixo:

$$\begin{cases} P_{ij} = \frac{2h_i}{r_i}, & \text{se } i = j \\ P_{ij} = \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, & \text{se } i \neq j \end{cases} \quad (3.3-5)$$

Sendo D_{ij} a distância entre o condutor i e a imagem do condutor j , d_{ij} a distância entre o condutor i e o condutor j e r_i o raio do condutor i , conforme Figura 3.3-1.

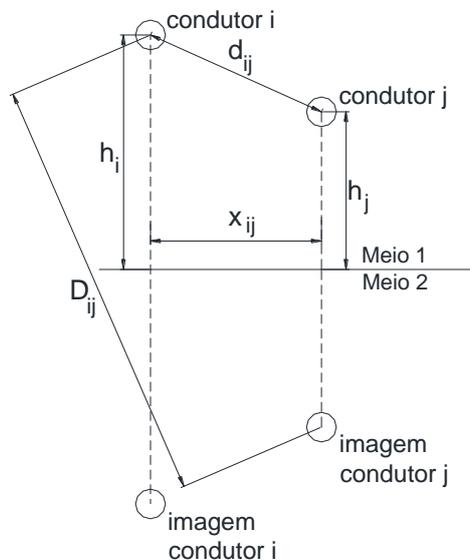


Figura 3.3-1 – Disposição dos Condutores

3.3.2 Impedância da Linha de Transmissão

Em linhas de transmissão a matriz de impedância por unidade de comprimento é obtida através da equação [29]:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_{in} + \mathbf{Z}_e + \mathbf{Z}_g \quad (3.3-6)$$

Sendo:

\mathbf{Z}_{in} – Matriz de impedância interna dos condutores;

\mathbf{Z}_e – Matriz de impedância espacial devido ao meio externo;

\mathbf{Z}_g – Matriz de impedância de retorno pelo solo.

3.3.2.1 Matriz de impedância interna dos condutores

Há várias décadas que já é de conhecimento a variação não linear com a frequência da resistência e da indutância nos condutores [30]. De acordo com Arrilaga e Watson [28], este fato ocorre em função do efeito pelicular, que faz com que a corrente circule na superfície do condutor. Este fenômeno aumenta conforme a frequência aumenta e, portanto, necessita ser calculado para cada frequência. A formulação amplamente utilizada é baseada em modelar os condutores como tubos, em função da corrente se concentrar primordialmente na superfície dos condutores [31]. Este fato é mais evidente em condutores que possuem a alma de aço (condutores tipo CAA ou ACSR em inglês), pois, a resistência mais elevada no centro desses condutores faz com que apenas uma quantidade desprezível de corrente circule através da alma de aço destes condutores.

Para linhas de transmissão, a matriz de impedância interna dos condutores por unidade de comprimento Z_{in} é uma matriz diagonal, pois a distância entre os condutores de uma mesma fase é da ordem de centímetros e a distância entre condutores de fases distintas é da ordem de metros. Portanto, o efeito de proximidade pode ser desconsiderado. Os elementos da matriz Z_{in} podem ser obtidos através das equações abaixo [28] [32]:

$$Z_{in_i} = \frac{\eta\rho}{2\pi r_e} \frac{B_k^1(\eta r_{int})B_0^0(\eta r_e) - B_k^0(\eta r_e)B_0^1(\eta r_{int})}{B_k^1(\eta r_{int})B_0^1(\eta r_e) - B_k^0(\eta r_e)B_0^0(\eta r_{int})} \quad (3.3-7)$$

Sendo:

$$\eta = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_i}; \quad (3.3-8)$$

B_0^0 – função de Bessel modificada de primeiro tipo ordem 0;

B_0^1 – função de Bessel modificada de primeiro tipo ordem 1;

B_k^0 – função de Bessel modificada de segundo tipo ordem 0;

B_k^1 – função de Bessel modificada de segundo tipo ordem 1;

r_e – raio externo do condutor i ;

r_{int} – raio interno do condutor i . Para o caso de condutores homogêneos ($r_{int} = 0$):

$$Z_{in_i} = \frac{\eta\rho}{2\pi r_e} \frac{B_0^0(\eta r_e)}{B_0^1(\eta r_e)} \quad (3.3-9)$$

Wedepohl e Wilcox, em [33], desenvolveram fórmulas aproximadas utilizando funções hiperbólicas ao invés de funções de Bessel. Todavia, nesta dissertação estas fórmulas aproximadas não serão utilizadas, sendo a matriz Z_{in} definida pela

equação (3.3–7) para condutores com alma de aço e pela equação (3.3–9) para condutores homogêneos.

3.3.2.2 Matriz de impedância espacial devido ao meio externo

A matriz de impedância espacial devido ao meio externo por unidade de comprimento Z_e pode ser obtida através da equação abaixo [28]:

$$Z_e = (0,0002)j\omega P \quad (3.3-10)$$

Sendo P a matriz dos coeficientes de potencial de Maxwell, definida na equação (3.3–5).

3.3.2.3 Matriz de impedância de retorno pelo solo

Em 1926, Carson [34] elaborou a impedância de retorno pelo solo através de uma integral infinita que pode ser representada através de uma série infinita. Wait [35], assim como Wedepohl e Efthymiadis [36], realizaram trabalhos posteriores também utilizando integrais infinitas em 1972 e 1978, respectivamente. Todavia, com a necessidade de calcular impedâncias de retorno pelo solo para uma ampla faixa de frequências e em função das diversas incertezas envolvidas, formulações mais simples começaram a ser desenvolvidas, com objetivo de obter maior eficiência computacional nos cálculos envolvidos.

Entre as alternativas de formulações elaboradas, o trabalho de Dubanton, publicado por Gary [37], é o mais utilizado em função da facilidade de sua implementação e precisão dos resultados obtidos para toda a faixa de frequências para a qual as equações de Carson são válidas. Na formulação de Dubanton o solo é representado através do método das imagens e é deslocado em uma distância complexa p . Em 1981, Deri *et al.* [38] apresenta uma justificativa científica que corrobora com esta formulação desenvolvida, na qual os elementos da matriz de impedância de retorno do solo por unidade de comprimento Z_g podem ser obtidos através da equação abaixo:

$$z_{gij} = \frac{j\omega u_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2(h_i + p)}{r_i} \right) \quad \text{se } i = j \quad (3.3-11)$$

$$z_{gij} = \frac{j\omega u_0}{2\pi} \ln \left(\sqrt{\frac{(h_i + h_j + 2p)^2 + x_{ij}^2}{x_{ij}^2 + (h_i - h_j)^2}} \right) \quad \text{se } i \neq j \quad (3.3-12)$$

Sendo h_i e h_j as alturas dos condutores i e j com relação ao solo, respectivamente e x_{ij} a separação horizontal entre os condutores i e j . A distância complexa abaixo do solo p é definida pela equação abaixo [38] [39]:

$$p = \sqrt{\frac{\rho_{solo}}{j\omega u_0}} \quad (3.3-13)$$

Sendo ρ_{solo} a resistividade do solo em Ω .metros.

3.3.3 Modelagem Adotada

Nesta dissertação é adotada a formulação *quase-TEM* (quase transversal eletromagnético) com a aproximação das imagens apresentada inicialmente por Peterson [40], e adotada em trabalhos posteriores [27] [41] [42] [43], que permite lidar com variações de alta frequência da constante de propagação. As matrizes de impedância por unidade de comprimento Z e de admitância por unidade de comprimento Y são obtidas através das equações abaixo [42]:

$$Z = Z_{in} + \frac{j\omega u_0}{2\pi} (P + \overline{S}_1 - \overline{S}_2 - \overline{T}) \quad (3.3-14)$$

$$Y = 2\pi(j\omega u_0)(P - \overline{T})^{-1} \quad (3.3-15)$$

As matrizes P e Z_{in} são definidas pelas equações (3.3-5) e (3.3-7), respectivamente. Para o caso de sistemas com as fases formadas por feixe de subcondutores, um processo de redução das matrizes é aplicado para eliminar os subcondutores nas matrizes Z e Y .

As matrizes \overline{S}_1 , \overline{S}_2 e \overline{T} são aproximações de integrais infinitas e seus elementos podem ser obtidos através das equações abaixo [41] [42] [43]:

$$\overline{S}_{1ij} = \ln \left(1 + \frac{2}{\eta \sqrt{\ell_{ij}^2 + x_{ij}^2}} \right) \quad (3.3-16)$$

$$\overline{S}_{2ij} = \frac{2}{n^2 + 1} \ln \left(1 + \frac{n^2 + 1}{\eta \sqrt{\ell_{ij}^2 + x_{ij}^2}} \right) \quad (3.3-17)$$

$$\overline{T}_{ij} = 2\ln 2 + \frac{2n^2}{n^2 + 1} \ln \left(\frac{1 + \frac{n^2 + 1}{\eta \sqrt{\ell_{ij}^2 + x_{ij}^2}}}{1 + 2 \frac{n^2 + 1}{\eta \sqrt{\ell_{ij}^2 + x_{ij}^2}}} \right) \quad (3.3-18)$$

Sendo x_{ij} a separação horizontal entre os condutores i e j (se $i = j$, x_{ij} é igual ao raio do condutor i) e $\ell_{ij} = h_i + h_j$, com h_i e h_j sendo altura dos condutores i e j com relação ao solo, respectivamente. Os valores de n e η são definidos através das equações abaixo:

$$n = \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^2 \quad (3.3-19)$$

$$\eta = \sqrt{\gamma_2^2 - \gamma_1^2} \quad (3.3-20)$$

Sendo γ_i a constante de propagação do meio i . Nas equações (3.3-19) e (3.3-20), γ_1 e γ_2 referem-se a constante de propagação do ar e do solo, respectivamente, e são definidas pela equação abaixo:

$$\gamma_i = \sqrt{j\omega\mu_i(\sigma_i + j\omega\epsilon_i)} \quad (3.3-21)$$

Maiores detalhes podem ser obtidos nas referências [40] – [43].

3.4 Estruturas Metálicas

Em estudos de avaliação de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, as estruturas metálicas são modeladas através de dois parâmetros: A impedância de surto e a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas na estrutura. Estes dois conceitos são apresentados nas seções a seguir.

3.4.1 Impedância de Surto das Estruturas

A impedância de surto das estruturas possui influência significativa na avaliação do desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas, em função disso, diversos trabalhos foram realizados ao longo dos anos buscando mensurar corretamente este parâmetro. Os principais trabalhos são descritos a seguir.

Usualmente, as torres de linhas de transmissão são modeladas como condutores verticais. Em 1934, Jordan [44] publicou um dos primeiros trabalhos baseado neste conceito, onde representa a impedância de surto de um condutor vertical cilíndrico através da seguinte equação:

$$Z = 60 \ln\left(\frac{h}{r}\right) + 90 \frac{r}{h} - 60 \quad (3.4-1)$$

Sendo h a altura e r o raio do cilindro.

Em 1960, Wagner e Hileman [45] dão continuidade ao trabalho de Jordan e elaboraram a equação abaixo:

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) \quad (3.4-2)$$

Em 1969, Sargent e Darveniza apresentam em [46] que as impedâncias de surto das torres obtidas utilizando a equação de Wagner e Hileman, equação (3.4-2), apresentavam valores superiores em 60 ohms (em média) em comparação a medições realizadas e, em função disso, elaboraram a equação abaixo:

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 60 \quad (3.4-3)$$

Wagner e Hileman [45] representam a torre através de um modelo cilíndrico, enquanto que Sargent e Darveniza [46] representam a torre através de um modelo de um cone. Em 1985, Chisholm e Chow [47] propõem um modelo mais próximo do formato de uma típica torre de transmissão (Figura 3.4-1) para representar sua impedância, através da equação abaixo:

$$Z = 60 \ln \left\{ \cot \left[\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{(r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1)}{(h_1 + h_2)^2} \right] \right\} \quad (3.4-4)$$

Sendo:

h_1 – Altura em metros da base até o meio da seção da estrutura;

h_2 – Altura em metros do meio da seção até o topo da estrutura;

r_1 – Raio em metros do topo da estrutura;

r_2 – Raio em metros do meio da seção da estrutura;

r_3 – Raio em metros da base da estrutura.

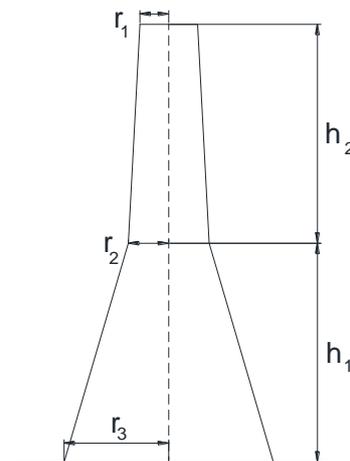


Figura 3.4-1 – Formato de Estrutura Típica (Adaptada de [47])

Para possibilitar calcular as sobretensões obtidas em cada cadeia de isoladores na ocasião da injeção de uma corrente de descarga atmosférica, nesta dissertação as estruturas metálicas são modeladas como uma conexão série de quatro seções de linhas de transmissão monofásicas, conforme [27] [48] [49] [50]. Esta divisão permite representar as mísulas superiores, intermediárias e inferiores na estrutura, conforme Figura 3.4-2.

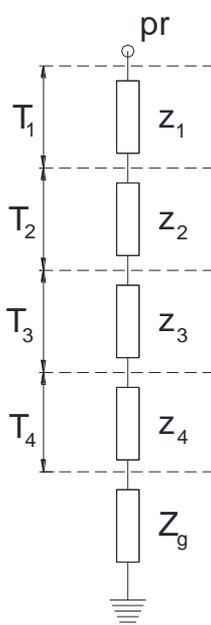


Figura 3.4-2 – Modelo da Estrutura Adotado

Os valores das impedâncias Z_1 a Z_4 podem ser obtidos através da equação (3.4-4) ou podem ser adotados os valores apresentados nas referências [27] [48] [49].

3.4.2 Velocidade de Propagação nas Estruturas

A velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas nas estruturas metálicas é menor que a velocidade da luz em função do efeito das inclinações, cruzetas e mísulas das estruturas [51]. Nesta dissertação a velocidade de propagação nas estruturas metálicas foi adotada como sendo de 80% da velocidade da luz. Este valor está de acordo com outras referências existentes na literatura técnica [51] [52].

3.5 Impedância de Aterramento

Em regiões que apresentam solos com elevados valores de resistividade e, por consequência, elevados valores de resistência de aterramento, a maior parte dos desligamentos ocorrem por conta do fenômeno de *Backflashover* [4]. Por este motivo, a redução da resistência de aterramento é a prática mais usual para melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas. Na maioria dos casos esta redução é realizada aumentando o comprimento do cabo contrapeso instalado.

Todavia, o aterramento das estruturas na realidade deve ser representado como uma impedância, pois os cabos contrapesos, assim como qualquer elemento conectado à terra, apresentam efeitos resistivos, capacitivos e indutivos [53]. Entretanto, é comum considerar que os efeitos capacitivos e indutivos podem ser desprezados e se referir puramente como resistência de aterramento. Para fenômenos em baixa frequência esta consideração não provoca grandes erros, porém o mesmo não ocorre para fenômenos de alta frequência, como é o caso das descargas atmosféricas [54].

Não há um consenso acerca de como modelar a impedância de aterramento. Em função disto, diferentes metodologias são utilizadas baseando-se na teoria de circuitos, na teoria de linhas de transmissão ou na teoria de campos eletromagnéticos. Esta última destaca-se por considerar de forma mais adequada os fenômenos físicos presentes quando ocorre a passagem de uma corrente de descarga pelo sistema de aterramento [2]. A seguir são apresentados alguns dos principais trabalhos que foram realizados ao longo dos anos buscando um modelo apropriado para representar o comportamento do solo.

3.5.1 Modelos e Trabalhos Existentes

Nas décadas de 30 e 40 surgem os primeiros trabalhos referentes a eletrodos de aterramento e a seu comportamento. Em 1934, Bewley em [55] apresenta uma investigação experimental do comportamento dos eletrodos de aterramento quando submetidos a correntes impulsivas, com o objetivo de estimar a impedância dos eletrodos de aterramento. Em 1949, Sunde em [56] utiliza as equações de Maxwell para apresentar uma análise sobre os sistemas de aterramento, sendo este um dos livros mais relevantes e citados em diversos trabalhos que foram realizados referentes a sistemas de aterramento. Os trabalhos de Bewley e Sunde, juntamente com outros autores nas décadas de 30 e 40, já destacam e confirmam o comportamento impulsivo de eletrodos de aterramento.

Nas décadas de 70 e 80 foram apresentados alguns trabalhos sobre a modelagem dos sistemas de aterramento baseados na teoria de linhas de transmissão, como o trabalho de Mazzeti e Veca [57]. Neste trabalho, os autores concluem que a impedância impulsiva (obtida pela relação entre a tensão medida no ponto de injeção da corrente e a corrente injetada) é dependente do comprimento do eletrodo, condutividade do solo, intensidade e forma de onda da corrente sendo injetada no sistema.

Em 1986, foram publicados alguns trabalhos sobre a modelagem de sistemas de aterramento baseados na teoria de campos eletromagnéticos, com destaque para

os trabalhos de Dawalibi [58] e Grcev [59]. Em 1990, estes autores se juntaram para publicar um artigo que apresenta um modelo eletromagnético para transitórios em sistemas de aterramento [60]. O modelo proposto é solucionado no domínio da frequência utilizando a transformada de Fourier. Também em 1990, Visacro apresenta em [61] uma modelagem no domínio da frequência baseada na teoria de campos eletromagnéticos. Posteriormente, este modelo foi denominado de *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM), pois a solução deste modelo utiliza também alguns conceitos típicos da teoria de circuitos [62] [63].

Em 2005, Grcev e Popov apresentam uma formulação baseada na teoria de circuitos utilizando parâmetros concentrados e parâmetros distribuídos [64]. Foram simuladas hastes de aterramento verticais de diferentes comprimentos para uma ampla faixa de frequências. Os resultados obtidos para a impedância utilizando a formulação baseada na teoria de circuitos foram comparados com os resultados da formulação baseada na teoria de campos eletromagnéticos elaborada em [60]. Os autores destacam em [64] as imprecisões existentes na formulação baseada na teoria de circuitos e como os resultados obtidos na faixa de alta frequência são superestimados ao se utilizar esta formulação. Mais recentemente, em 2018, Grcev *et al.* em [65] apresentam conclusões similares com relação aos valores superestimados obtidos com modelos baseados na teoria de circuitos.

Também no ano de 2005, He *et al.* apresentam em [66] um trabalho para avaliação dos comprimentos efetivos dos cabos contrapesos utilizando uma formulação baseada na teoria de linhas de transmissão. O comprimento efetivo é definido como aquele a partir do qual o aumento do comprimento do cabo contrapeso irá reduzir a resistência de aterramento, porém não irá reduzir a impedância de aterramento e, por consequência, não irá apresentar melhorias no desempenho da linha de transmissão, sendo apenas desperdiçado o comprimento de cabo contrapeso excedente instalado. Os autores concluem que o comprimento efetivo é diretamente proporcional à resistividade do solo e ao tempo de frente de onda da corrente injetada e inversamente proporcional à magnitude da corrente injetada.

Em 2010, Choi *et al.* apresentam em [67] um trabalho onde foram realizadas simulações e medições da distribuição da corrente impulsiva e da impedância de aterramento de um cabo contrapeso com 50 metros instalado a 0,5 metros de profundidade no solo. A simulação utilizou um modelo baseado na teoria de circuitos utilizando parâmetros distribuídos. As medições foram realizadas em intervalos de 10 em 10 metros ao longo do cabo contrapeso. Os resultados das medições obtidas permitem observar que o valor da corrente diminui ao longo do cabo contrapeso,

destacando que este fenômeno é mais evidente quando são injetadas no cabo contrapeso correntes com tempos de frente de onda menores. Isto ocorre pelo fato dos componentes de alta frequência da corrente impulsiva serem dissipados mais rapidamente próximo ao ponto de injeção da corrente do que os componentes de baixa frequência.

Em 2013, Grcev, juntamente com os autores Arnautovski-Toseva e Kacarska, apresenta em [68] mais uma contribuição para o estudo do comportamento do solo e da impedância de aterramento para altas frequências. Estes autores publicaram um trabalho onde é realizada uma discussão acerca da precisão dos modelos para estudos da impedância de aterramento na faixa de alta frequência. Foram comparados os modelos baseados na teoria das imagens quase-dinâmica com três modelos baseados na teoria de linhas de transmissão. Os três modelos baseados na teoria de linhas de transmissão utilizados foram obtidos utilizando parâmetros distribuídos, aproximação logarítmica e a formulação utilizando integrais para obter os valores da impedância e da admitância. Os autores apresentam as seguintes conclusões neste trabalho: Maior precisão é obtida com os modelos baseados na teoria de campos eletromagnéticos, porém é ressaltado que modelos mais simplificados, como os modelos baseados na teoria de linhas de transmissão podem ser utilizados, dependendo das condições de aplicação. De uma maneira geral, todos os modelos apresentaram boa concordância entre os valores para solos com valores medianos de condutividade; Para solos com baixa condutividade, os valores apresentaram desvios quando comparados com modelos mais precisos, sendo os piores resultados obtidos para o modelo utilizando a teoria de linhas de transmissão com formulação utilizando parâmetros distribuídos.

Nos anos de 2015 e 2016, Visacro e Silveira utilizam a formulação apresentada em [62], ou seja, baseada na teoria de campos eletromagnéticos, em trabalhos relacionados a determinar a configuração e comprimentos dos cabos contrapesos a serem utilizados em linhas de transmissão, de maneira a se obter o desempenho desejado [69] [70]. Estes trabalhos destacam o comprimento efetivo dos cabos contrapesos e como a redução da resistência não representa necessariamente redução na impedância entre outras conclusões semelhantes as que foram apresentadas em [66].

3.5.2 Modelagem Adotada para o Sistema de Aterramento

Nesta dissertação será adotada a modelagem do sistema de aterramento utilizando a teoria de campos eletromagnéticos no domínio da frequência. Esta modelagem permite a inclusão da variação dos parâmetros do solo (condutividade e

permissividade elétrica) com a frequência (maiores detalhes podem ser obtidos na seção 3.6). Sendo assim, esta é a escolha que permite maior precisão nos resultados obtidos, conforme concluído em alguns dos trabalhos que foram realizados ao longo dos anos referentes ao estudo do comportamento transitório do solo quando há a injeção de correntes impulsivas [58] – [64] [68]. Vale ressaltar que a maior precisão na modelagem tem como consequência o maior tempo de processamento computacional necessário para efetuar os cálculos. Todavia, com a evolução da capacidade de processamento e de armazenamento dos computadores atuais, este problema já não é tão crítico quanto já foi há algumas décadas.

Mais precisamente será adotado o modelo apresentado por Lima *et al.* em [71], que é resultado da evolução de diversos trabalhos elaborados com o objetivo de modelar a impedância de aterramento do solo baseado na teoria de campos eletromagnéticos no domínio da frequência [56] [61] [62] [63], combinado com o melhor desempenho no tempo de processamento dos cálculos necessários. Este modelo é uma aproximação do *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) e seus autores o nomearam de *Modified-HEM* (mHEM). De acordo com os autores, o mHEM utiliza a distância média entre os segmentos de eletrodos, permitindo assim calcular as integrais necessárias apenas uma vez antes de realizar os cálculos para cada frequência desejada. O mHEM apresenta boa precisão nos resultados quando comparados com os resultados obtidos utilizando o HEM, porém apresentando melhor desempenho no tempo de processamento necessário.

O modelo matemático utilizado em [71] utiliza uma formulação de admitância nodal, na qual é considerado que um condutor apresentando um comprimento finito está instalado em um meio homogêneo. Cada segmento deste condutor apresenta uma componente de corrente transversal I_T , que flui para o meio que envolve o condutor, e uma componente de corrente longitudinal I_L , que circula ao longo do condutor, conforme Figura 3.5-1.

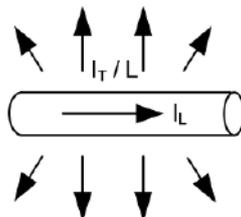


Figura 3.5-1 – Correntes em cada Condutor [63]

Cada condutor instalado no sistema de aterramento é dividido em pequenos segmentos, de maneira que o comprimento de cada segmento é pequeno o suficiente

para que se possa considerar que as correntes I_T e I_L são uniformes ao longo de um segmento. Desta forma, cada segmento irá possuir uma impedância transversal, relacionada à corrente I_T , e uma impedância longitudinal, relacionada à corrente I_L .

Expandindo este conceito para um sistema de aterramento constituído de vários segmentos, os elementos das matrizes de impedância transversal Z_T e da matriz de impedância longitudinal Z_L são obtidos, respectivamente, através das equações abaixo [62] [63]:

$$\begin{aligned} Z_{T_{jk}} &= \frac{1}{4\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)L_jL_k} \int_{L_k} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma r_{jk}}}{r_{jk}} d\zeta d\xi \\ Z_{L_{jk}} &= \frac{-j\omega u_1 \cos\phi}{4\pi} \int_{L_k} \int_{L_j} \frac{e^{-\gamma r_{jk}}}{r_{jk}} d\zeta d\xi \end{aligned} \quad (3.5-1)$$

Sendo:

σ_1 – Condutividade elétrica do meio;

ϵ_1 – Permissividade elétrica do meio, $\epsilon_1 = \epsilon_r \epsilon_0$;

u_1 – Permeabilidade magnética do meio, $u_1 = u_0$;

γ – Constante de propagação do meio definida conforme equação (3.3-21);

L_j, L_k – Comprimento em metros dos segmentos j e k , respectivamente;

r_{jk} – Distância entre um ponto no centro do segmento j até a superfície do segmento k ;

ϕ – Ângulo entre os vetores associados aos segmentos j e k .

Manipulando a equação (3.5-1) obtém-se:

$$\begin{aligned} Z_{T_{jk}} &= \frac{1}{4\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)L_jL_k} P_{jk} \\ Z_{L_{jk}} &= \frac{-i\omega u_1 \cos\phi}{4\pi} P_{jk} \end{aligned} \quad (3.5-2)$$

Sendo:

$$P_{jk} = \int_{L_k} e^{-\gamma \bar{R}} \ln\left(\frac{R_1 + R_2 + L_j}{R_1 + R_2 - L_k}\right) d\xi \quad (3.5-3)$$

Sendo R_1, R_2 e \bar{R} as distâncias definidas conforme Figura 3.5-2.

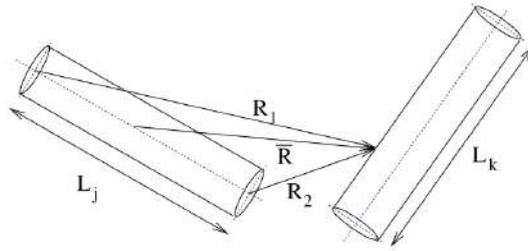


Figura 3.5-2 – Definição das Distâncias entre os segmentos [71]

Considerando que os comprimentos dos segmentos L_j e L_k são pequenos, simplificações adicionais foram realizadas em [71], de maneira a obter as equações abaixo:

$$z_{T_{jk}} = \frac{e^{-\gamma \bar{R}}}{4\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)L_j L_k} \bar{P}_{jk} \quad (3.5-4)$$

$$z_{L_{jk}} = \frac{-j\omega u_1 \cos\phi e^{-\gamma \bar{R}}}{4\pi} \bar{P}_{jk}$$

Sendo:

$$\bar{P}_{jk} = \int_{L_k} \ln \left(\frac{R_1 + R_2 + L_j}{R_1 + R_2 - L_j} \right) d\xi \quad (3.5-5)$$

Os elementos próprios das matrizes \mathbf{Z}_T e \mathbf{Z}_L permitem ainda simplificações adicionais, obtendo as equações abaixo:

$$z_{T_{jj}} = \frac{1}{2\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)L_j} \bar{P}_{jj} \quad (3.5-6)$$

$$z_{L_{jj}} = \frac{j\omega u_1 L_j}{2\pi} \bar{P}_{jj}$$

Sendo:

$$\bar{P}_{jj} = \ln \left(\frac{1 + \sqrt{1 + (r/L_j)^2}}{r/L_j} \right) - \sqrt{1 + (r/L_j)^2} + r/L_j \quad (3.5-7)$$

O efeito da interface ar-solo é incluído através do método das imagens modificado, de maneira que os elementos da matriz da impedância transversal $\bar{\mathbf{Z}}_T$ e da matriz da impedância longitudinal $\bar{\mathbf{Z}}_L$ são obtidos através das equações abaixo:

$$\overline{z_{Tjk}} = z_{Tjk} + \Gamma \frac{e^{-\gamma \overline{R}^i}}{4\pi(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)L_jL_k} \overline{P_{jk}^i} \quad (3.5-8)$$

$$\overline{z_{Ljk}} = z_{Ljk} + \Gamma \frac{j\omega u_1 \cos\phi^i e^{-\gamma \overline{R}^i}}{4\pi} \overline{P_{jk}^i}$$

Sendo:

$$\overline{P_{jk}^i} = \int_{L_k^i} \ln \left(\frac{R_{1i} + R_{2i} + L_j^i}{R_{1i} + R_{2i} - L_j^i} \right) d\xi \quad (3.5-9)$$

L_j^i, L_k^i – Comprimento em metros das imagens dos segmentos j e k , respectivamente;

ϕ^i – Ângulo entre os vetores associados ao segmento j e a imagem do segmento k ;

\overline{R}^i – Distância entre o segmento j e a imagem do segmento k ;

Γ – Coeficiente de reflexão associado com o modo magnético transversal, obtido pela equação abaixo:

$$\Gamma = \frac{\sigma_1 + j\omega\epsilon_r\epsilon_0 - j\omega\epsilon_0}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_r\epsilon_0 + j\omega\epsilon_0} \quad (3.5-10)$$

Os elementos da matriz $\overline{P_{jk}^i}$, $\overline{P_{jk}^i}$ e as distâncias \overline{R} e \overline{R}^i são independentes da frequência e, portanto, são calculados apenas uma vez.

Após determinadas as matrizes \overline{Z}_T e \overline{Z}_L , a matriz de admitância nodal Y_g pode ser obtida através da equação abaixo:

$$\mathbf{Y}_g = \mathbf{m}_A^T \cdot (\overline{Z}_T)^{-1} \cdot \mathbf{m}_A + \mathbf{m}_B^T \cdot (\overline{Z}_L)^{-1} \cdot \mathbf{m}_B \quad (3.5-11)$$

Os elementos das matrizes \mathbf{m}_A e \mathbf{m}_B são determinados através dos nós criados pela segmentação dos eletrodos e podem ser obtidos pelas equações abaixo:

$$\begin{cases} m_{Ajk} = 0,5 & \text{se o nó } j \text{ está conectado ao segmento } k \\ m_{Ajk} = 0,0 & \text{se o nó } j \text{ não está conectado ao segmento } k \end{cases} \quad (3.5-12)$$

$$\begin{cases} m_{Bjk} = +1 & \text{se o nó } j \text{ está conectado no começo do segmento } k \\ m_{Bjk} = -1 & \text{se o nó } j \text{ está conectado no final do segmento } k \\ m_{Bjk} = 0 & \text{se o nó } j \text{ não está conectado ao segmento } k \end{cases} \quad (3.5-13)$$

3.5.2.1 Impedância Harmônica

O valor da impedância harmônica pode então ser obtido através da inversão da matriz \mathbf{Y}_g multiplicada pelo vetor de injeção de corrente \mathbf{I}_{in} . Os elementos do vetor de injeção de corrente \mathbf{I}_{in} são todos iguais a zero, exceto nos nós que forem considerados como ponto de injeção de corrente onde, neste caso, é igual à unidade. A associação em paralelo dos elementos do vetor resultante desta multiplicação, que se encontram nos nós que foram considerados no vetor de injeção de corrente, representa a impedância harmônica a ser adotada como o escalar que será utilizado na matriz do sistema utilizado na seção 4.2.

3.5.2.2 Segmentação do Eletrodo

O modelo adotado possui como limitação o comprimento dos segmentos dos eletrodos, pois quanto maior o comprimento dos mesmos, maior será o erro obtido nos resultados. Em função disso, cada eletrodo deve ser dividido no maior número possível de segmentos, porém uma quantidade excessiva de segmentos faz com que seja necessário manipular matrizes de ordem elevada, prejudicando o desempenho computacional do processo. Os autores em [71], baseado no trabalho de Grcev [72], dividem os eletrodos em segmentos de maneira que o comprimento de cada segmento seja igual a um sexto do comprimento de onda. O comprimento de onda pode ser calculado pela equação abaixo:

$$\lambda = \frac{1}{f_{\Omega} \sqrt{u_0 \epsilon_r \epsilon_0}} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_1}{2\pi f_{\Omega} \epsilon_r \epsilon_0} \right)^2} \right) \right]^{-1/2} \quad (3.5-14)$$

Sendo f_{Ω} a maior frequência em Hertz de interesse.

Nesta dissertação os eletrodos serão divididos em segmento com comprimento de um décimo do comprimento de onda, ou seja, $\lambda/10$. Desta maneira, é possível combinar precisão nos resultados obtidos com a eficiência computacional na execução dos cálculos.

3.5.3 Ionização do Solo

A ionização do solo é um fenômeno não linear que ocorre quando a corrente injetada no solo possui magnitude elevada o suficiente para gerar um campo elétrico no solo superior a um determinado valor crítico. De uma maneira geral, os trabalhos existentes utilizam o valor crítico de 300 kV/m [73]. O processo de ionização do solo faz com que ocorram descargas elétricas partindo dos elementos que compõem o sistema de aterramento para o solo. Como consequência, a região que envolve os cabos contrapesos e as hastes de aterramento passa a apresentar elevada

condutividade elétrica. Uma prática comum para incluir os efeitos da ionização do solo nas simulações é considerar que a resistividade do solo na região ionizada é aproximadamente igual a zero e, portanto, o raio da região ionizada passa a ser considerado como sendo o raio equivalente dos eletrodos de aterramento durante o processo de ionização [66].

De acordo com Salari [3], o fenômeno de ionização não se processa de maneira linear ao longo do aterramento, sendo mais intenso junto aos eletrodos próximos do ponto de injeção do sistema de aterramento, conforme Figura 3.5-3. Em sistemas de aterramento de pequeno porte, o comportamento não linear da ionização do solo pode inclusive descaracterizar a geometria do sistema de aterramento, em função da abrangência da região ionizada, conforme ilustrado no exemplo da Figura 3.5-4.

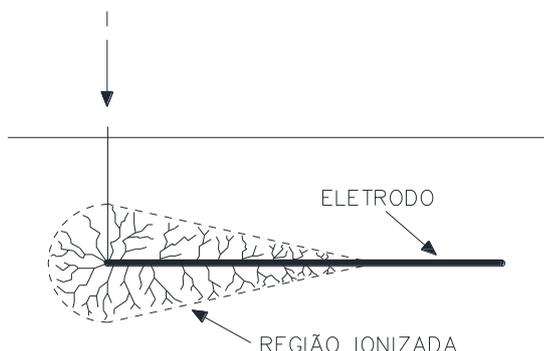


Figura 3.5-3 – Região de Ionização em um Eletrodo de Aterramento (Adaptada de [3])

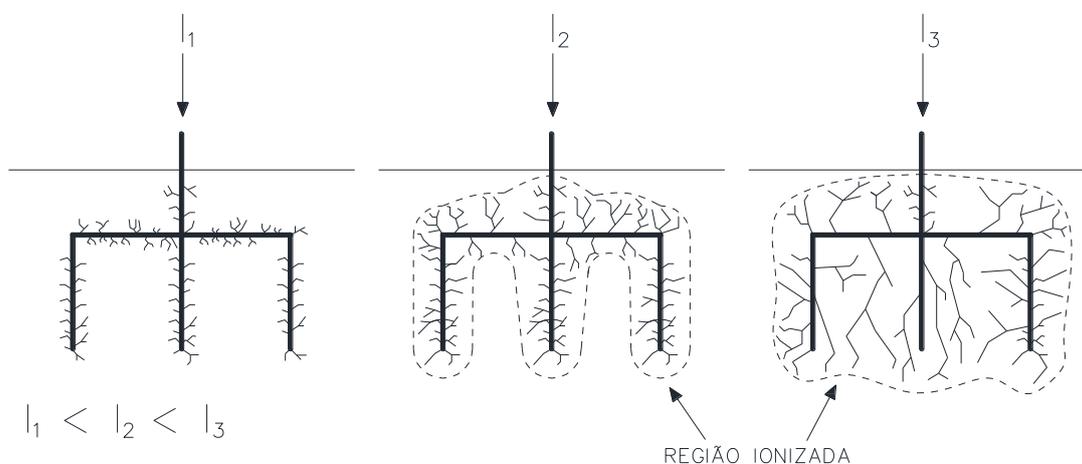


Figura 3.5-4 – Ionização do Solo em um Sistema de Aterramento de Pequeno Porte (Adaptada de [3])

De uma maneira geral, os efeitos da ionização do solo atuam reduzindo a impedância de aterramento. Para cabos contrapeso com comprimento reduzido e

sistemas de aterramento de pequeno porte, este efeito é mais relevante. Todavia, em linhas de transmissão os comprimentos dos ramais que compõem o sistema de aterramento de uma estrutura são tipicamente longos e, portanto, os efeitos de uma possível ionização do solo podem ser desconsiderados. Para todos os casos esta consideração faz com que sejam obtidos valores conservativos para a impedância de aterramento calculada [3] [63] [69] [74].

Pelos motivos expostos acima, nesta dissertação não será considerada a ionização do solo e seus efeitos não lineares.

3.6 Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência

Os parâmetros do solo, condutividade elétrica σ , permissividade elétrica ϵ e permeabilidade magnética μ possuem grande influência sobre o comportamento do solo. A permeabilidade magnética μ do solo possui valor próximo ao da permeabilidade magnética do ar, porém, os valores da condutividade elétrica σ e permissividade elétrica ϵ são dependentes da frequência [75]. Todavia, em geral, este fenômeno não é considerado devido à dificuldade de se obter uma formulação geral que modele esta dependência com a frequência [76].

Em 1934, Smith-Rose em [77] apresenta um dos primeiros trabalhos referente à variação dos parâmetros do solo com a frequência, onde foram realizadas medições em diversos tipos de solo com correntes variando de 1 kHz até 10 MHz. Nas décadas seguintes diversos autores continuaram a contribuir para este tema, em trabalhos que apresentaram diversos ensaios e medições de solo para amplas faixas de frequências [78]. A partir destas medições expressões aproximadas foram elaboradas ao longo dos anos com o objetivo de determinar os valores da condutividade elétrica σ e permissividade elétrica ϵ em função da frequência. Os trabalhos mais recentes são apresentados a seguir.

Em 1987, Visacro e Portela em [79] apresentaram expressões aproximadas baseadas em resultados experimentais para diversos tipos de solo e abrangendo a faixa de frequências de 40 Hz até 2 MHz:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma(\omega) = \sigma_{100Hz} \left(\frac{\omega}{200\pi} \right)^{0,072} \\ \epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left(2,34 \times 10^6 \left(\frac{1}{\sigma_{100Hz}} \right)^{-0,535} \cdot \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{0,597} \right) \end{array} \right. \quad (3.6-1)$$

Sendo σ_{100Hz} a condutividade elétrica do solo em baixa frequência, em Ω .metros, e f a frequência, em Hertz.

Em 2002, Portela em [80] apresenta uma nova equação para representar os parâmetros do solo baseada em novas medições utilizando técnicas mais precisas:

$$\sigma(\omega) \pm i\omega\epsilon(\omega) = \sigma_{100Hz} + \Delta_i \left[\cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \pm i \right] \left(\frac{\omega}{2\pi \times 10^6}\right)^\alpha \quad (3.6-2)$$

Sendo α e Δ_i parâmetros que dependem do modelo do solo adotado. Em [80] sugere-se utilizar $\alpha = 0,706$ e $\Delta_i = 11,71$ mS/m para obter parâmetros do solo com valores medianos.

Em 2012, Alípio e Visacro em [75] apresentam uma nova formulação baseada em medições realizadas em diferentes tipos de solos para a faixa de frequência de 100 Hz a 4 MHz:

$$\begin{aligned} \sigma(\omega) &= \sigma_{100Hz} \left[1 + \frac{1,2 \times 10^{-6}}{\sigma_{100Hz}^{0,73}} \left(\frac{\omega}{2\pi} - 100\right)^{0,65} \right] & f \geq 100 \text{ Hz} \\ \epsilon(\omega) &= \epsilon_0 \left[7,6 \times 10^3 \left(\frac{\omega}{2\pi}\right)^{-0,4} + 1,3 \right] & f \geq 10 \text{ kHz} \end{aligned} \quad (3.6-3)$$

De uma maneira geral, a inclusão da variação com a frequência dos parâmetros do solo (σ e ϵ) provoca a redução do valor da impedância de aterramento e este efeito é mais evidente quanto maior for o valor da resistividade do solo. Visacro e Silveira, em [81], apresentam o impacto nos resultados obtidos para a taxa de desligamentos por *Backflashover* ao se considerar a resistividade e a permissividade relativa do solo variando com a frequência. Os resultados apresentam que a taxa de desligamento por *Backflashover* é reduzida em até 32% ao considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência.

Nesta dissertação será considerada a formulação dos autores Alípio e Visacro [75], conforme equação (3.6-3). Esta formulação foi obtida a partir da medição de solos de 31 regiões diferentes no Brasil com resistividades variando de 60 a 9100 $\Omega.m$, sendo assim, aplicável a diversos tipos de solo e suas respectivas modelagens.

CAPÍTULO 4. FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

No presente capítulo é apresentada a ferramenta computacional desenvolvida a partir da pesquisa desta dissertação que envolve, principalmente, o desempenho de linhas de transmissão na ocorrência de uma descarga atmosférica incidindo sobre uma das torres do sistema. A ferramenta computacional foi desenvolvida com base na interação dos modelos dos elementos que constituem o sistema de uma linha de transmissão e que foram apresentados no capítulo 3.

A criação desta ferramenta computacional constitui-se como um dos principais objetivos deste trabalho, atendendo a demanda por modelagens mais precisas sem que ocorra prejuízo na generalidade de sua utilização. Em outras palavras, é possível a inserção das dimensões e características da estrutura da linha de transmissão, e da disposição dos cabos contrapesos instalados no sistema de aterramento, permitindo assim avaliar a resposta da interação do sistema como um todo.

O código da ferramenta computacional é apresentado na seção 4.5, porém primeiramente são apresentados alguns aspectos fundamentais para a sua elaboração. Na seção 4.2 é apresentada a configuração adotada para o sistema, de maneira a ser possível obter as formas de ondas transitórias da tensão em diversos pontos do sistema. Na seção 4.3 é apresentada a transformada numérica de Laplace, de maneira a ser possível a resolução do sistema no domínio da frequência. E na seção 4.4 é apresentada a metodologia de cálculo que permite mensurar o desempenho de uma linha de transmissão quanto ao seu número de desligamentos estimados.

4.2 Configuração do Sistema

A configuração do sistema é apresentada na Figura 4.2-1. O sistema é composto por cinco estruturas e quatro vãos entre elas. Considera-se que a descarga atmosférica atinge o topo da terceira estrutura, portanto, a análise das sobretensões nas cadeias de isoladores também é realizada nesta estrutura. Esta configuração está de acordo com os trabalhos realizados em [27] [48] [49].

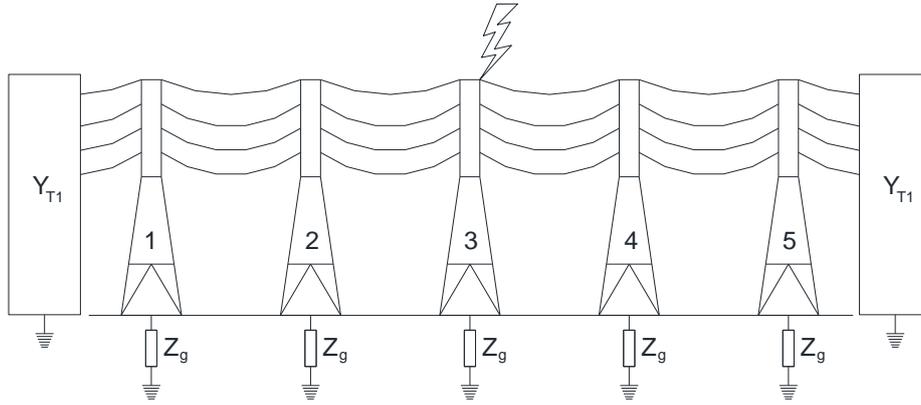


Figura 4.2-1 – Configuração do Sistema Adotado

A matriz do sistema, Y_{system} , considerando apenas as admitâncias dos vãos da linha de transmissão é apresentada na equação a seguir:

$$Y_{system} = \begin{bmatrix} (Y_{T1} + Y_{L1}) & Y_{L2} & & & 0 \\ Y_{L2} & 2Y_{L1} & Y_{L2} & & \\ & Y_{L2} & 2Y_{L1} & Y_{L2} & \\ & & Y_{L2} & 2Y_{L1} & Y_{L2} \\ 0 & & & Y_{L2} & (Y_{T1} + Y_{L1}) \end{bmatrix} \quad (4.2-1)$$

Sendo as submatrizes Y_{T1} , Y_{L1} e Y_{L2} obtidas conforme equação (3.3-1). As submatrizes Y_{L1} e Y_{L2} são calculadas utilizando o vão típico da linha de transmissão em estudo, enquanto a submatriz Y_{T1} é calculada adotando um vão suficientemente grande para não haver reflexões na terceira estrutura.

Conforme mencionado na seção 3.4.1, as estruturas metálicas são modeladas como uma conexão série de quatro seções de linhas de transmissão monofásicas (conforme Figura 3.4-2), de maneira a ser possível calcular as sobretensões obtidas em cada uma das cadeias de isoladores na ocasião da injeção de uma corrente de descarga atmosférica. As admitâncias destas quatro seções de linhas de transmissão monofásicas, assim como a admitância do sistema de aterramento (seção 3.5.2), são incluídas na matriz do sistema Y_{system} para cada uma das cinco estruturas consideradas na configuração do sistema adotado (Figura 4.2-1).

4.3 Transformada Numérica de Laplace

O modelo proposto é solucionado no domínio da frequência. Portanto, a transformada numérica de Laplace (*Numerical Laplace Transform* - NLT) é aplicada a corrente injetada no sistema (seção 3.2.2) e então multiplicada pela função de transferência do sistema, determinada pela matriz do sistema Y_{system} , para cada

frequência de interesse. A resposta do sistema no domínio do tempo é então obtida pela transformada numérica de Laplace inversa.

A transformada numérica de Laplace foi introduzida em 1978 por Wilcox [82] com o objetivo de ser aplicada a formas de ondas transitórias utilizando o algoritmo da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT). Sendo $f(t)$ uma forma de onda transitória e $F(s)$ sua respectiva imagem no domínio da frequência, estas funções estão relacionadas pela transformada de Laplace pela equação a seguir [83]:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (4.3-1)$$

E a transformada inversa de Laplace é obtida pela equação a seguir:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st} ds \quad (4.3-2)$$

Sendo s a frequência complexa determinada por $s = c + jw$ com w sendo a frequência angular. Portanto as equações (4.3-1) e (4.3-2) podem ser apresentadas como:

$$F(s) = \int_0^{\infty} [f(t)e^{-ct}]e^{-jw t} dt \quad (4.3-3)$$

$$f(t) = \frac{e^{ct}}{2\pi j} \int_{-\infty}^{+\infty} F(s)e^{jw t} dw \quad (4.3-4)$$

É possível observar que as equações (4.3-3) e (4.3-4) são equivalentes a transformada de Fourier do sinal $f(t)e^{-ct}$. Portanto, estas equações podem ser aproximadas numericamente pela transformada rápida de Fourier [42] [84] [85]:

$$F_m = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} f_n D_n^{-1} e^{(-j2\pi m n/N)} \quad (4.3-5)$$

$$f_n = \frac{2\Delta w}{\pi} \operatorname{Re} \left\{ D_n \sum_{m=0}^{N-1} F_m \delta_m e^{(j2\pi m n/N)} \right\} \quad (4.3-6)$$

Sendo:

$$m, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

$$F_m = F[c + j(2m + 1)\Delta w] \quad (4.3-7)$$

$$f_n = f(n\Delta t) \quad (4.3-8)$$

$$D_n = e^{(c n \Delta t + j\pi n/N)} \quad (4.3-9)$$

$$\delta_m = \delta[(2m + 1)\Delta w] \quad (4.3-10)$$

$$\Delta t = T/N \quad (4.3-11)$$

$$\Delta w = 2\pi/T = 2\pi/N\Delta t \quad (4.3-12)$$

$$f_{\Omega} = 2\pi/\Delta t \quad (4.3-13)$$

Sendo N o número de amostras de frequências, T o tempo total de observação do transitório, f_{Ω} a frequência máxima, c um fator de amortecimento e δ_m uma função janela que tem como objetivo reduzir os efeitos das oscilações de Gibbs e erros de truncamento.

Na literatura técnica há diferentes expressões existentes para a função janela δ_m . Nesta dissertação será utilizada a função apresentada a seguir [27]:

$$\delta_m(n) = \cos(n/N)^2 \quad (4.3-14)$$

Com relação ao fator de amortecimento c , há diferentes expressões para determinar o valor mais adequado para este fator. Wilcox [82] propôs determinar o valor de c através da equação a seguir:

$$c = 2\Delta w \quad (4.3-15)$$

Wedepohl [86] propôs determinar o valor de c utilizando o número de amostras N e o tempo total de observação do transitório T através da equação a seguir:

$$c = \ln(N^2) / T \quad (4.3-16)$$

Nesta dissertação o fator de amortecimento c é determinado através da equação utilizada em [27] [42] e apresentada a seguir:

$$c = -\ln(0,001) / T \quad (4.3-17)$$

Portanto, o procedimento para realizar os cálculos no domínio da frequência e posterior obtenção da resposta transitória no domínio do tempo é realizado conforme apresentado por Lima *et al.* [27] e reproduzido a seguir:

1. Criar um vetor auxiliar F_{low} contendo a resposta da transformada numérica de Laplace de F_0 a $F_{N/2}$, conforme equação (4.3-5);
2. Criar outro vetor auxiliar $F_{high} = F_{low}^*$, ou seja, o vetor F_{high} é formado pelo complexo conjugado dos elementos de F_{low} ;
3. Inverter a ordem dos elementos de F_{high} ;
4. Remover o elemento $F_{N/2}$ no vetor F_{low} e o elemento F_0 no vetor F_{high} ;
5. Obter o vetor F concatenando os vetores F_{low} e F_{high} ;
6. Aplicar a transformada numérica inversa de Laplace ao vetor F , conforme equação (4.3-6).

4.4 Taxa de Desligamento Anual Estimada

A avaliação do desempenho de uma linha de transmissão é baseada no cálculo da taxa de desligamentos a cada 100 km por ano. Diversos modelos foram elaborados ao longo das últimas décadas com o objetivo de simular e estimar a taxa de desligamentos de uma linha de transmissão na ocasião da incidência de uma descarga atmosférica. Os modelos mais populares foram elaborados pelo CIGRE [4] e pelo IEEE [87]. Todavia, estes modelos apesar da facilidade de utilização, apresentam diversas simplificações que podem afetar a precisão dos resultados e, por consequência, afetar também decisões acerca do projeto das estruturas da linha de transmissão, conforme Silveira *et al.* [13].

A Tabela 4.4-1, retirada de [88], apresenta alguns critérios estabelecidos pelos procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS), entre eles a taxa de desligamento anual a cada 100 km exigida para uma linha de transmissão em função do seu nível de tensão.

Tabela 4.4-1 – Desempenho Exigido das LTs Frente a Descargas Atmosféricas [88]

Classe de tensão [kV]	Número mínimo de cabos para-raios por estrutura	Desligamentos de um circuito por 100 km por ano	
		Devido à falha de blindagem	Total
≥ 345	2	$\leq 10^{-2}$	≤ 1
230	2	$\leq 10^{-2}$	≤ 2

O atendimento aos valores da tabela acima é uma exigência para o desenvolvimento de projetos e construções de linhas de transmissão no Brasil. Portanto, além da apresentação do comportamento transitório das formas de onda envolvidas na ocorrência de uma descarga atmosférica em uma linha de transmissão, o programa de simulação desenvolvido apresenta também a quantidade de desligamentos anual a cada 100 km estimada para os cenários simulados.

Nesta dissertação a taxa de desligamento anual estimada é obtida utilizando as curvas de tensão desenvolvidas e a possível ruptura do isolamento nas cadeias de isoladores da estrutura na qual está incidindo a descarga atmosférica. A análise da condição de ruptura do isolamento da cadeia de isoladores é realizada utilizando o método de integração DE (*Destructive Effective*), inicialmente elaborado por Witzke e Bliss [89] na década de 50. Este método busca estimar o desempenho de isoladores quando submetidos a curvas não padronizadas de sobretensões. Em 1973, Caldwell e Darveniza [90] apresentam resultados experimentais acerca do desempenho do isolamento de diferentes cadeias de isoladores submetidas a diferentes curvas de tensão utilizando o método DE, definido a partir da equação abaixo:

$$DE = \int_{t_0}^{\infty} [e(t) - e_0]^{K_d} dt \quad (4.4-1)$$

Sendo que $e(t)$ é a tensão aplicada, e_0 é a tensão mínima para iniciar o processo de ruptura do isolamento, t_0 é o tempo inicial quando a tensão $e(t)$ supera o valor de e_0 pela primeira vez e K_d é uma constante. O método é baseado no fato que há uma tensão mínima e_0 que deve ser excedida antes de haver o início do processo de ruptura do isolamento e, além disso, é necessário também que a tensão permaneça acima desta tensão mínima por algum tempo para que ocorra a ruptura do isolamento [91] e, por consequência, o desligamento da linha de transmissão por *Backflashover*. Esta ruptura ocorre quando o resultado do método da integração DE é superior a um valor base DE_B , conforme apresentado na Figura 4.4-1.

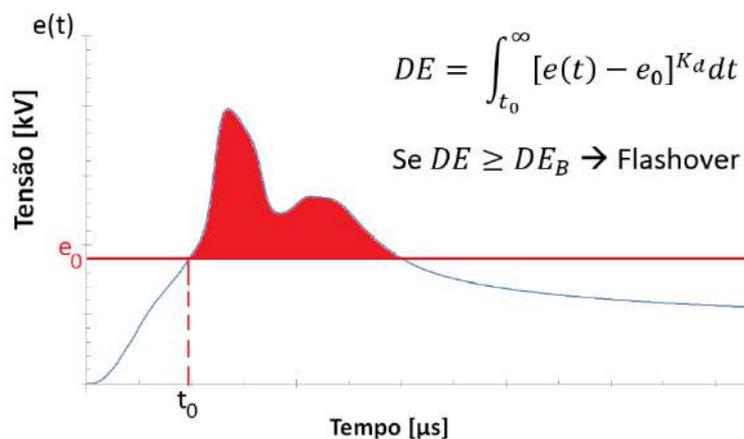


Figura 4.4-1 – Método de Integração DE

Hileman [15], Visacro e Silveira [69] adotam o valor da constante K_d igual a 1,36 e definem os valores de DE_B e de e_0 a partir das equações abaixo:

$$DE_B = 1,1506(CFO)^{K_d} \quad (4.4-2)$$

$$e_0 = 0,77CFO \quad (4.4-3)$$

Sendo CFO a tensão crítica de *Flashover* (*Critical Flashover Overvoltage*), que define o valor da tensão correspondente a 50% de probabilidade de ruptura do isolamento, definida a partir da equação abaixo [7]:

$$CFO = 530d \quad (4.4-4)$$

Sendo d a distância de arco da cadeia de isoladores.

As curvas de sobretensões nas cadeias de isoladores são diretamente proporcionais à magnitude do pico da corrente da descarga atmosférica considerada. Portanto, para se determinar o momento onde ocorre a ruptura do isolamento, basta

multiplicar as curvas de sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores por um fator k e ir aumentando este fator até o momento em que $DE \geq DE_B$. A curva da corrente da descarga atmosférica deverá ser então multiplicada por este mesmo fator k , obtendo assim, a curva da corrente crítica. A probabilidade de ocorrer uma corrente de descarga atmosférica que exceda este valor de pico da corrente crítica, pode ser obtida através da equação abaixo [92]:

$$P_I = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{43,3}\right)^{3,8}} \quad (4.4-5)$$

Sendo I o valor do pico da corrente crítica.

É possível obter então uma estimativa sobre a taxa de desligamento anual, T_{anual} , através da equação abaixo [4]:

$$T_{anual} = 0,6N_L \cdot P_I \quad (4.4-6)$$

Sendo N_L a incidência média de descargas atmosféricas em uma linha de transmissão, obtida a partir da equação abaixo [4]:

$$N_L = N_g \cdot (2R_a + b)/10 \quad (4.4-7)$$

Sendo N_g a densidade de descargas atmosféricas (para maiores detalhes ver seção 2.5), b a distância entre os para-raios da linha de transmissão e R_a o raio de atração médio. Eriksson, em [93], apresenta uma expressão simplificada para obtenção do valor de R_a em função da altura da torre da linha de transmissão, H_T , conforme equação abaixo:

$$R_a = 14H_T^{0,6} \quad (4.4-8)$$

O procedimento para obtenção da taxa de desligamentos anual pode então ser resumido nas seguintes etapas:

1. Determinação das curvas $e(t)$ a partir do cálculo das sobretensões nas cadeias de isoladores da estrutura na qual está incidindo a descarga atmosférica;
2. Determinar o valor de DE_B e e_0 , utilizando as equações (4.4-2) e (4.4-3), respectivamente;
3. Multiplicar a curva $e(t)$ de cada uma das cadeias de isoladores por um fator k e aumentar o valor de k até o instante em que o resultado de DE for maior ou igual a DE_B ;

4. Multiplicar o valor de pico da curva da corrente de descarga atmosférica adotada pelo fator k resultante da etapa anterior;
5. Calcular a probabilidade de haver uma corrente com o valor de pico que exceda o valor de pico da corrente crítica, calculada na etapa anterior, utilizando a equação (4.4–5);
6. E, por fim, determinar a taxa de desligamentos anual, conforme equações (4.4–6) a (4.4–8).

4.5 Programa Desenvolvido

Com base nas seções 4.2, 4.3, 4.4 e nos modelos dos componentes do sistema apresentados no capítulo 3, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que permite calcular a taxa de desligamentos estimada e simular as sobretensões obtidas em diversos pontos de um sistema. O programa desenvolvido foi nomeado de *PRTL-mHEM*, por juntar conceitos do *PRTL* [27] e do *mHEM* [71]. O código do programa e as simulações apresentadas nesta dissertação podem ser obtidas em [94].

O código foi elaborado utilizando a linguagem *Python* [95]. Esta linguagem é usualmente utilizada para modelagens de problemas e desenvolvimento de aplicações complexas que envolvem conhecimento de outras áreas. Nesta dissertação, a escolha por utilizar a linguagem *Python* foi pelo fato de ser uma linguagem altamente legível e *open source*, ou seja, a maioria das bibliotecas necessárias para realizar operações comuns na área científica estão disponíveis para os usuários. Na elaboração do código foi utilizada uma abordagem de programação orientada a objetos, que representa um modelo de análise e programação baseado na interação entre diversas unidades denominadas classes [96]. No programa desenvolvido nesta dissertação, as classes envolvidas se relacionam conforme apresentado na Figura 4.5-1.

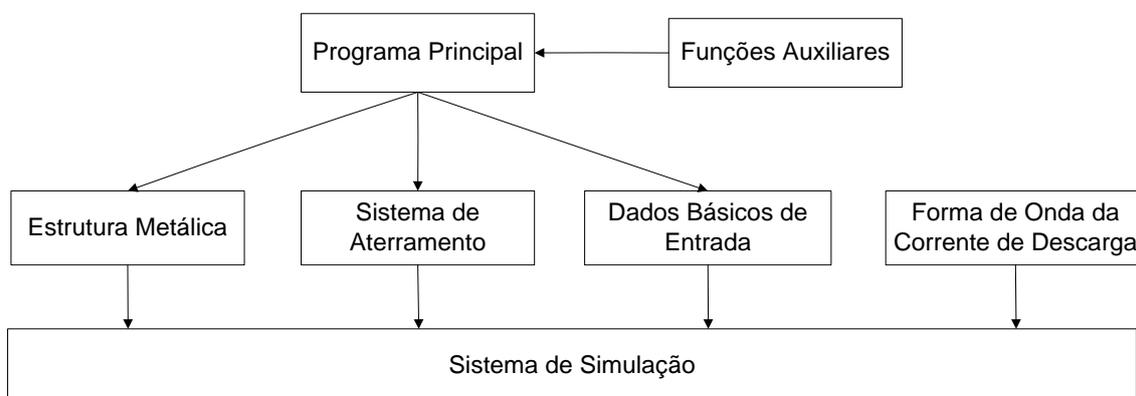


Figura 4.5-1 – Relacionamento entre as Classes

Na Figura 4.5-1 a classe “Dados Básicos de Entrada” é definida a partir da leitura dos dados de entrada referentes à condutividade e permissividade elétrica do

solo, tamanho do vão entre as estruturas, tempo e quantidade de amostras a serem consideradas na simulação. A classe “Funções Auxiliares” contempla funções utilizadas na leitura e verificação dos dados de entrada, como também no arquivamento dos dados de saída.

A Figura 4.5-2 apresenta o fluxograma das principais etapas envolvidas no processo de cálculo do programa desenvolvido. Algumas observações acerca das etapas envolvidas são realizadas nos parágrafos a seguir.

A etapa “Leitura de Dados” consiste na leitura dos dados acerca da disposição geométrica da estrutura e das características dos cabos condutores e para-raios utilizados, como também contempla a aquisição dos dados referentes à disposição em que os cabos contrapesos são instalados no sistema de aterramento. A inserção dos dados é feita através de arquivos de texto comuns, onde são inseridas as coordenadas da disposição geométrica da estrutura e dos cabos contrapesos. Nesta etapa também é realizada a leitura de alguns parâmetros básicos para a simulação como número de amostras, tempo de simulação, entre outros. No Apêndice A são apresentados exemplos dos arquivos de texto para a entrada dos dados necessários para execução do programa.

O programa permite o cálculo do sistema de aterramento de diversas maneiras, permitindo utilizar modelos mais simples ou modelos mais precisos. Abrangendo o modelo mais simples, o programa permite utilizar um valor de resistência constante. É possível também utilizar a modelagem mais precisa, com o sistema de aterramento sendo modelado como uma impedância dependente da frequência, conforme metodologia apresentada na seção 3.5.2. A influência dos diferentes modelos do sistema de aterramento nos resultados obtidos é apresentada na seção 5.3.

Em virtude do esforço computacional envolvido, a etapa de cálculo da impedância do sistema de aterramento é a que consome maior tempo para ser executada. Sistemas de aterramento que utilizam cabos contrapesos com comprimento total extenso podem chegar a consumir algumas horas para o término de sua execução. Os tempos de execução para diversas configurações de sistema de aterramento são apresentadas na seção 5.2.4. Em função disso, o programa permite o arquivamento da resposta harmônica do sistema de aterramento. Isto faz com que não seja necessário realizar toda a etapa de cálculo do sistema de aterramento novamente, caso seja mantida a mesma condutividade do solo e os mesmos parâmetros de simulação, como o número de amostras e o tempo de simulação.

A etapa “Simulação do Sistema” consiste em transformar a corrente de retorno da descarga atmosférica para o domínio da frequência utilizando a transformada numérica de Laplace, conforme seção 4.3, e aplica-la ao sistema da Figura 4.2-1 para cada frequência de interesse. As formas de onda de tensão nas cadeias de isoladores são então obtidas através da transformada numérica inversa de Laplace.

A etapa “Calcular Taxa de Desligamentos Estimada” calcula o número de desligamentos estimado para o sistema utilizando o método de integração DE, conforme seção 4.4. O cálculo é realizado para cada uma das formas de onda de tensão obtidas nas cadeias de isoladores, pois, dependendo das características do sistema, a sobretensão mais severa será obtida em cadeias de isoladores distintas, conforme resultados apresentados na seção 5.4. É apresentado na saída do programa o resultado para o pior caso, ou seja, para a forma de onda de sobretensão que obtiver o maior número de desligamentos estimados.

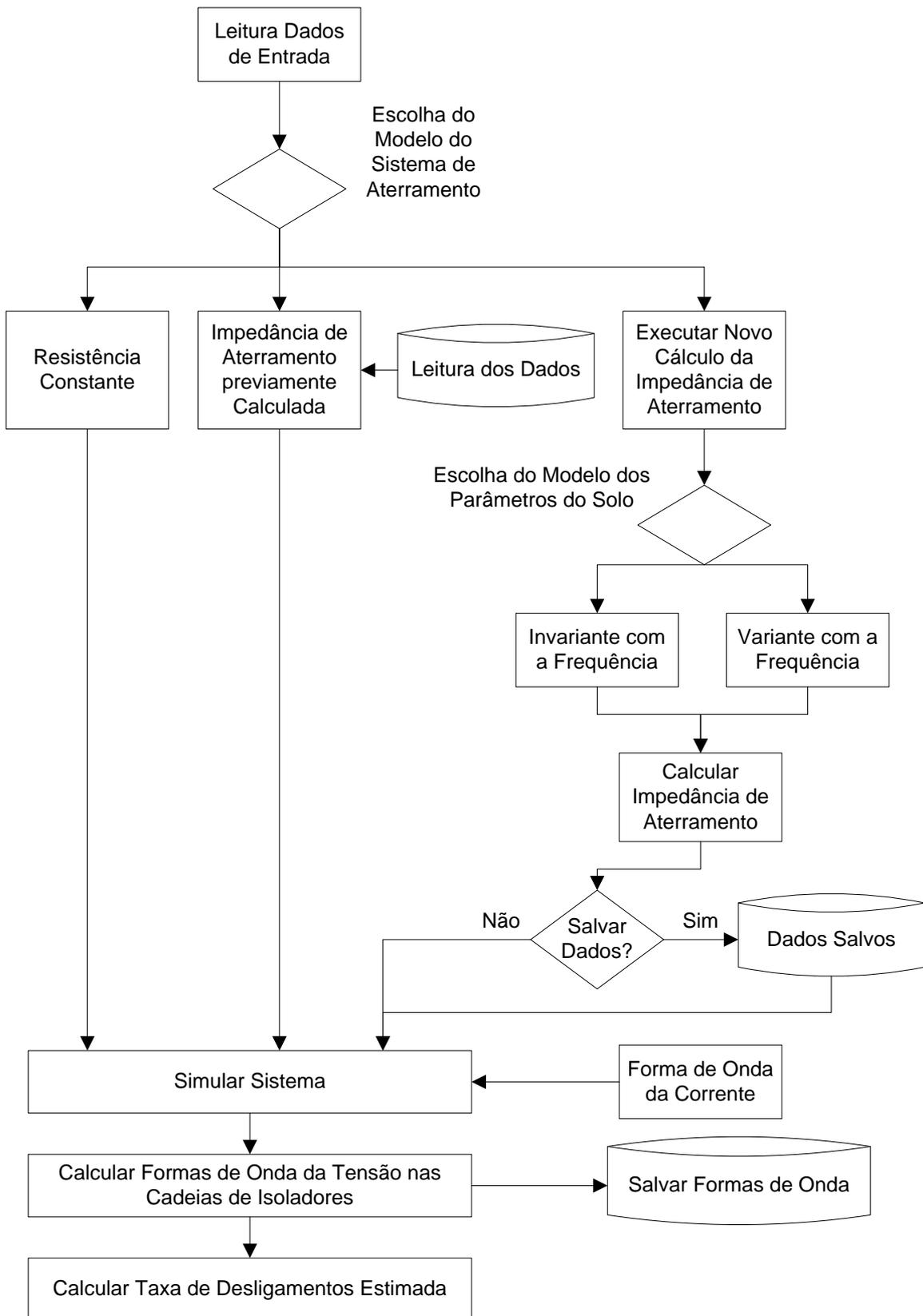


Figura 4.5-2 – Fluxograma de Etapas da Ferramenta Computacional

CAPÍTULO 5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

5.1 Introdução

Neste capítulo serão realizadas simulações envolvendo uma linha de transmissão na ocasião da incidência de uma descarga atmosférica. As simulações e seus respectivos resultados serão obtidos utilizando a ferramenta computacional, *PRTL-mHEM*, apresentada no capítulo 4. Inicialmente, serão apresentadas algumas características e considerações iniciais sobre o sistema simulado, como a geometria da torre utilizada, as topologias do sistema de aterramento, entre outras informações necessárias para as simulações. Nas seções seguintes serão realizadas diversas simulações com o objetivo de avaliar a influência de diversos parâmetros e cenários no desempenho da linha de transmissão. Será avaliada a influência nos resultados da modelagem dos parâmetros do solo, das topologias do sistema de aterramento, do fenômeno do comprimento efetivo dos cabos contrapesos e, por fim, da instalação de cabos para-raios adicionais abaixo dos cabos condutores. Serão apresentadas análises acerca da eficácia de cada medida simulada, com base nas curvas de sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores e nos resultados obtidos para o número de desligamentos estimados para os cenários simulados.

5.2 Considerações Iniciais

Nesta seção serão apresentadas as dimensões da estrutura metálica utilizada nas simulações, as diferentes topologias de sistemas de aterramento consideradas e demais informações necessárias para realizar as simulações apresentadas nas seções seguintes.

5.2.1 Configuração Utilizada

Conforme já mencionado, a geometria da torre e suas características como, por exemplo, posição dos cabos condutores e para-raios, tipo e quantidade de condutores por fase, se é circuito simples ou duplo, entre outros elementos, influenciam a resposta do sistema e as sobretensões obtidas na ocorrência de uma descarga atmosférica [14].

Nesta dissertação optou-se por utilizar nas simulações realizadas nas próximas seções uma silhueta típica de uma estrutura de circuito duplo vertical, usualmente utilizada em linhas de transmissão com nível de tensão de 230 kV, com um cabo por fase e dois cabos para-raios. A Figura 5.2-1 apresenta as dimensões da estrutura utilizada.

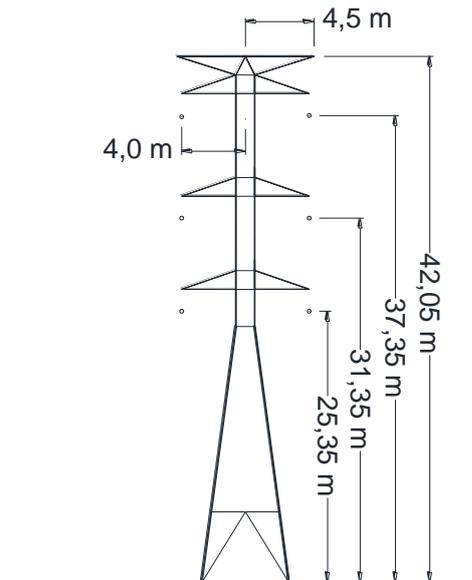


Figura 5.2-1 – Configuração Geométrica da Estrutura Utilizada

A Tabela 5.2-1 apresenta os dados referentes aos cabos condutores e para-raios utilizados nas simulações.

Tabela 5.2-1 – Características dos Cabos Utilizados

Cabo	Diâmetro (m)	Resistência (ohm/m)
Condutor	0,02653	0,00007998
Para-raios	0,00914	0,00419

Para as seções de linhas de transmissão monofásicas, utilizadas no modelo da estrutura metálica (ver seção 3.4.1), foram adotados os valores de 130, 240, 240 e 290 ohms para as impedâncias Z_1 a Z_4 , respectivamente, conforme [27].

Foi adotado o valor do vão igual a 400 metros entre as estruturas do sistema utilizado nas simulações, conforme Figura 4.2-1.

Para determinar a distância de arco, necessária para o cálculo da taxa de desligamentos estimada, adotou-se uma configuração de cadeia de isoladores de vidro frequentemente utilizada em linhas de transmissão em 230 kV formada por 15 isoladores com 0,146 metros de altura. Portanto, a distância de arco utilizada nas simulações é igual a 2,19 metros, conforme Figura 5.2-2.

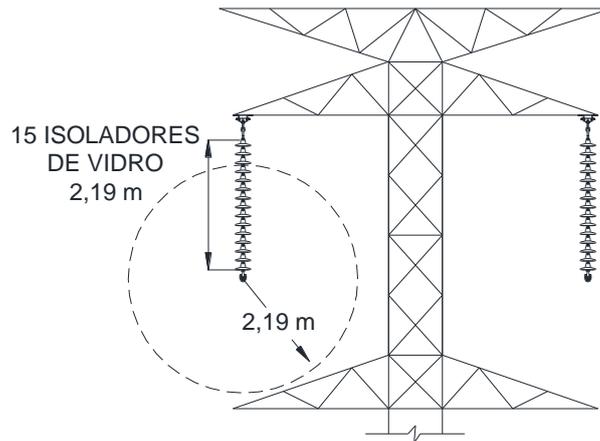


Figura 5.2-2 – Cadeia de Isoladores e Distância de Arco

Os arquivos de texto de entrada dos dados para as simulações que foram realizadas neste capítulo podem ser obtidos em [94].

5.2.2 Densidade de Descargas para o Solo

Para o cálculo da taxa de desligamentos estimada adotou-se que a densidade de descargas atmosféricas para o solo é igual a 9 descargas/km²/ano, que corresponde a 77 dias com trovoadas em um período de um ano, conforme equação (2.5–1). O valor de 9 descargas/km²/ano é tipicamente encontrado em diversas regiões do Brasil, conforme Figura 2.5-2.

5.2.3 Topologias de Sistemas de Aterramento

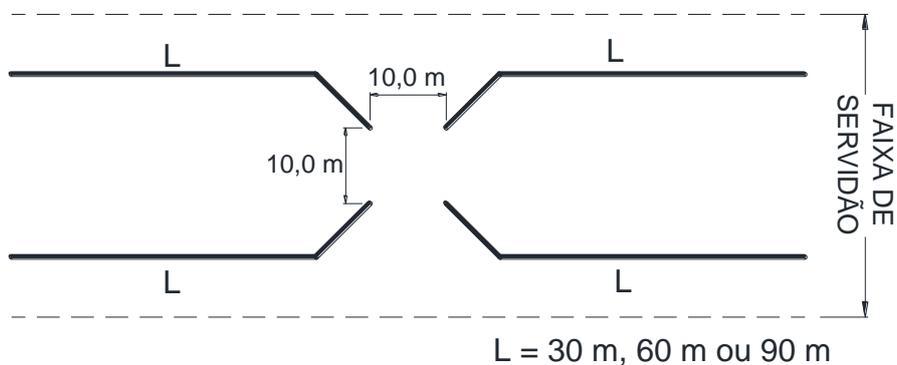
Conforme já mencionado, a prática mais usual para melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é a redução da impedância de aterramento [4]. A disposição e o comprimento dos cabos contrapesos que são instalados no solo e conectados às estruturas influenciam no valor da impedância a ser obtida e, por consequência, no desempenho da linha de transmissão na ocorrência de uma descarga atmosférica.

Nesta dissertação serão simuladas três diferentes topologias de sistema de aterramento, denominadas de topologia 1, 2 e 3. Para cada uma das três topologias consideradas, será adotado também que os comprimentos totais dos cabos contrapesos são iguais a 120, 240, 360 e 540 metros.

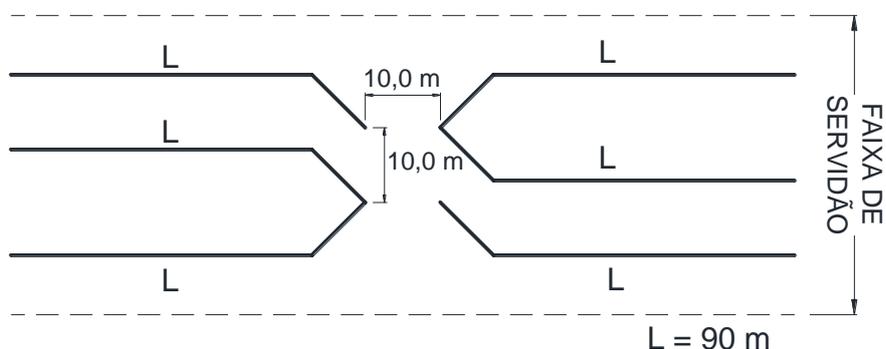
5.2.3.1 Topologia 1 – Arranjo Convencional

A topologia 1 é constituída do arranjo convencional de cabos contrapesos frequentemente utilizados em sistemas de aterramento de linhas de transmissão em alta e extra alta tensão. Nesta configuração há necessidade de liberar uma área

extensa ao longo da faixa de servidão, além da área da praça de montagem das torres. Vale ressaltar que para linhas de transmissão com nível de tensão de 230 kV, a largura da faixa de servidão é de aproximadamente 40 metros. A Figura 5.2-3 apresenta as configurações da topologia 1 para os comprimentos totais de cabos contrapesos considerados nesta dissertação.



(a) Configurações com Comprimentos Totais de 120, 240 e 360 metros



(b) Configuração com Comprimento Total de 540 metros

Figura 5.2-3 – Configurações da Topologia 1 do Sistema de Aterramento

5.2.3.2 Topologia 2 – Arranjo Convencional para Área com Restrições Ambientais

Em virtude da topologia 1 apresentar grande impacto ambiental e da possibilidade de embargos ambientais para a construção de linhas de transmissão em áreas de preservação ambiental, diferentes topologias de sistemas de aterramento podem ser utilizadas, com o objetivo de diminuir a área afetada pela instalação dos cabos contrapesos e, portanto, diminuir a necessidade de desmatamento das áreas afetadas. A topologia 2 apresenta a alternativa que é usualmente utilizada em sistemas de aterramento instalados em áreas com restrições ambientais. Nesta configuração, além da área necessária para a montagem das torres, é necessário apenas liberar a área ao longo da faixa de serviço (aproximadamente 5 metros de largura) para acomodar os cabos contrapesos. A Figura 5.2-4 apresenta as

configurações da topologia 2 para os comprimentos totais de cabos contrapesos considerados nesta dissertação.

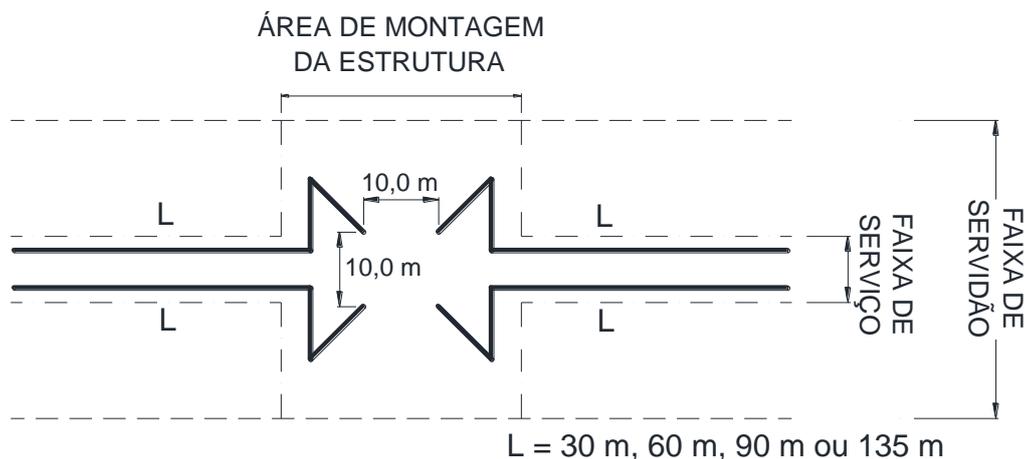
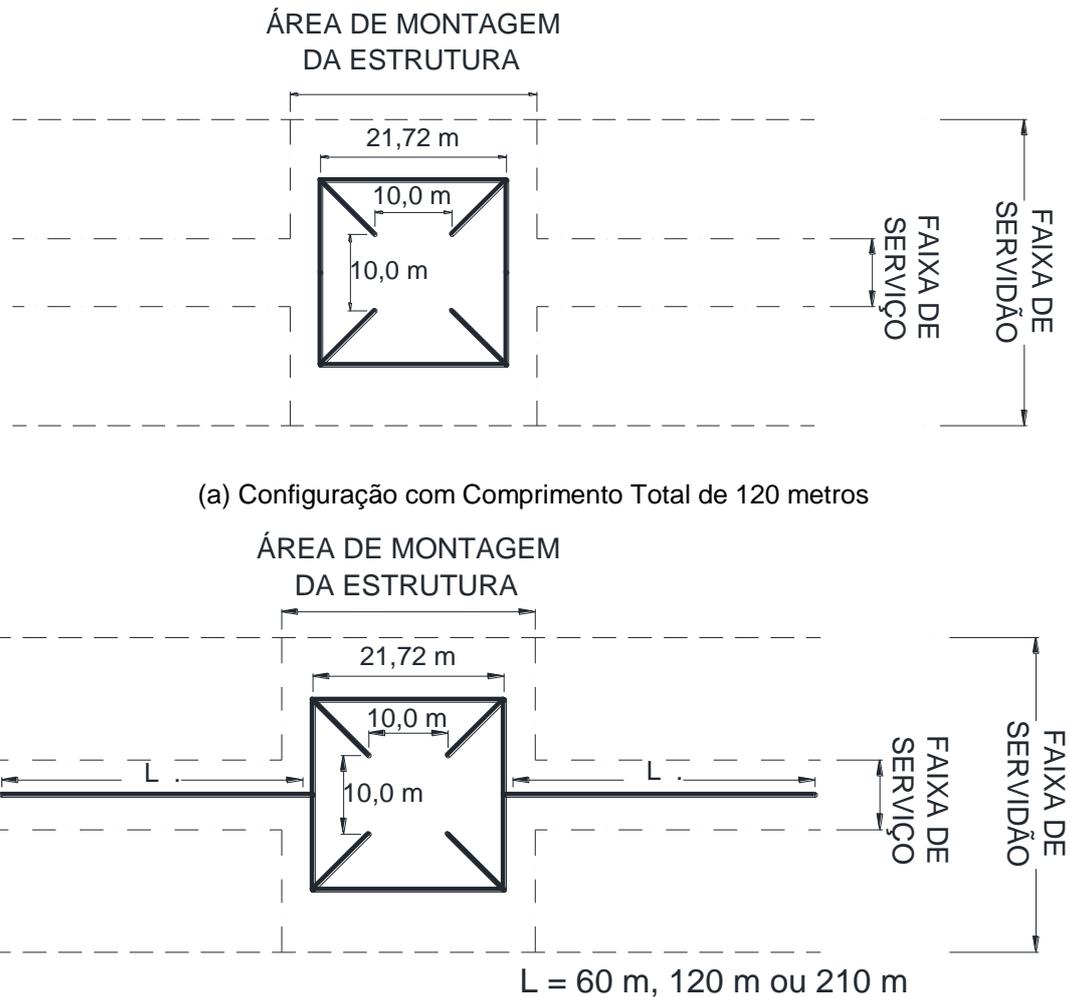


Figura 5.2-4 – Configurações da Topologia 2 do Sistema de Aterramento – Comprimentos Totais de 120, 240, 360 e 540 metros

5.2.3.3 Topologia 3 – Arranjo Não Convencional para Área com Restrições Ambientais

A topologia 3 representa uma alternativa não convencional para a instalação de cabos contrapesos em áreas com restrições ambientais. Assim como na topologia 2, nesta configuração também há a necessidade de liberar a área de montagem das torres e a área ao longo da faixa de serviço (aproximadamente 5 metros de largura) para acomodar os cabos contrapesos, porém apenas um ramal de cabo contrapeso segue dentro da faixa de serviço. A Figura 5.2-5 apresenta as configurações da topologia 3 para os comprimentos totais de cabos contrapesos considerados nesta dissertação.



(b) Configurações com Comprimentos Totais de 240, 360 e 540 metros

Figura 5.2-5 – Configurações da Topologia 3 do Sistema de Aterramento

5.2.4 Parâmetros de Simulação Computacional

O tempo total de simulação adotado foi de $50 \mu\text{s}$, desta maneira apresentando na saída tempo suficiente para ser possível observar o fenômeno transitório obtido. Foram consideradas também 512 amostras, apresentando resolução suficiente para as formas de onda transitórias das sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores na ocasião da incidência de uma descarga atmosférica.

Vale ressaltar que o maior esforço computacional ocorre para obter a modelagem e a resposta do sistema de aterramento. A execução do código para modelar e obter a resposta do sistema formado pelas cinco estruturas da Figura 4.2-1 ocorre em alguns poucos segundos, enquanto que a modelagem do sistema de aterramento pode consumir vários minutos dependendo de sua configuração. A Tabela 5.2-2 apresenta o tempo total de execução das simulações dos sistemas de aterramento das topologias apresentadas na seção 5.2.3 e utilizadas nas seções

seguintes. As simulações foram realizadas utilizando um computador com processador Intel^(R) Core^(TM) i7-4500U, CPU 1.8 GHz e 8 GB de memória RAM.

Tabela 5.2-2 – Sistema de Aterramento – Tempos de Execução das Simulações

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabos Contrapeso (m)	Tempo de Simulação (segundos)
1	120	133
	240	472
	360	1071
	540	2439
2	120	128
	240	493
	360	1089
	540	2433
3	120	128
	240	503
	360	1086
	540	2440

5.2.5 Cabos Para-raios *Underbuilt*

Os cabos para-raios *Underbuilt* representam um método não convencional para amenizar os efeitos das descargas atmosféricas nas linhas de transmissão. Estes cabos para-raios são instalados na mesma altura ou em altura inferior aos cabos condutores nas estruturas, conforme Figura 5.2-6. Em função de sua posição na torre e entre as fases, os cabos para-raios *Underbuilt* não oferecem a função de proteger os cabos condutores das descargas atmosféricas e sim atuam aumentando os coeficientes de acoplamento entre fases e os para-raios, como também como um caminho alternativo para a corrente da descarga atmosférica [97] [98].

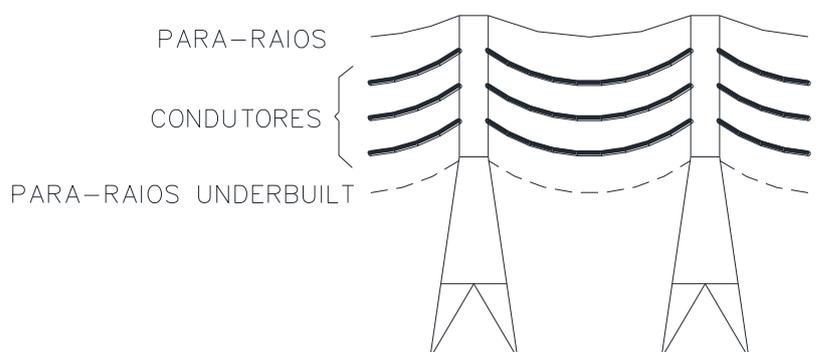


Figura 5.2-6 – Cabos Para-raios *Underbuilt*

Ao longo dos anos foram realizados diversos trabalhos na literatura técnica apresentando as vantagens obtidas com a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt*. Em 1996, Harrington e Mueen [99] realizaram simulações no ambiente EMTP de um

trecho de uma linha de transmissão próximo a uma subestação. Foram simuladas as sobretensões obtidas na ocorrência de uma descarga atmosféricas em uma das torres e foram comparados os valores obtidos com e sem a instalação de cabos para-raios *Underbuilt*. Os resultados obtidos apresentaram que a probabilidade de ocorrência de correntes de retorno acima da corrente crítica que provocaria *Backflashover* diminuiu de 50%, sem os cabos para-raios *Underbuilt* instalados, para 10%, com a instalação dos mesmos.

Em 2011, Visacro *et al.* [100] elaboraram para uma linha de transmissão existente em 230 kV uma análise comparativa entre as reduções de sobretensões nas cadeias de isoladores obtidas considerando a prática usual de reduzir a resistência de aterramento das estruturas e considerando a instalação de cabos para-raios *Underbuilt*. Os resultados obtidos concluem que é mais eficaz instalar cabos para-raios *Underbuilt* para as regiões que apresentam solo com maiores valores de resistividade.

Em 2017, Ninh *et al.* [101] realizaram um estudo para avaliar os métodos disponíveis para melhorar o desempenho de linhas de transmissão construídas em regiões montanhosas. Nestas regiões combinam-se dois fatores que penalizam o desempenho, sendo eles os elevados valores de resistividade do solo e de densidade de descargas atmosféricas para o solo. É apresentada a importância do fator de acoplamento entre os condutores e os cabos para-raios *Underbuilt* na redução da sobretensão obtidas nas cadeias de isoladores.

Mais recentemente, em 2018, Araneo *et al.* [102] realizaram uma simulação de um sistema de transmissão em 380 kV com 3 fases e 2 para-raios. Foram analisadas as sobretensões obtidas nas fases e nos para-raios com e sem a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt* na ocorrência de descargas atmosféricas em uma torre. Os resultados obtidos apresentaram redução significativa das sobretensões em todas as fases e para-raios quando há cabos para-raios *Underbuilt*. No mesmo ano, Koehler e Swingler [103] ressaltaram a importância de alternativas como a instalação de cabos para-raios *Underbuilt* para trechos de linhas de transmissão com desempenho ineficiente contra descargas atmosféricas e que estejam localizadas em regiões com solos de alta resistividade em que a instalação de cabos contrapeso adicionais não é recomendada em virtude da presença de solo com formação rochosa. Esta avaliação é particularmente de maior interesse para projetos de linhas de transmissão realizados dentro do território do Brasil, onde há regiões que apresentam terrenos rochosos (ou seja, solo com alta resistividade) e alta densidade de descargas atmosféricas para o solo.

Portanto, neste capítulo também serão simulados cenários considerando a instalação de cabos para-raios *Underbuilt* na configuração da estrutura utilizada na seção 5.2.1. A configuração adotando a instalação de cabos para-raios *Underbuilt* é apresentada na Figura 5.2-7. Os dados dos condutores e para-raios foram apresentados na Tabela 5.2-1.

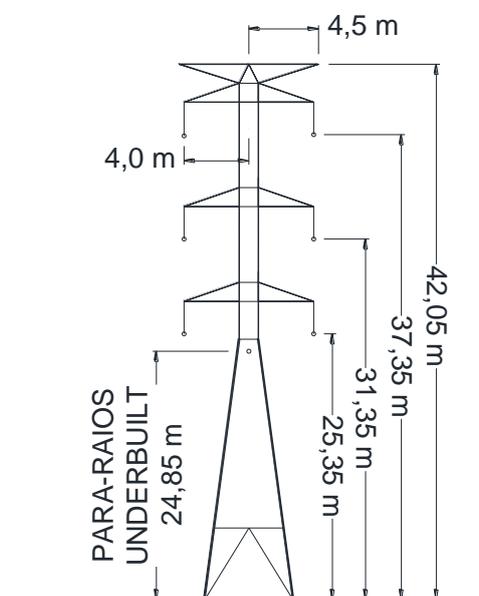


Figura 5.2-7 – Configuração da Estrutura Utilizada com Para-raios *Underbuilt*

5.3 Simulação da Influência da Modelagem dos Parâmetros do Solo

Nesta seção serão simuladas e apresentadas as sobretensões obtidas na ocorrência de uma descarga atmosférica considerando as diferentes possibilidades acerca da modelagem dos parâmetros do solo.

O modelo mais simples consiste do solo sendo modelado como resistência constante. Esta consideração ainda é bastante utilizada pela facilidade de medição da resistência de aterramento e pelo fato de que para fenômenos de baixa frequência, como curtos-circuitos em sistemas elétricos de potência, esta hipótese não apresenta erros significativos [53]. Os valores da resistência de aterramento utilizados nas simulações apresentadas nesta seção foram obtidos através da metodologia apresentada em [104] [105].

Todavia, conforme já mencionado, o aterramento das estruturas na realidade deve ser representado como uma impedância, pois os cabos contrapesos, assim como qualquer elemento conectado a terra, apresentam efeitos resistivos, capacitivos e indutivos [53]. A impedância de aterramento pode ainda considerar os parâmetros do solo dependentes da frequência. Conforme mencionado, a permeabilidade magnética μ do solo possui valor próximo ao da permeabilidade magnética do ar, porém os

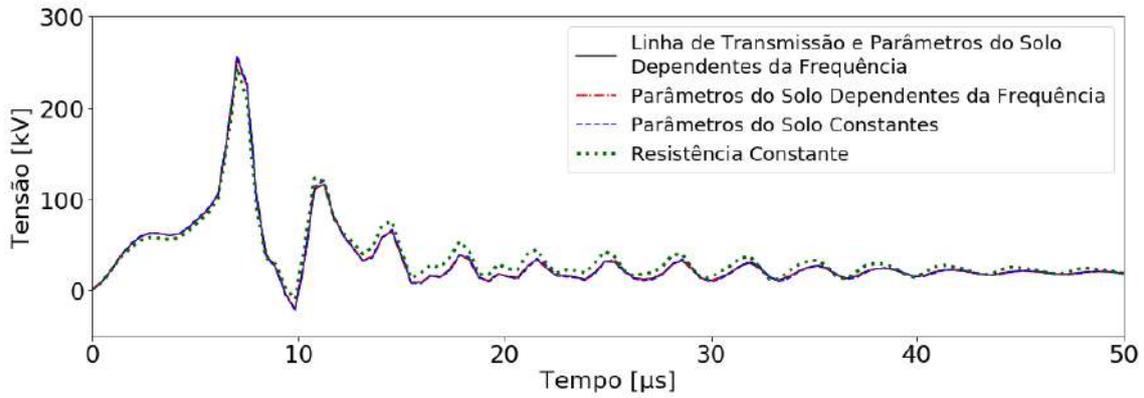
valores da condutividade elétrica σ e permissividade elétrica ϵ são dependentes da frequência. A dependência dos parâmetros do solo com a frequência é frequentemente descartada, em função da dificuldade de se obter uma formulação geral que modele esta dependência. Todavia, para fenômenos de alta frequência, como é o caso de descargas atmosféricas, esta consideração provoca erros consideráveis nos resultados obtidos [75].

É possível ainda que a modelagem da linha de transmissão considere também os parâmetros do solo dependentes da frequência [26]. Para isto, basta que os parâmetros do solo na equação (3.3–21) sejam dependentes da frequência. Esta consideração representa o modelo físico mais preciso atualmente.

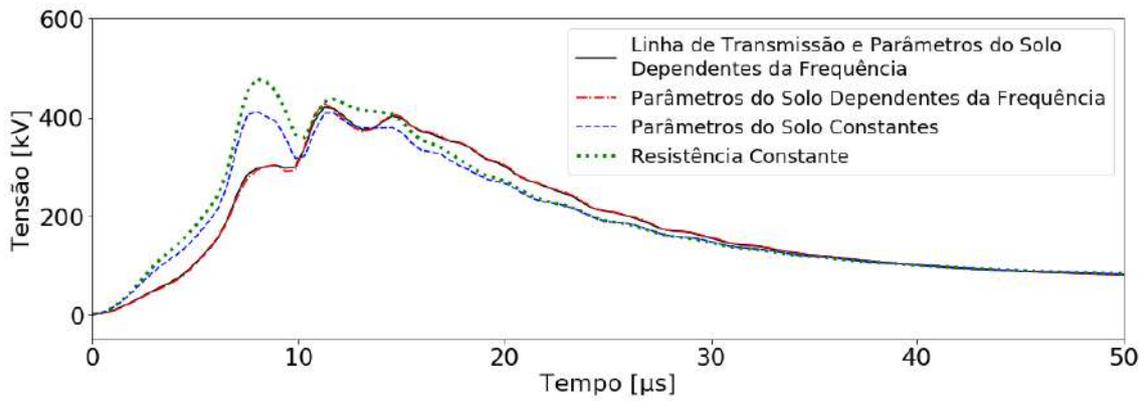
Portanto, de maneira a ser possível analisar a influência da modelagem dos parâmetros do solo, serão simuladas as sobretensões obtidas para a estrutura da Figura 5.2-1 utilizando a topologia 1 (Figura 5.2-3) com comprimento total de cabos contrapeso igual a 120 metros para os seguintes cenários:

- i. Solo modelado como resistência de aterramento constante;
- ii. Solo modelado como impedância de aterramento com os parâmetros do solo constantes;
- iii. Solo modelado como impedância de aterramento com os parâmetros do solo dependentes da frequência;
- iv. Linha de Transmissão e solo modelado como impedância de aterramento com os parâmetros do solo dependentes da frequência.

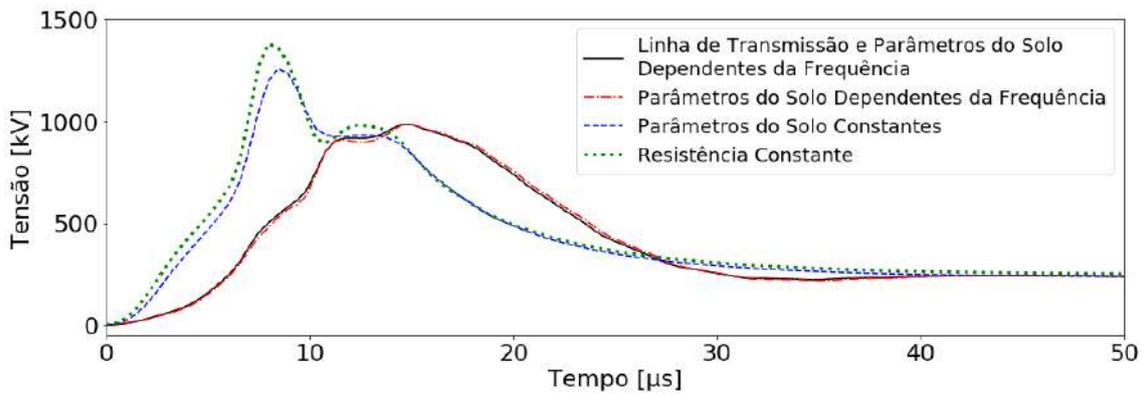
De maneira a ser possível observar como os resultados são influenciados para solos de diferentes regiões, as hipóteses acima serão simuladas para solos com resistividades de 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ohm.m. A Figura 5.3-1 apresenta os resultados obtidos.



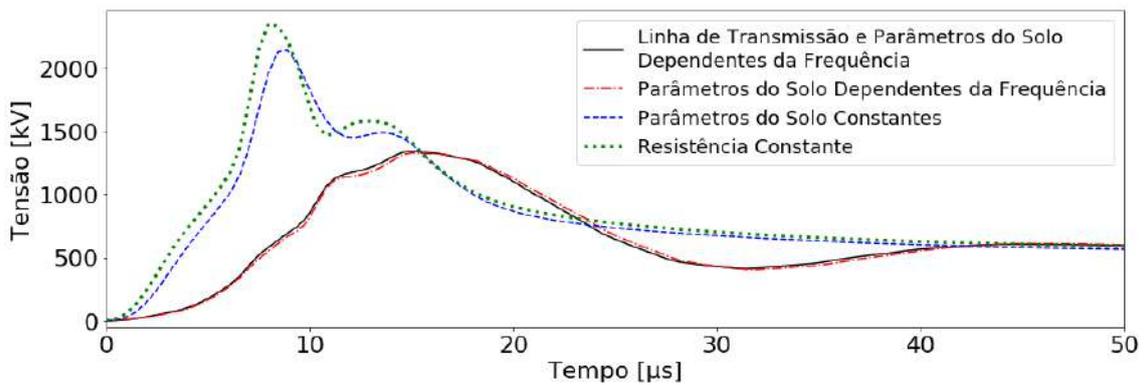
(a) - Resistividade do Solo = 100 ohm.m



(b) - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m



(c) - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m



(d) - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

Figura 5.3-1 – Comparação das Modelagens do Solo e seus Parâmetros

As tabelas a seguir resumem os resultados obtidos nas simulações:

Tabela 5.3-1 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 100 ohm.m

Modelagem do Solo	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/ 100 km/ano	Variação (%)
Resistência Constante	243,86	--	0,019	--
Parâmetros do Solo Constantes	256,66	5,25%	0,021	10,53%
Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	253,63	4,00%	0,020	5,26%
Linha de Transmissão e Impedância de Aterramento com Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	254,07	4,19%	0,020	5,26%

Tabela 5.3-2 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m

Modelagem do Solo	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/ 100 km/ano	Variação (%)
Resistência Constante	477,52	--	2,595	--
Parâmetros do Solo Constantes	469,93	-1,59%	1,848	-28,79%
Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	428,34	-10,30%	1,816	-30,02%
Linha de Transmissão e Impedância de Aterramento com Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	420,57	-11,93%	1,792	-30,94%

Tabela 5.3-3 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m

Modelagem do Solo	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/ 100 km/ano	Variação (%)
Resistência Constante	1379,45	--	54,969	--
Parâmetros do Solo Constantes	1256,74	-8,90%	49,012	-10,84%
Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	985,07	-28,59%	38,503	-29,96%
Linha de Transmissão e Impedância de Aterramento com Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	984,98	-28,60%	38,580	-29,81%

Tabela 5.3-4 – Comparação dos Modelos - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

Modelagem do Solo	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/ 100 km/ano	Variação (%)
Resistência Constante	2348,18	--	119,440	--
Parâmetros do Solo Constantes	2139,74	-8,88%	115,536	-3,27%
Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	1325,97	-43,53%	78,864	-33,97%
Linha de Transmissão e Impedância de Aterramento com Parâmetros do Solo Dependentes da Frequência	1340,54	-42,91%	79,589	-33,36%

A partir dos resultados das simulações apresentadas nas figuras e tabelas acima, é possível observar que não há erros consideráveis ao adotar modelos mais simples para o aterramento em regiões com solos com resistividades baixas. Todavia, ao se considerar solos com resistividades maiores a influência da modelagem adotada no solo torna-se significativa, levando a desvios consideráveis nos resultados obtidos. Estes resultados estão concordando com outros trabalhos existentes na literatura técnica acerca da modelagem do solo [80] [81].

Os modelos mais simples apresentam resultados superestimados para solos com resistividades mais elevadas, que podem levar ao dimensionamento equivocado do projeto das linhas de transmissão. Portanto, em virtude da unanimidade quanto à dependência dos parâmetros do solo com relação à frequência [26] [42] [75] [77] - [81], nas simulações realizadas nas seções seguintes será sempre adotada a modelagem mais precisa, ou seja, contemplando a linha de transmissão e a impedância de aterramento com os parâmetros do solo variando com a frequência.

5.4 Simulação das Sobretensões nas Cadeias de Isoladores da Estrutura

Nesta seção serão apresentadas as sobretensões que são obtidas nas cadeias de Isoladores na ocasião da incidência da primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica (apresentada na Figura 3.2-1) no topo da estrutura utilizada (apresentada na Figura 5.2-1) utilizando a topologia 1 (Figura 5.2-3) com comprimento total de cabos contrapeso igual a 120 metros no sistema de aterramento. Serão considerados solos com resistividades de 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ohm.m. A Figura 5.4-1 e a Tabela 5.4-1 apresentam os resultados obtidos.

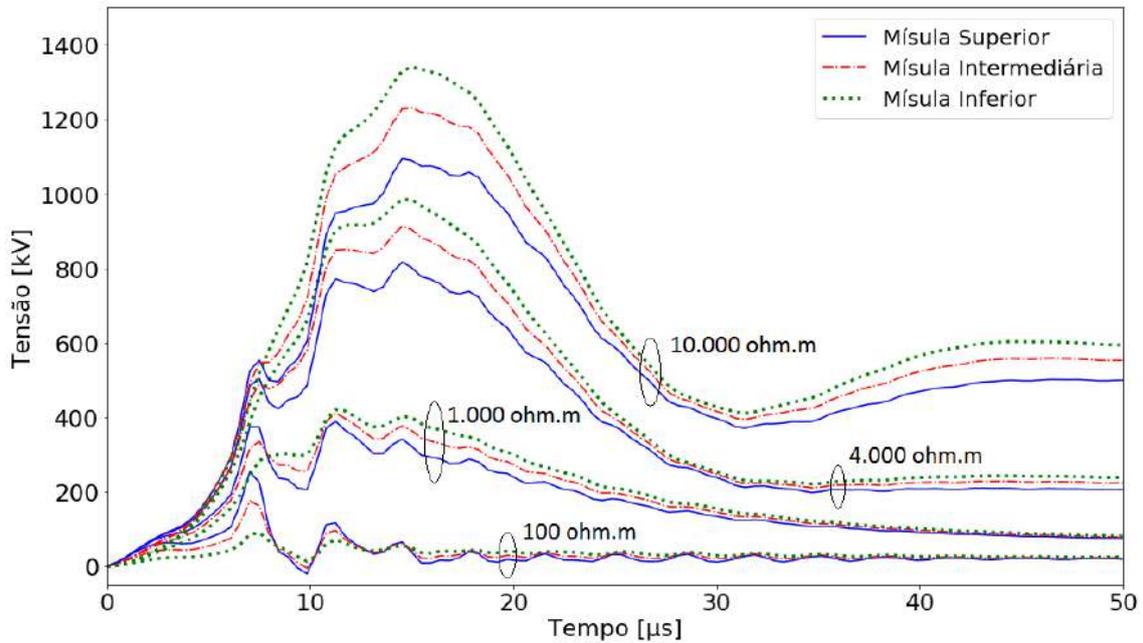


Figura 5.4-1 – Comparação das Sobretensões nas Cadeias de Isoladores

Tabela 5.4-1 – Comparação das Sobretensões nas Cadeias de Isoladores para Solos com Resistividades Distintas

Resistividade do Solo (ohm.m)	Cadeia de Isoladores	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/100km/ano	Varição (%)
100	Superior	254,07	--	0,020	--
	Intermediária	175,35	-30,98%	0,007	-65,00%
	Inferior	89,83	-64,64%	0,001	-95,00%
1.000	Superior	389,20	--	1,045	--
	Intermediária	411,20	5,65%	1,409	34,83%
	Inferior	420,57	8,06%	1,817	73,88%
4.000	Superior	816,77	--	21,495	--
	Intermediária	912,89	11,77%	30,906	43,78%
	Inferior	984,98	20,59%	39,110	81,95%
10.000	Superior	1094,78	--	53,270	--
	Intermediária	1230,72	12,42%	69,156	29,82%
	Inferior	1340,54	22,45%	80,684	51,46%

A partir dos resultados obtidos é possível observar que, dependendo da resistividade do solo, as sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores da estrutura se comportam de maneiras distintas. Em solos de baixa resistividade, a cadeia de isoladores da mísula superior apresenta o maior pico de sobretensão e é significativamente mais severa que a sobretensão obtida na cadeia de isoladores da

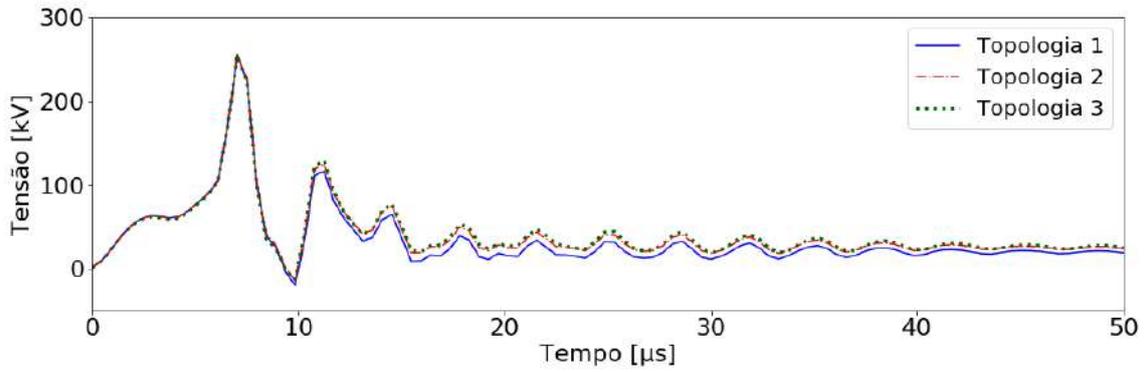
mísula inferior. Na simulação realizada com solo com resistividade igual a 100 ohm.m, a cadeia de isoladores da mísula inferior apresentou o valor do pico da sobretensão 95,00% menor com relação ao valor encontrado na mísula superior. Todavia, para solos com resistividades de 1.000 ohm.m ocorre a inversão deste fenômeno, onde a cadeia de isoladores da mísula inferior passa a apresentar a sobretensão levemente superior à da cadeia presente na mísula superior. Conforme o valor da resistividade do solo aumenta, esta diferença também aumenta e a sobretensão presente na cadeia da mísula inferior passa a ser significativamente superior à da mísula superior. Para o solo com 10.000 ohm.m a diferença a sobretensão obtida na cadeia de isoladores da mísula inferior é 51,46% superior ao valor obtido para a cadeia presente na mísula superior.

Portanto, em estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é necessário calcular as sobretensões obtidas em todas as cadeias de isoladores. A possível ruptura do isolamento para cada uma das cadeias de isoladores é então avaliada conforme o método de integração DE apresentado na seção 4.4.

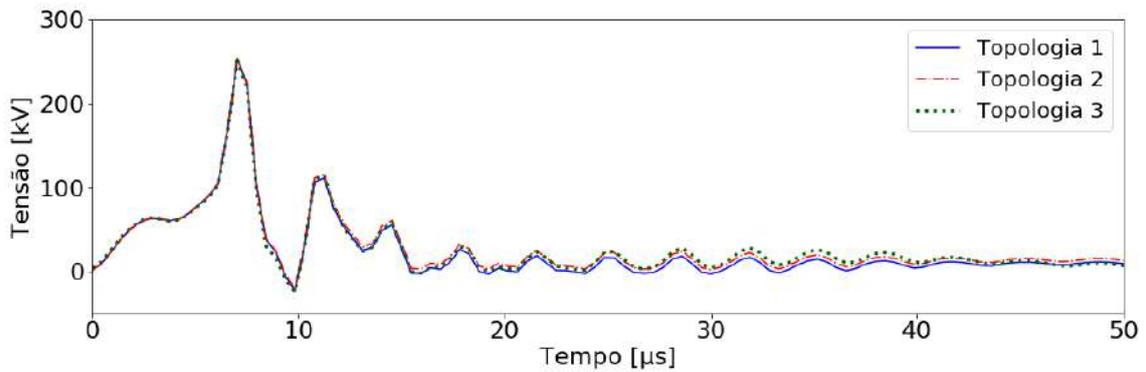
Os resultados apresentados nas seções seguintes consideram sempre a cadeia de isoladores que apresentar a curva de sobretensão mais severa para o cálculo da taxa de desligamentos estimada.

5.5 Simulação da Influência da Topologia do Sistema de Aterramento

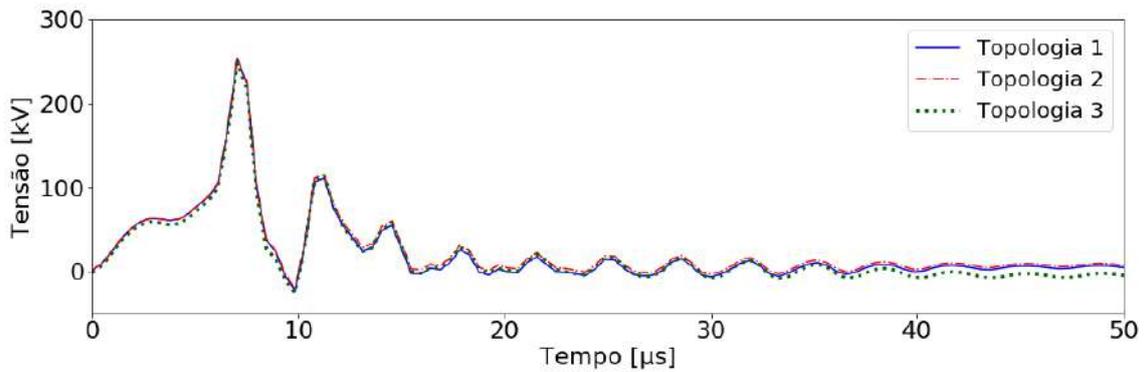
Nesta seção será simulado o desempenho da linha de transmissão da configuração utilizada, apresentada na seção 5.2.1, na ocasião da incidência da primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica (apresentada na Figura 3.2-1) no topo da estrutura, considerando as diferentes topologias de aterramento. Os resultados das sobretensões e das taxas de desligamentos estimadas permitem avaliar a eficiência de cada uma das topologias consideradas. De maneira a ser possível avaliar o comportamento do sistema para solos de diferentes regiões, serão considerados solos com resistividades distintas de 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ohm.m e os resultados são apresentados nas Figuras 5.5-1, 5.5-2, 5.5-3 e 5.5-4, respectivamente.



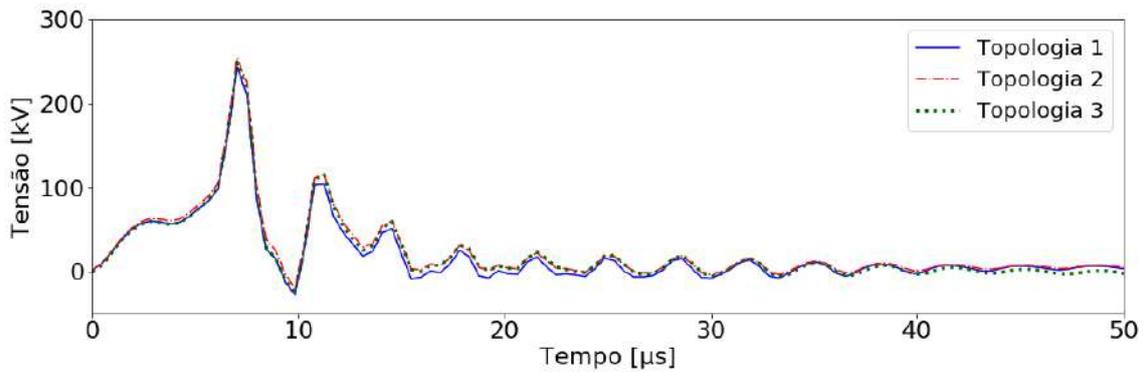
(a) - Comprimento Total = 120 m



(b) - Comprimento Total = 240 m

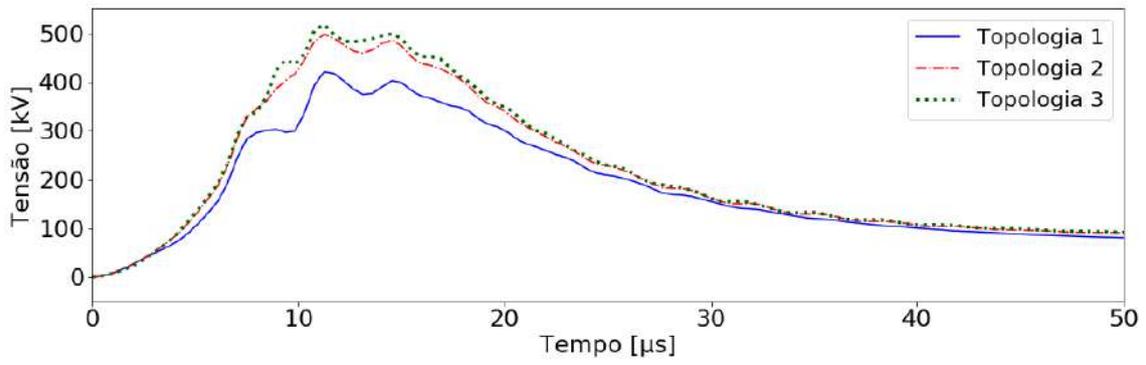


(c) - Comprimento Total = 360 m

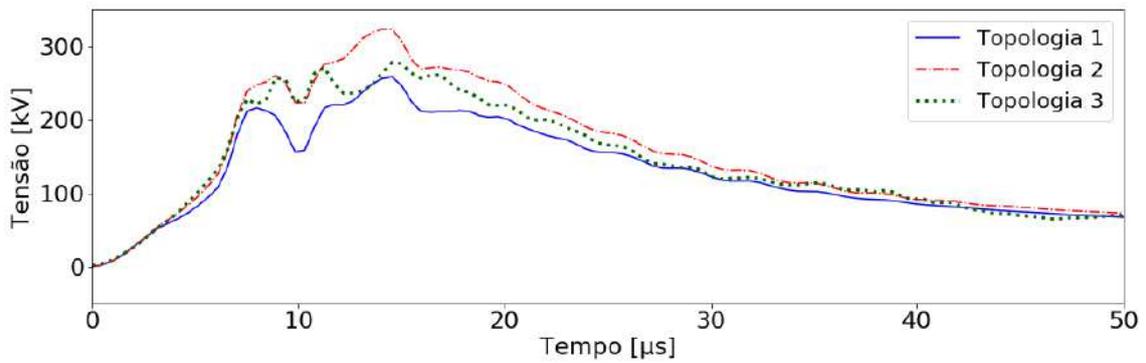


(d) - Comprimento Total = 540 m

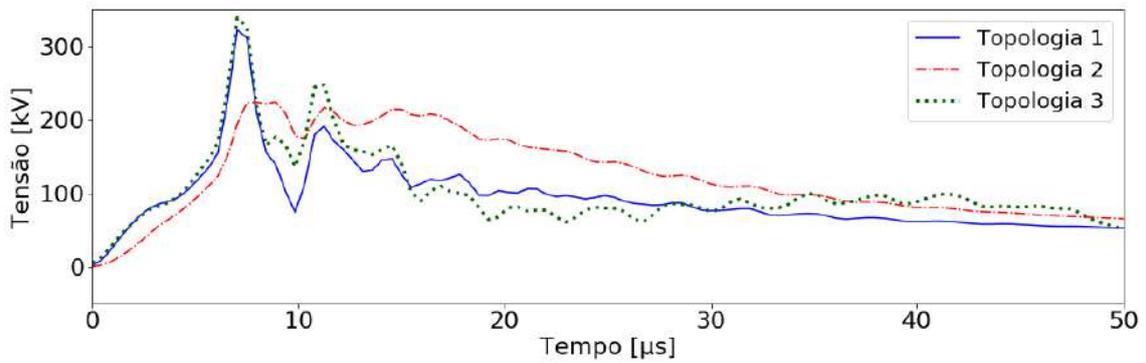
Figura 5.5-1 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 100 ohm.m



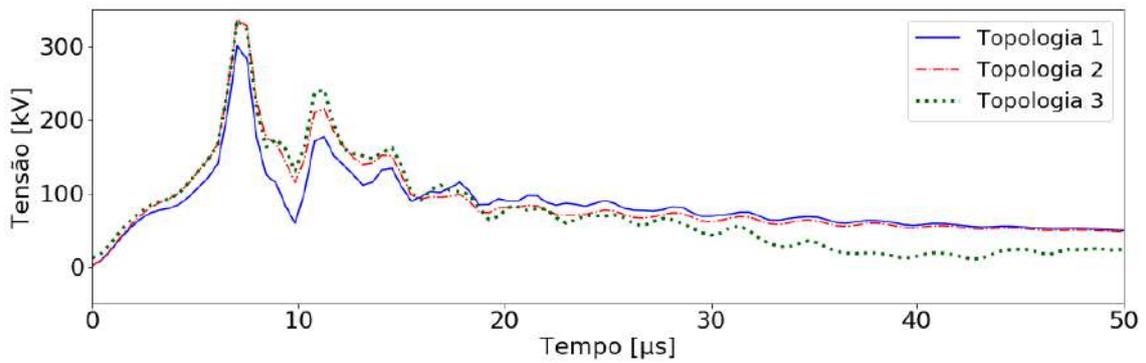
(a) - Comprimento Total = 120 m



(b) - Comprimento Total = 240 m

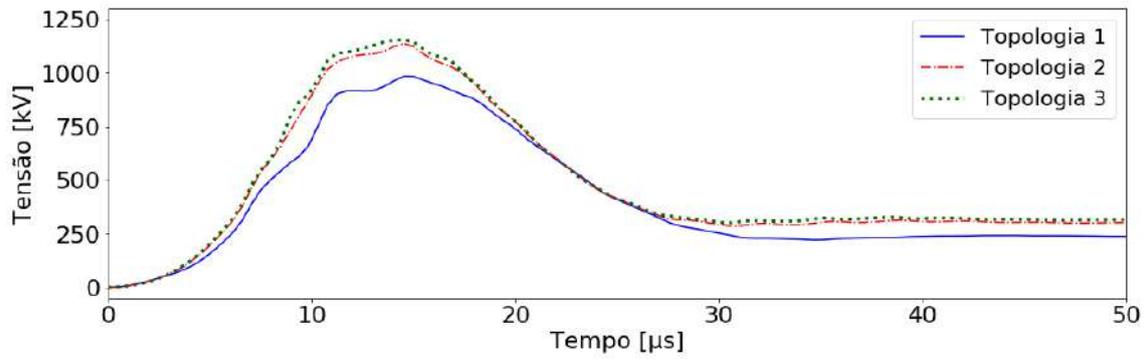


(c) - Comprimento Total = 360 m

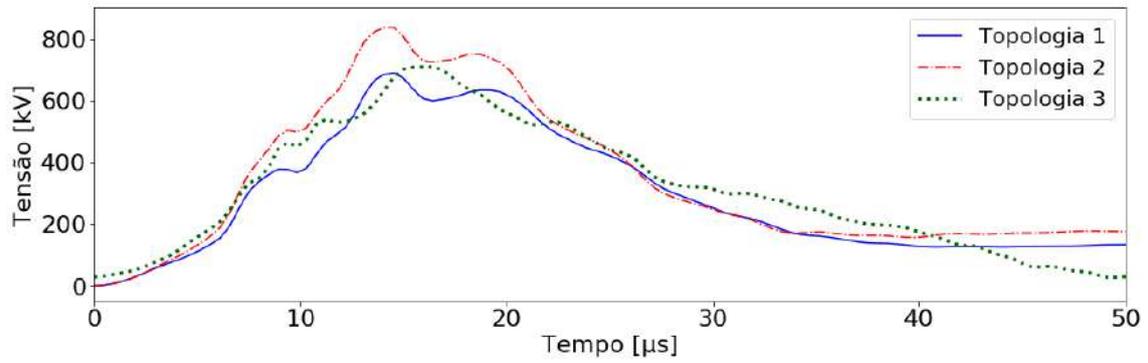


(d) - Comprimento Total = 540 m

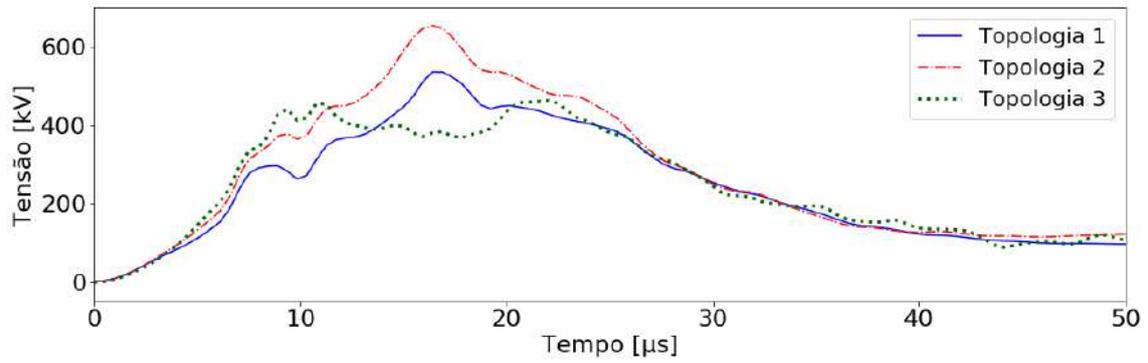
Figura 5.5-2 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m



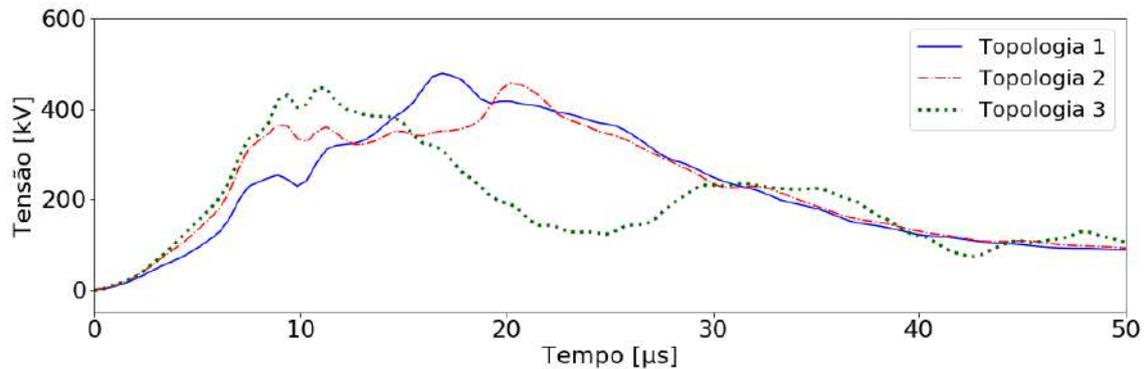
(a) - Comprimento Total = 120 m



(b) - Comprimento Total = 240 m

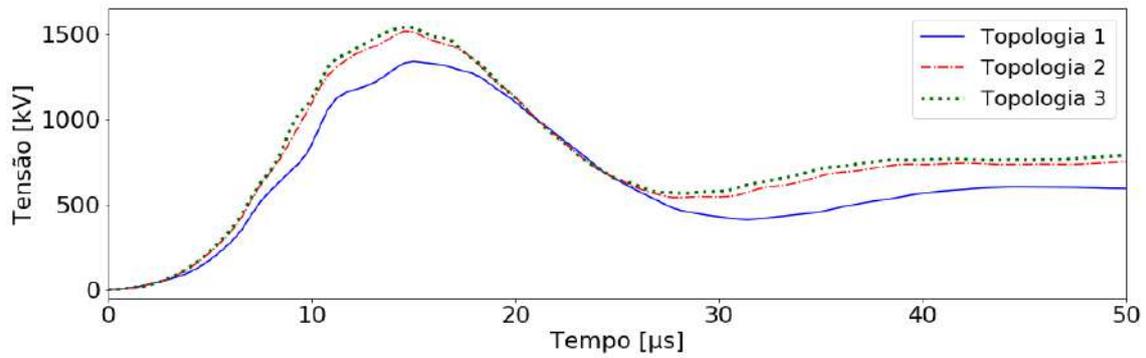


(c) - Comprimento Total = 360 m

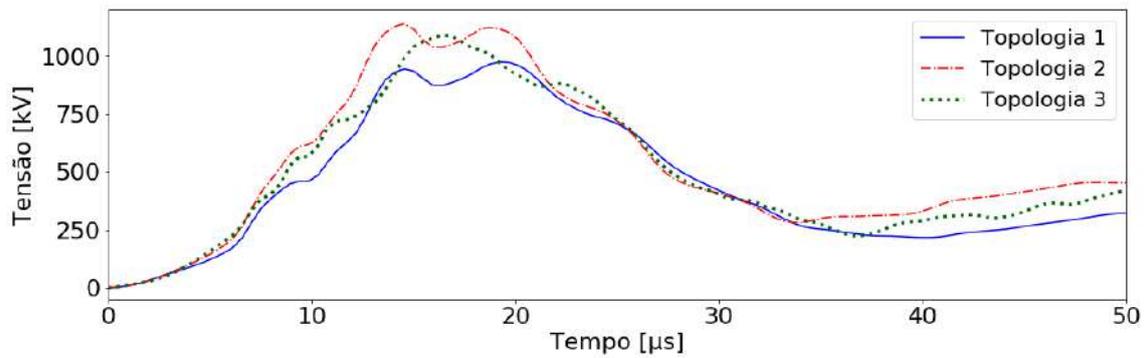


(d) - Comprimento Total = 540 m

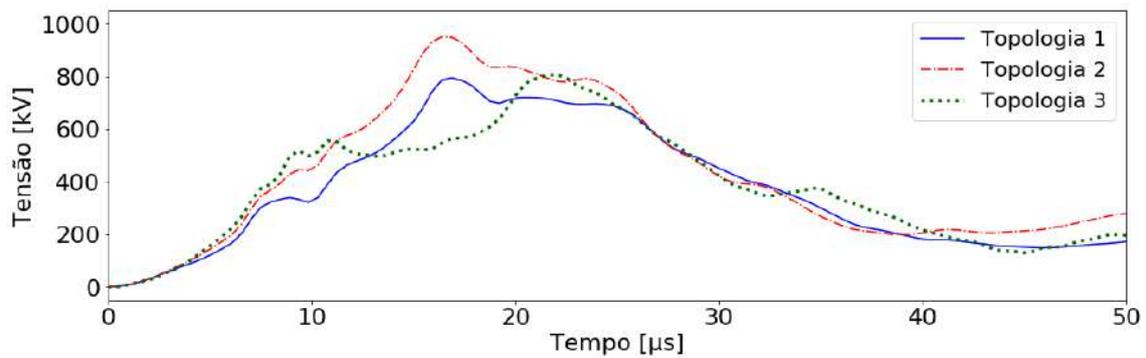
Figura 5.5-3 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m



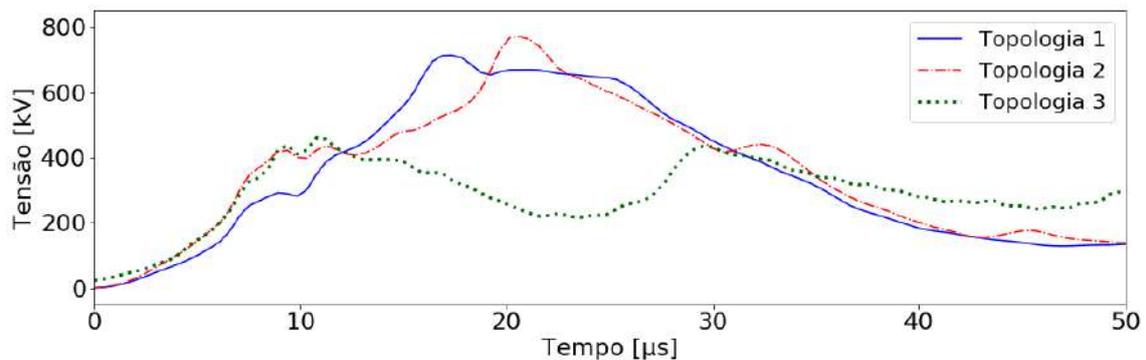
(a) - Comprimento Total = 120 m



(b) - Comprimento Total = 240 m



(c) - Comprimento Total = 360 m



(d) - Comprimento Total = 540 m

Figura 5.5-4 - Sobretensões obtidas com as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

As tabelas a seguir resumem os resultados obtidos nas simulações. Os valores percentuais apresentados representam a diferença das topologias 2 e 3 em relação a topologia 1.

Tabela 5.5-1 – Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 100 ohm.m

Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Topologia do Aterramento	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/100km/ano	Varição (%)
120	1	254,07	--	0,020	--
	2	255,75	0,66%	0,022	10,00%
	3	253,90	-0,07%	0,021	5,00%
240	1	253,17	--	0,019	--
	2	253,93	0,30%	0,020	5,26%
	3	250,81	-0,93%	0,018	-5,26%
360	1	253,17	--	0,019	--
	2	253,92	0,30%	0,020	5,26%
	3	247,94	-2,07%	0,017	-10,53%
540	1	243,13	--	0,015	--
	2	253,91	4,43%	0,020	33,33%
	3	248,34	2,14%	0,017	13,33%

Tabela 5.5-2 – Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m

Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Topologia do Aterramento	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/100km/ano	Varição (%)
120	1	420,57	--	1,792	--
	2	497,07	18,19%	3,616	101,79%
	3	517,41	23,03%	4,133	130,64%
240	1	258,45	--	0,273	--
	2	323,50	25,17%	0,654	139,56%
	3	278,09	7,60%	0,442	61,90%
360	1	322,52	--	0,124	--
	2	224,37	-30,43%	0,206	66,13%
	3	339,11	5,14%	0,201	62,10%
540	1	300,93	--	0,084	--
	2	337,17	12,04%	0,174	107,14%
	3	335,58	11,51%	0,186	121,43%

Tabela 5.5-3 Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m

Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Topologia do Aterramento	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/100km/ano	Variação (%)
120	1	984,98	--	38,580	--
	2	1137,62	15,50%	54,692	41,76%
	3	1155,58	17,32%	58,038	50,44%
240	1	688,78	--	11,457	--
	2	835,47	21,30%	21,155	84,65%
	3	708,83	2,91%	12,038	5,07%
360	1	535,75	--	4,099	--
	2	654,69	22,20%	8,081	97,15%
	3	463,36	-13,51%	3,482	-15,05%
540	1	478,21	--	2,914	--
	2	457,46	-4,34%	2,320	-20,38%
	3	446,39	-6,65%	2,025	-30,51%

Tabela 5.5-4 Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Topologia do Aterramento	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/100km/ano	Variação (%)
120	1	1340,54	--	79,589	--
	2	1518,77	13,30%	94,411	18,62%
	3	1540,25	14,90%	96,869	21,71%
240	1	974,02	--	39,586	--
	2	1139,53	16,99%	57,963	46,42%
	3	1089,92	11,90%	47,794	20,73%
360	1	794,73	--	20,306	--
	2	951,31	19,70%	32,759	61,33%
	3	807,50	1,61%	17,623	-13,21%
540	1	713,53	--	15,644	--
	2	770,60	8,00%	13,830	-11,60%
	3	519,84	-27,14%	2,614	-83,29%

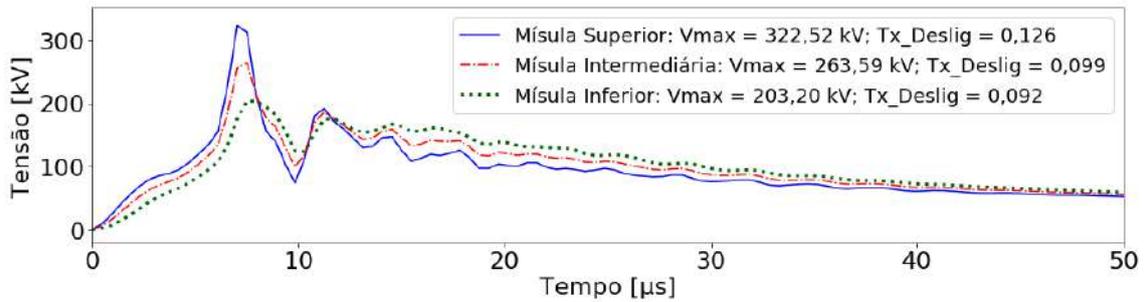
Para os casos simulados com solos com resistividade de 100 ohm.m, as curvas de sobretensões obtidas são bastante similares. Não foram obtidas diferenças significativas no valor do pico da sobretensão para os casos simulados considerando as diferentes topologias de aterramento apresentadas na seção 5.2.3 com diferentes comprimentos totais de cabos contrapeso considerados. Com relação ao número de

desligamentos estimados, foram obtidos valores relativamente próximos, sendo a maior diferença percentual encontrada de 33,33% entre as topologias 1 e 2 considerando o comprimento total de cabos contrapeso igual a 540 metros.

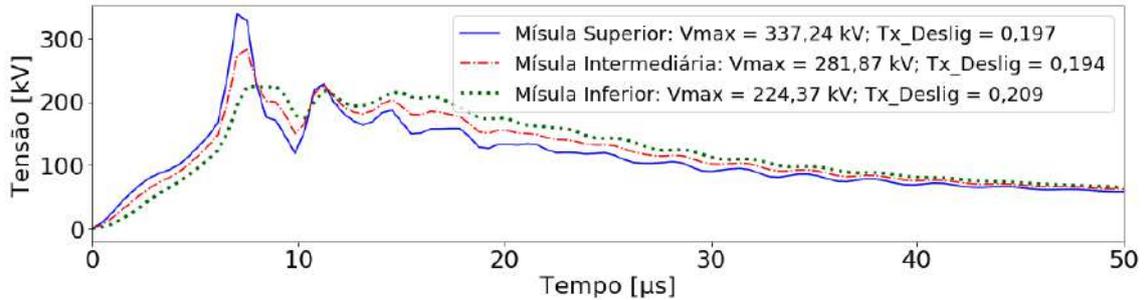
Para os casos simulados com solo com resistividade de 1.000 ohm.m é possível observar perda considerável no desempenho da linha de transmissão nas topologias 2 e 3 quando comparados com os valores obtidos com a topologia 1, demonstrado pelo aumento percentual significativo no número de desligamento estimados. O pior caso foi obtido com a topologia 2, com número de desligamentos estimados 139,56% maior do que o valor encontrado com a topologia 1 com comprimento total de cabos contrapeso igual a 240 metros.

Destaque maior deve ser concedido a forma de onda da sobretensão da topologia 2, para a configuração considerando 360 metros de comprimento total de cabos contrapesos instalados em solo com resistividade de 1.000 ohm.m. Para este cenário, é possível observar que a forma de onda da sobretensão obtida na topologia 2 apresentou comportamento distinto das demais formas de onda das sobretensões obtidas nas topologias 1 e 3, conforme item c da Figura 5.5-2. Este fenômeno ocorreu em função da forma de onda da sobretensão que resultou em um maior número de desligamentos estimado ter sido obtida na cadeia de isoladores da mísula inferior da estrutura para a topologia 2, enquanto nas topologias 1 e 3, o mesmo ocorreu na mísula superior, conforme apresentado pelos valores de pico das sobretensões (V_{max}), e respectivas taxas de desligamentos estimados (Tx_{Deslig}), na Figura 5.5-5.

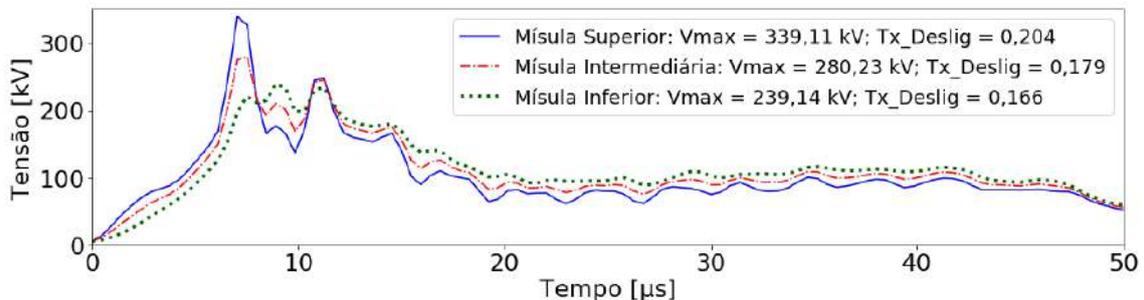
Para os casos simulados considerando os solos com resistividade de 4.000 ohm.m, as curvas de sobretensões mais severas obtidas nas cadeias de isoladores apresentaram comportamentos bastante distintos, em especial as simulações considerando comprimento total dos cabos contrapesos igual a 360 metros e 540 metros. Em função disso, nestas simulações a topologia 3 apresentou desempenho melhor do que as topologias 1 e 2, obtendo número de desligamentos estimado 15,05% menor do que a topologia 1 para o cenário com comprimento total de cabos contrapeso igual a 360 metros, e 30,51% menor que a topologia 1 para o cenário com comprimento total de cabos contrapeso igual a 540 metros. Situação semelhante ocorreu para os casos simulados considerando a resistividade do solo com 10.000 ohm.m, tendo a topologia 3 obtido desempenho superior as topologias 1 e 2 para os casos considerando o comprimento total de cabos contrapesos de 360 e 540 metros.



(a) - Topologia 1



(b) - Topologia 2



(c) - Topologia 3

Figura 5.5-5 - Sobretensões obtidas nas cadeias de Isoladores para as Topologias de Aterramento – Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m

Portanto, é possível concluir que as curvas de sobretensões nas cadeias de isoladores apresentam comportamentos distintos que, por consequência, culminam em diferenças significativas no desempenho da linha de transmissão, dependendo da resistividade do solo e da topologia do sistema de aterramento. Sendo assim, é necessária a avaliação de cada caso e suas características para ser possível simular com precisão satisfatória o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

5.6 Simulação da Influência do Comprimento dos Cabos Contrapesos

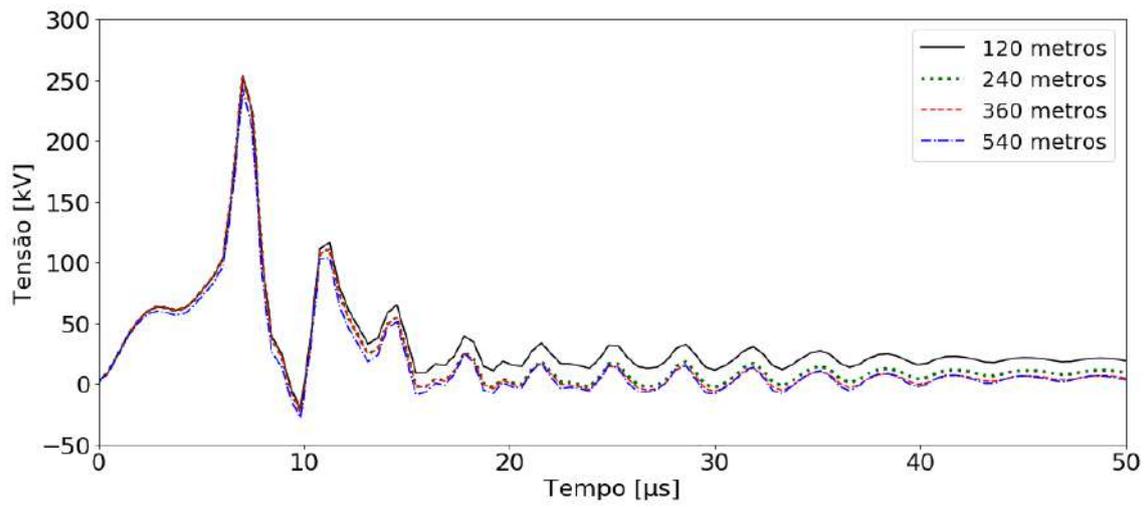
Nesta seção será simulado o desempenho da linha de transmissão da configuração utilizada (seção 5.2.1) na ocasião da incidência de uma corrente de retorno de uma descarga atmosférica (apresentada na Figura 3.2-1) no topo da

estrutura, considerando o aumento nos cabos contrapesos para cada uma das topologias do sistema de aterramento consideradas (seção 5.2.3), de maneira a ser possível observar a influência do comprimento dos cabos contrapesos e seu comprimento efetivo nos resultados.

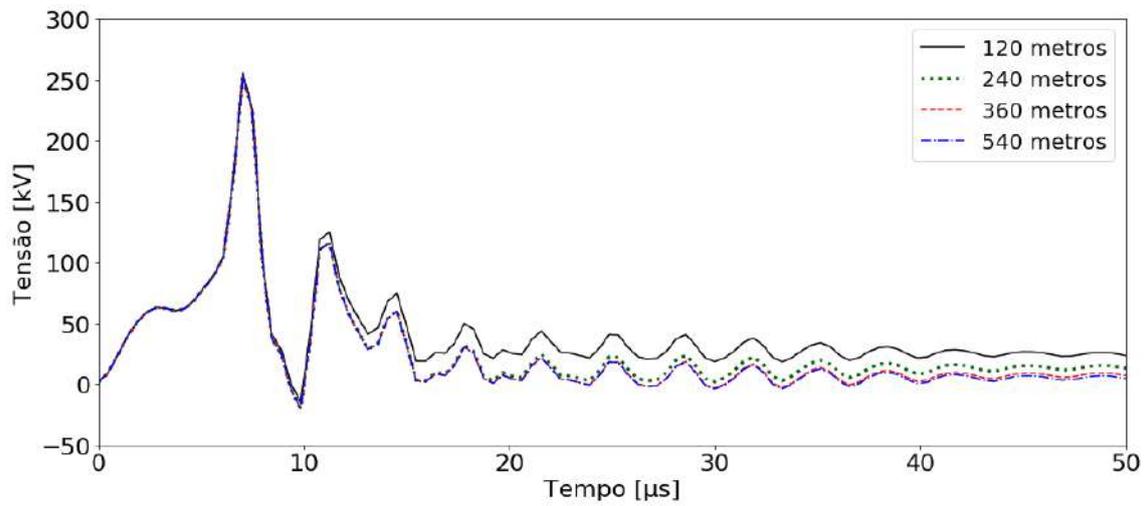
Conforme já mencionado, o comprimento efetivo é aquele a partir do qual o aumento do comprimento do cabo contrapeso irá reduzir a resistência de aterramento, porém não irá reduzir a impedância de aterramento e, por consequência, não irá apresentar melhorias no desempenho da linha de transmissão, sendo apenas desperdiçado o comprimento de cabo contrapeso excedente instalado [66]. O comprimento efetivo e a ineficiência em se aumentar o comprimento dos cabos contrapesos no sistema de aterramento indefinidamente já é relatada há algumas décadas. Em 1980, os autores Gupta e Thapar em [106] utilizam o conceito de impedância impulsiva, definida pela razão entre o pico da tensão desenvolvida no ponto de alimentação e o valor de pico da corrente injetada, para relatar este fenômeno. Os autores concluem que conforme a área da malha de aterramento aumenta, a impedância impulsiva diminui. Todavia, este fenômeno não ocorre indefinidamente, pois a partir de certo valor, o aumento da área da malha de aterramento não irá provocar diferenças significativas no valor da impedância impulsiva.

O fenômeno do comprimento efetivo é justificado pelo fato que as ondas de tensão e corrente que se propagam ao longo dos cabos contrapesos tem suas magnitudes atenuadas e distorcidas ao longo da direção de propagação. Em função disso, a corrente que é dispersa para o solo não é homogênea, tendo seu valor reduzido ao longo dos cabos contrapesos [53].

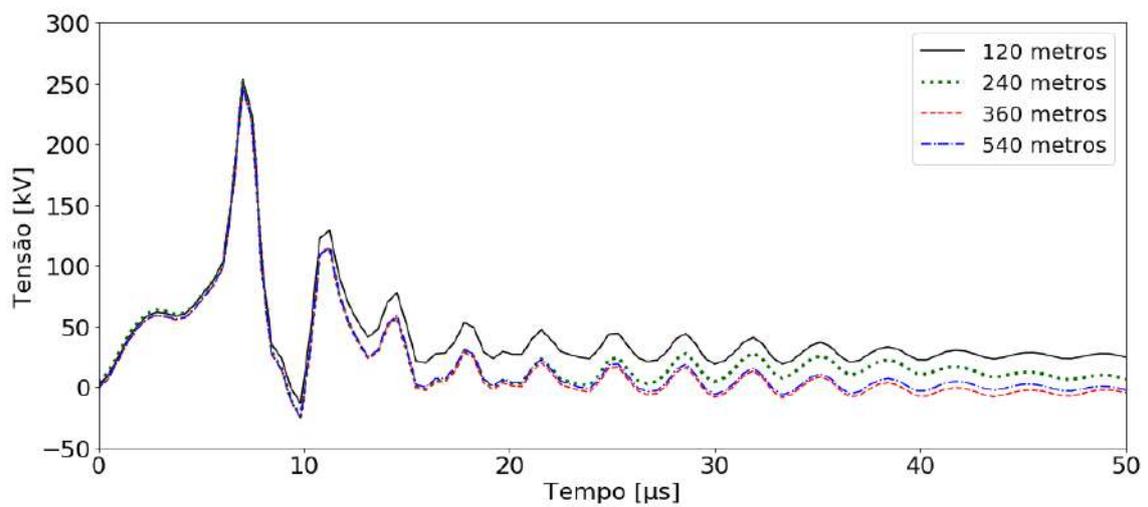
De maneira a ser possível observar a influência do comprimento efetivo dos sistemas de aterramento nos resultados do desempenho de uma linha de transmissão, foram realizadas simulações para os comprimentos totais de cabos contrapesos de 120, 240, 360 e 540 metros para cada uma das topologias do sistema de aterramento consideradas, conforme apresentado na seção 5.2.3. Para ser possível avaliar o comportamento do sistema para solos de diferentes regiões, foram considerados solos com resistividades distintas de 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ohm.m e seus resultados são apresentados nas Figuras 5.6-1, 5.6-2, 5.6-3 e 5.6-4, respectivamente.



(a) - Topologia 1

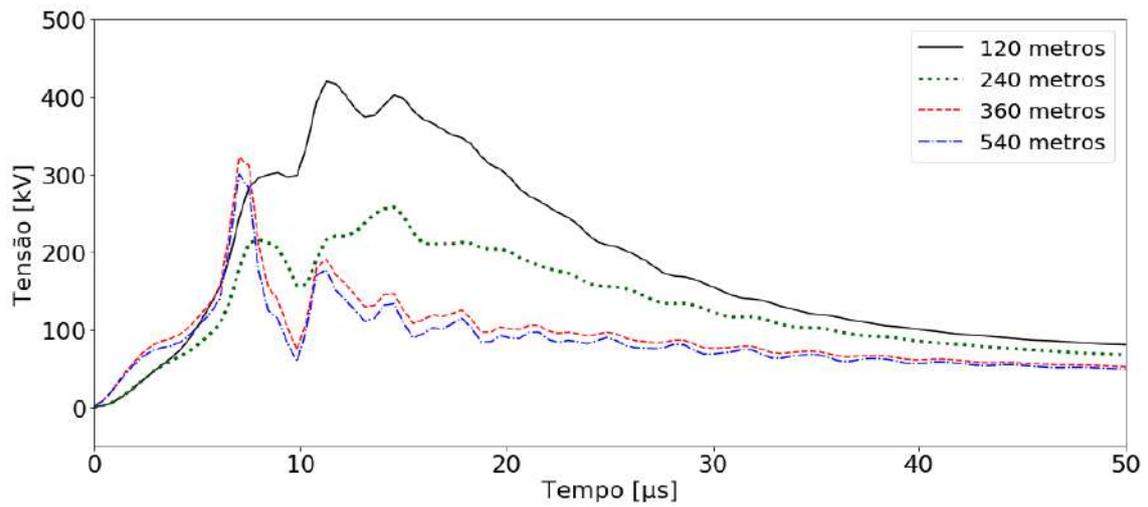


(b) - Topologia 2

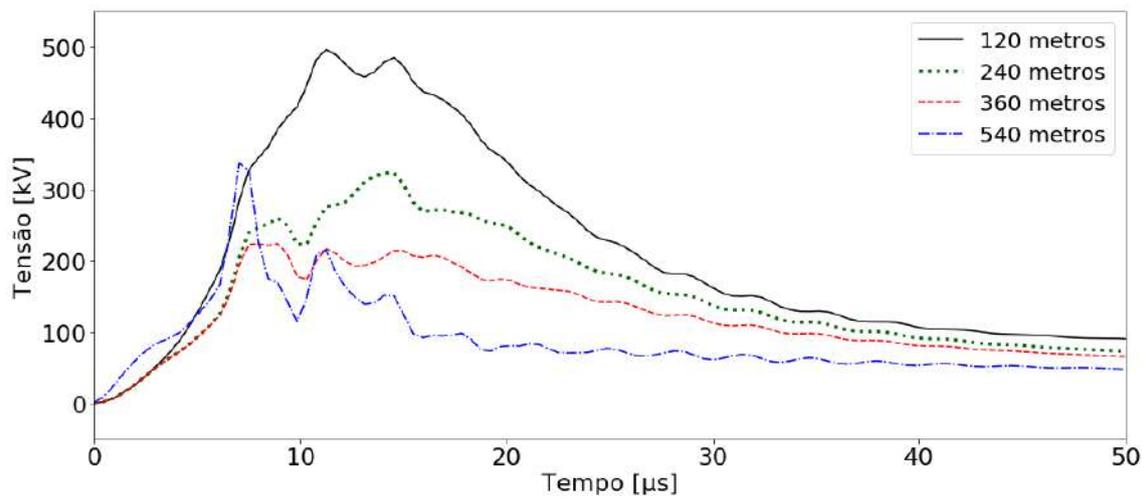


(c) - Topologia 3

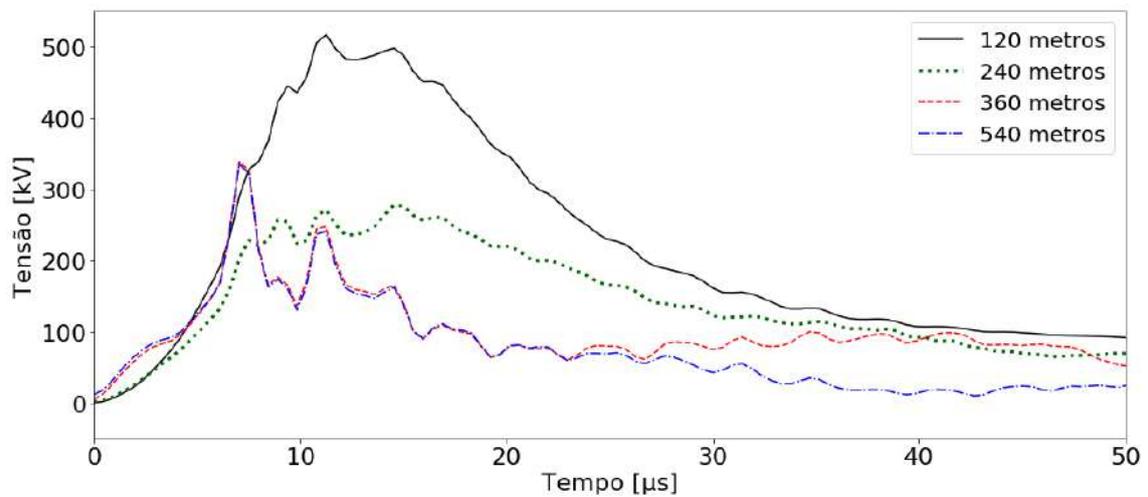
Figura 5.6-1 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 100 ohm.m



(a) - Topologia 1

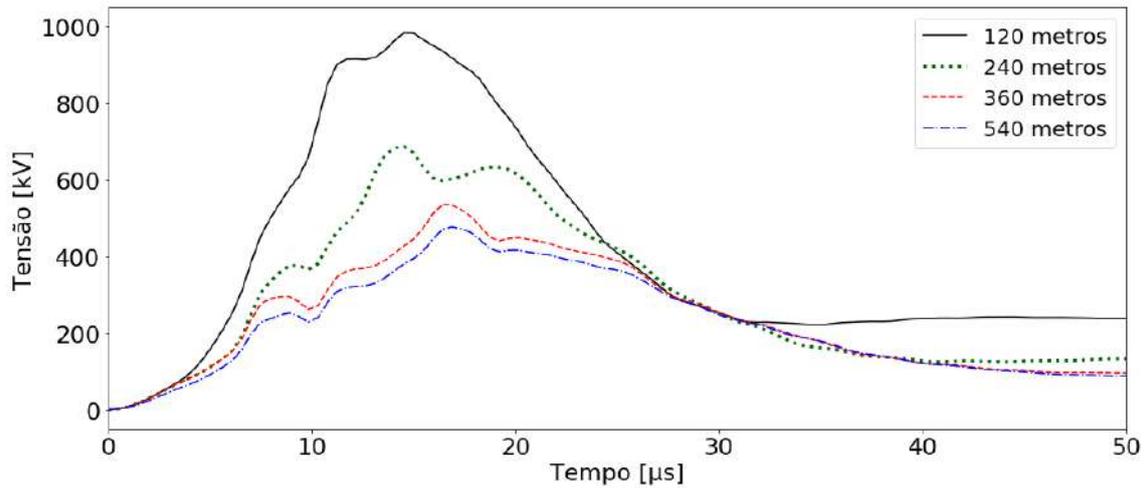


(b) - Topologia 2

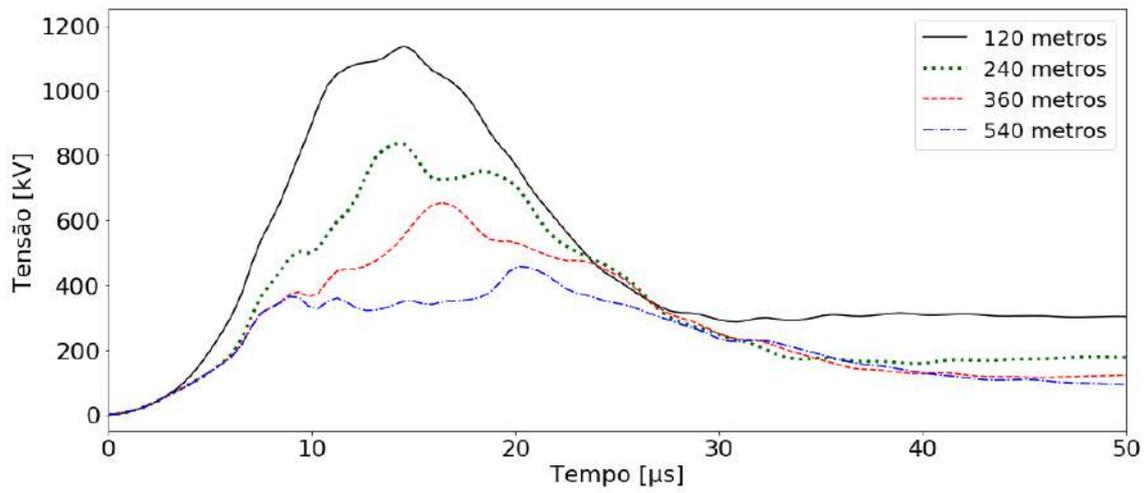


(c) - Topologia 3

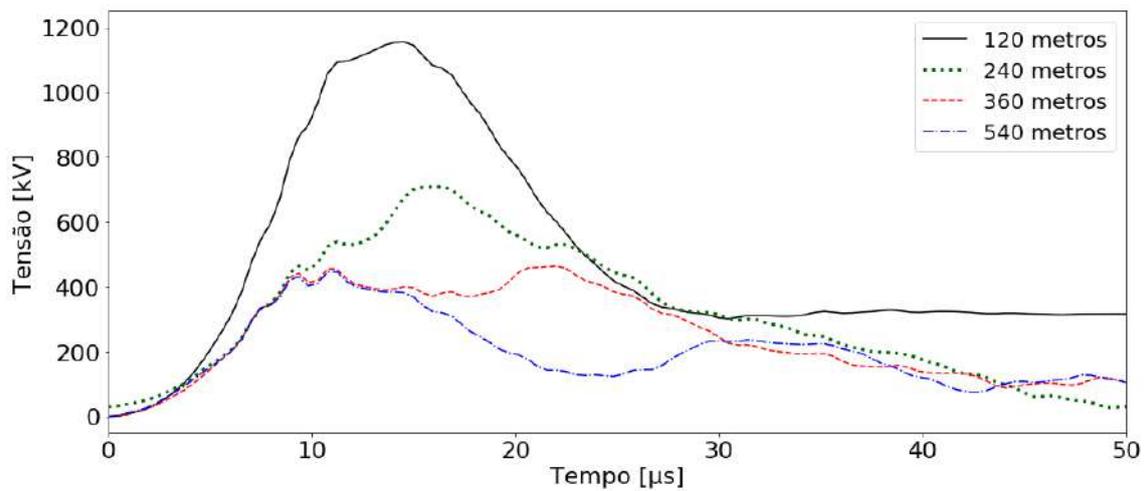
Figura 5.6-2 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m



(a) - Topologia 1

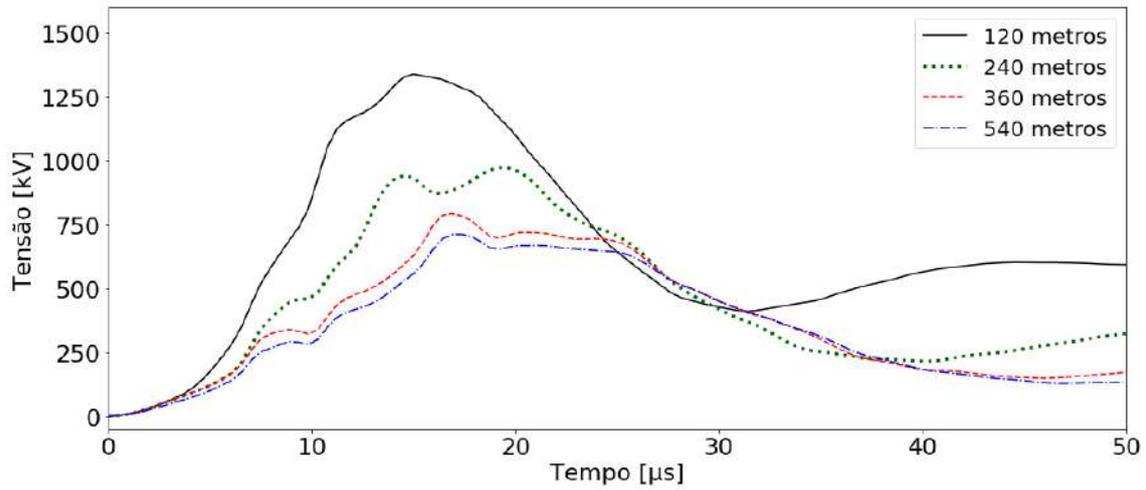


(b) - Topologia 2

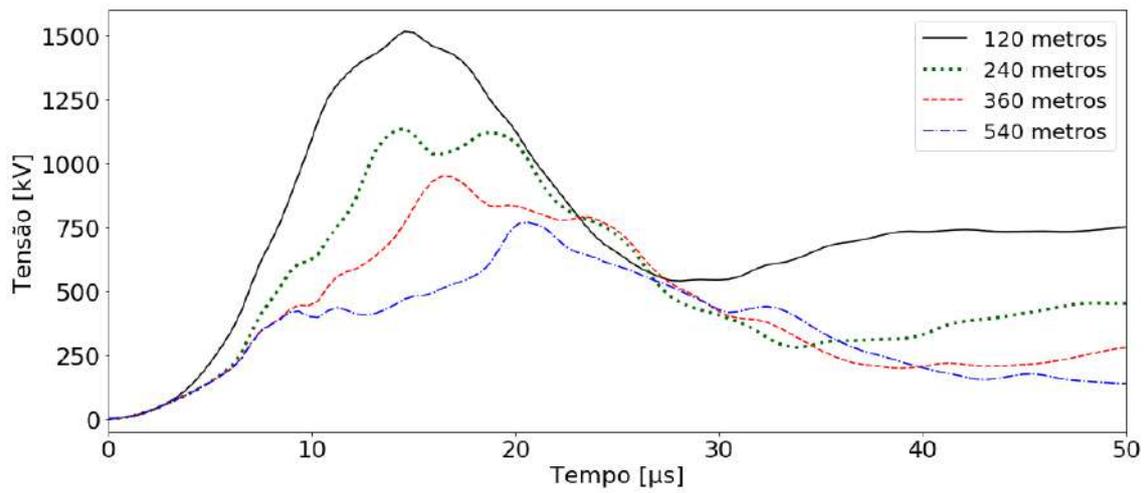


(c) - Topologia 3

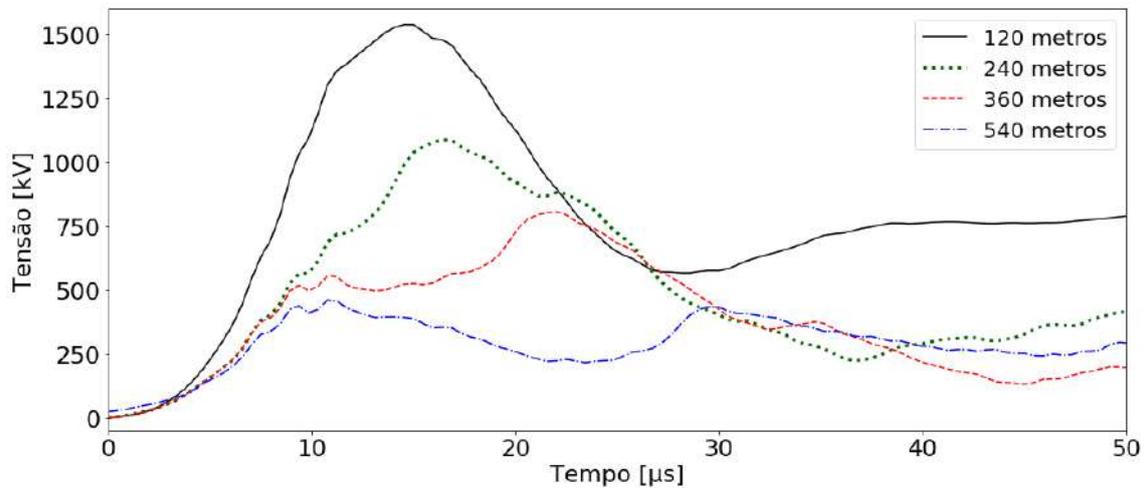
Figura 5.6-3 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m



(a) - Topologia 1



(b) - Topologia 2



(c) - Topologia 3

Figura 5.6-4 - Comparação das Sobretensões obtidas com diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

As tabelas a seguir resumem os resultados obtidos nas simulações. Os valores percentuais apresentados representam a diferença percentual com relação ao comprimento total de cabos contrapesos avaliado imediatamente inferior.

Tabela 5.6-1 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 100 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	120	254,07	--	0,020	--
	240	253,17	-0,35%	0,019	-5,00%
	360	253,17	0,00%	0,019	0,00%
	540	243,13	-3,97%	0,015	-21,05%
2	120	255,75	--	0,022	--
	240	253,93	-0,71%	0,020	-9,09%
	360	253,92	0,00%	0,020	0,00%
	540	253,91	-0,01%	0,020	0,00%
3	120	253,90	--	0,021	--
	240	250,81	-1,22%	0,018	-14,29%
	360	247,94	-1,15%	0,017	-5,56%
	540	248,34	0,16%	0,017	0,00%

Tabela 5.6-2 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	120	420,57	--	1,792	--
	240	258,45	-38,55%	0,273	-84,77%
	360	322,52	24,79%	0,124	-54,58%
	540	300,93	-6,69%	0,084	-32,26%
2	120	497,07	--	3,616	--
	240	323,50	-34,92%	0,654	-81,91%
	360	224,37	-30,64%	0,206	-68,50%
	540	337,17	50,28%	0,174	-15,53%
3	120	517,41	--	4,133	--
	240	278,09	-46,25%	0,442	-89,31%
	360	339,11	21,94%	0,201	-54,52%
	540	335,58	-1,04%	0,186	-7,46%

Tabela 5.6-3 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	120	984,98	--	38,580	--
	240	688,78	-30,07%	11,457	-70,30%
	360	535,75	-22,22%	4,099	-64,22%
	540	478,21	-10,74%	2,914	-28,91%
2	120	1137,62	--	54,692	--
	240	835,47	-26,56%	21,155	-61,32%
	360	654,69	-21,64%	8,081	-61,80%
	540	457,46	-30,13%	2,320	-71,29%
3	120	1155,58	--	58,038	--
	240	708,83	-38,66%	11,457	-80,26%
	360	463,36	-34,63%	4,099	-64,22%
	540	446,39	-3,66%	2,914	-28,91%

Tabela 5.6-4 – Resultados das Simulações para diferentes Comprimentos Totais de Cabo Contrapeso - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	120	1340,54	--	79,589	--
	240	974,02	-27,34%	39,586	-50,26%
	360	794,73	-18,41%	20,306	-48,70%
	540	713,53	-10,22%	15,644	-22,96%
2	120	1518,77	--	94,411	--
	240	1139,53	-24,97%	57,963	-38,61%
	360	951,31	-16,52%	32,759	-43,48%
	540	770,60	-19,00%	13,830	-57,78%
3	120	1540,25	--	96,869	--
	240	1089,92	-29,24%	39,586	-59,13%
	360	807,50	-25,91%	20,306	-48,70%
	540	519,84	-35,62%	15,644	-22,96%

Para os casos simulados com solos com resistividade de 100 ohm.m, as curvas de sobretensão obtidas são bastante similares. Não foram obtidas diferenças significativas no valor do pico da sobretensão para os casos simulados considerando os diferentes comprimentos totais de cabos contrapesos para os três tipos de topologias de sistemas de aterramento avaliados. Com relação ao número de desligamentos estimados, também foram obtidos valores relativamente próximos, com as maiores diferenças encontradas na topologia 3.

Para os casos simulados com solo com resistividade de 1.000 ohm.m é possível observar que a influência do comprimento efetivo no desempenho da linha de transmissão se manifesta de maneiras distintas dependendo da topologia do sistema de aterramento avaliado. Para a topologia 1, ao aumentar o comprimento total dos cabos contrapesos utilizados de 120 metros para 240 metros, obtém-se uma redução significativa de 84,77% no resultado da taxa de desligamentos anual esperada. Todavia, ao aumentar o comprimento total de 240 metros para 360 metros, representando um aumento de 50% no comprimento total dos cabos contrapesos, obtém-se uma redução de 54,58% no resultado da taxa de desligamentos anual esperada. Ao aumentar novamente o comprimento total dos cabos contrapesos, de 360 metros para 540 metros, representando novamente um acréscimo de 50%, o resultado obtido para a taxa de desligamentos anual estimada é reduzido em apenas 32,26%.

Análises semelhantes podem ser realizadas com as topologias 2 e 3 para as simulações realizadas com solos com resistividade de 1.000 ohm.m. Para estas topologias pode ser observada maior ineficiência em comparação com os resultados obtidos com a topologia 1. É possível observar que o aumento do comprimento total de cabos contrapesos de 360 metros para 540 metros representa uma redução de apenas 15,53% e 7,46% para as topologias 2 e 3, respectivamente, nos resultados da taxa de desligamentos anual estimada. Vale ressaltar que as diferenças obtidas na forma de onda das sobretensões apresentadas ocorrem pelo fato de que, dependendo do comprimento total de cabos contrapesos, a forma de onda da sobretensão, que resulta no maior número de desligamentos estimado, pode ser obtida na cadeia de isoladores instalada na mísula superior ou inferior da estrutura. Portanto, na Figura 5.6-2, item a, as diferenças nas formas de ondas das sobretensões, que ocorrem no início do transitório, são devido ao fato que, para os comprimentos totais de cabos contrapesos de 120 e 240 metros, a cadeia de isoladores instalada na mísula inferior resulta no maior número de desligamentos estimado. Para os comprimentos totais de 360 e 540 metros, isto ocorre na cadeia de isoladores instalada na mísula inferior. Fenômeno semelhante pode ser observado na topologia 3 (Figura 5.6-2, item c). Para a topologia 2, apenas o comprimento total de cabos contrapesos com 540 metros apresentou a forma de onda da sobretensão, que resultou no maior número de desligamentos estimado, presente na cadeia de isoladores instalada na mísula superior, enquanto que, para os demais comprimentos totais de cabos contrapesos, isto ocorreu na cadeia de isoladores instalada na mísula inferior (Figura 5.6-2, item b).

Para os casos simulados com solos com alta resistividade, ou seja, com 4.000 e 10.000 ohm.m, novamente é possível observar que a influência do comprimento efetivo no desempenho da linha de transmissão se manifesta de maneiras distintas dependendo da topologia do sistema de aterramento avaliado. Análises e conclusões semelhantes aos casos avaliados com resistividade do solo com 1.000 ohm.m podem ser feitas. Todavia, para os casos simulados com altas resistividades do solo é possível observar que a perda da eficiência em aumentar o comprimento total dos cabos contrapesos ocorre de forma mais gradativa. É possível observar que ainda são obtidas reduções significativas nos resultados da taxa de desligamentos anual estimada ao aumentar o comprimento total dos cabos contrapesos de 360 metros para 540 metros, ao contrário dos resultados obtidos para o solo com resistividade de 1.000 ohm.m. Os resultados estão concordando com o fato de que o comprimento efetivo de um sistema de aterramento aumenta conforme a resistividade do solo aumenta [53].

Portanto, é possível concluir que a prática usual de se aumentar o comprimento dos cabos contrapesos instalados com o objetivo de melhorar o desempenho das linhas de transmissão na ocasião da incidência de descargas atmosféricas não representa sempre a melhor solução. O comprimento efetivo dos cabos contrapesos instalados no sistema de aterramento limita a eficiência desta prática. Sendo assim, é necessária a simulação das características do sistema de aterramento em questão, principalmente quanto à resistividade do solo e a disposição em que os cabos contrapesos foram instalados, de maneira a ser possível avaliar qual é a melhor medida a ser tomada.

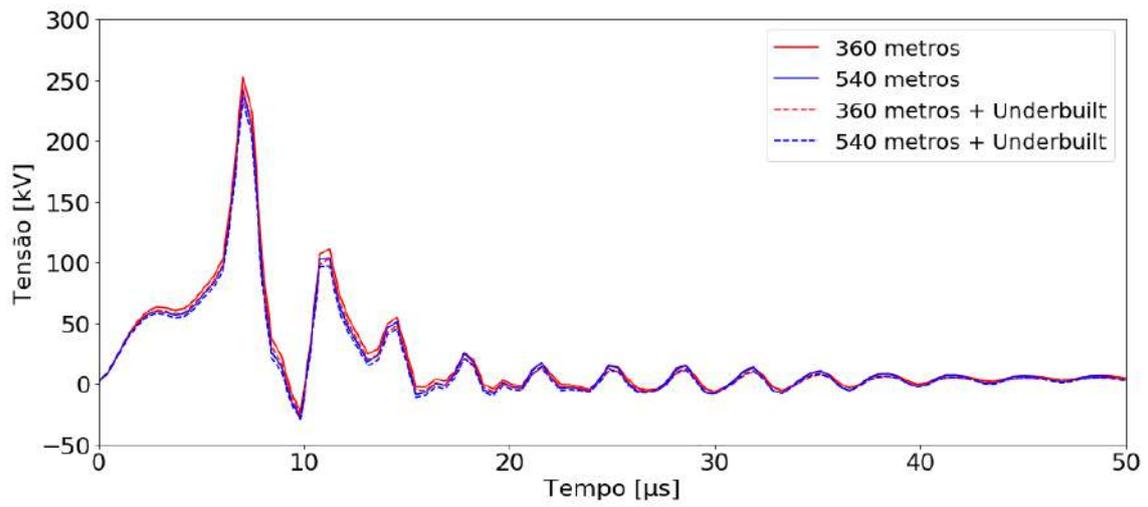
5.7 Simulação da Influência dos Cabos Para-raios *Underbuilt*

Nesta seção será simulado o desempenho da linha de transmissão com para-raios *Underbuilt* instalados, apresentada na Figura 5.2-7, na ocasião da incidência de uma corrente de retorno de uma descarga atmosférica (apresentada na Figura 3.2-1) no topo da estrutura.

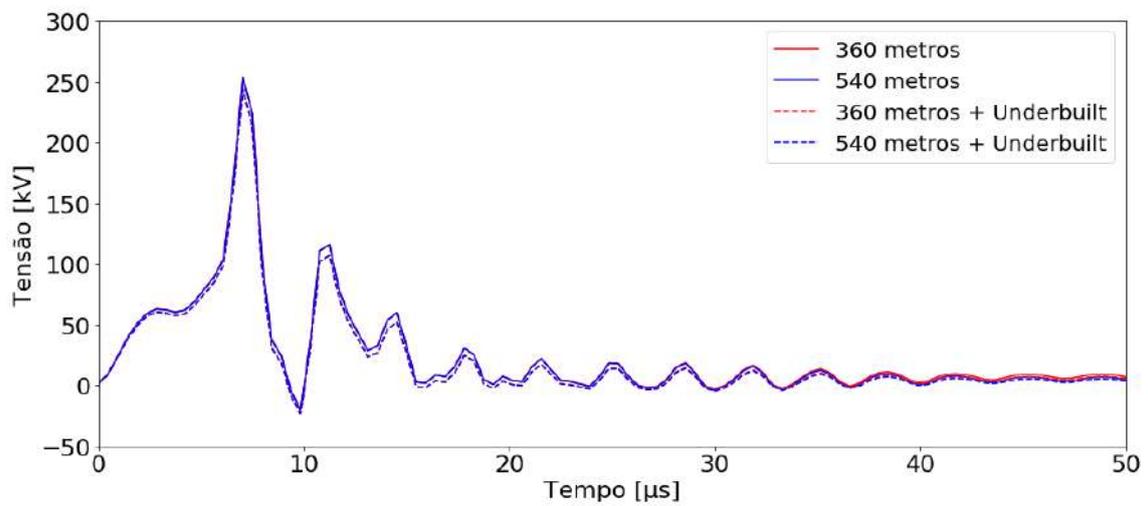
Conforme mencionado, em virtude da complexidade envolvida no estudo do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, nem sempre é alcançado o desempenho necessário. A estratégia frequentemente utilizada é aumentar o comprimento dos cabos contrapesos instalados, porém, conforme explicado e ilustrado através das simulações realizadas na seção 5.6, esta estratégia é limitada pelo comprimento efetivo dos cabos contrapesos. Este cenário abre a possibilidade de serem adotadas soluções não convencionais, como a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt* [69].

Com o objetivo de ser possível observar a influência dos cabos para-raios *Underbuilt* nos resultados do desempenho de uma linha de transmissão, foram realizadas simulações para os comprimentos totais de cabos contrapesos de 360 e 540 metros, com e sem os cabos para-raios *Underbuilt* instalados, para cada uma das topologias do sistema de aterramento consideradas, conforme apresentado na seção 5.2.3. A escolha por simular apenas os sistemas de aterramento com comprimentos totais de 360 e 540 metros, com e sem cabos para-raios *Underbuilt*, foi em virtude da possibilidade de poder avaliar a região onde o aumento dos cabos contrapesos começa a perder a eficiência em conjunto com a melhoria adquirida com a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt*.

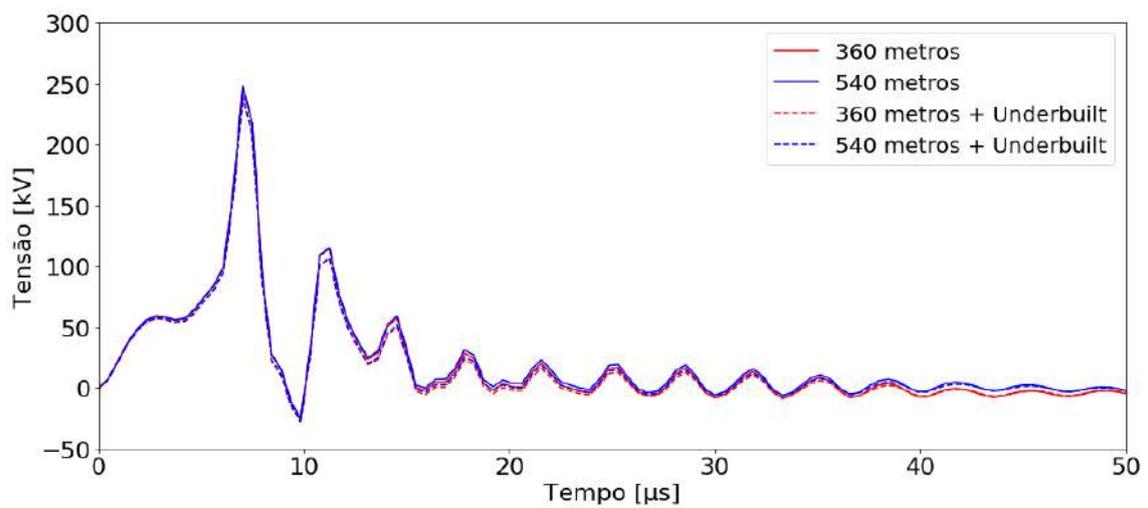
De maneira a ser possível avaliar o comportamento do sistema para solos de diferentes regiões, foram considerados solos com resistividades distintas de 100, 1.000, 4.000 e 10.000 ohm.m e seus resultados são apresentados nas Figuras 5.7-1, 5.7-2, 5.7-3 e 5.7-4, respectivamente.



(a) - Topologia 1

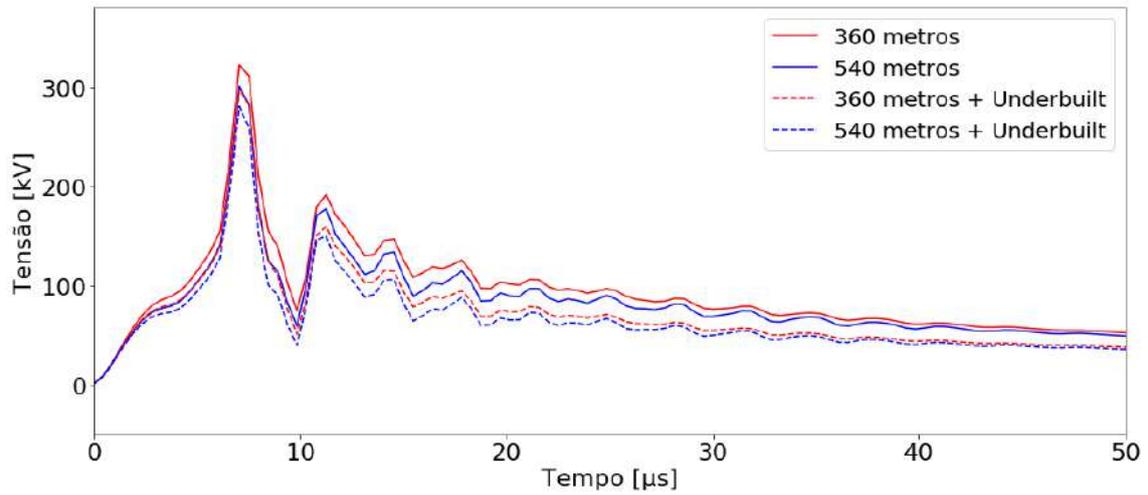


(b) - Topologia 2

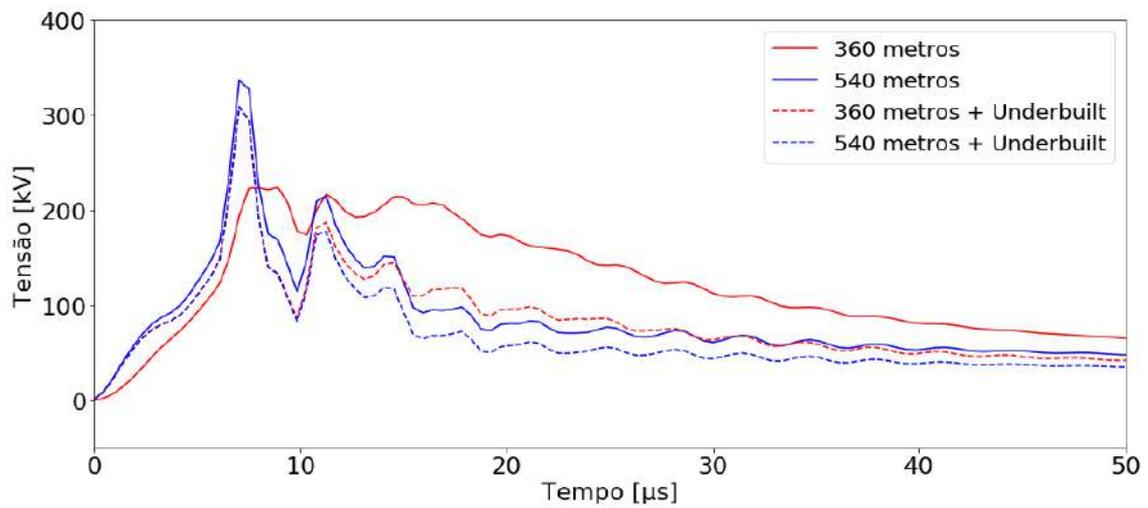


(c) - Topologia 3

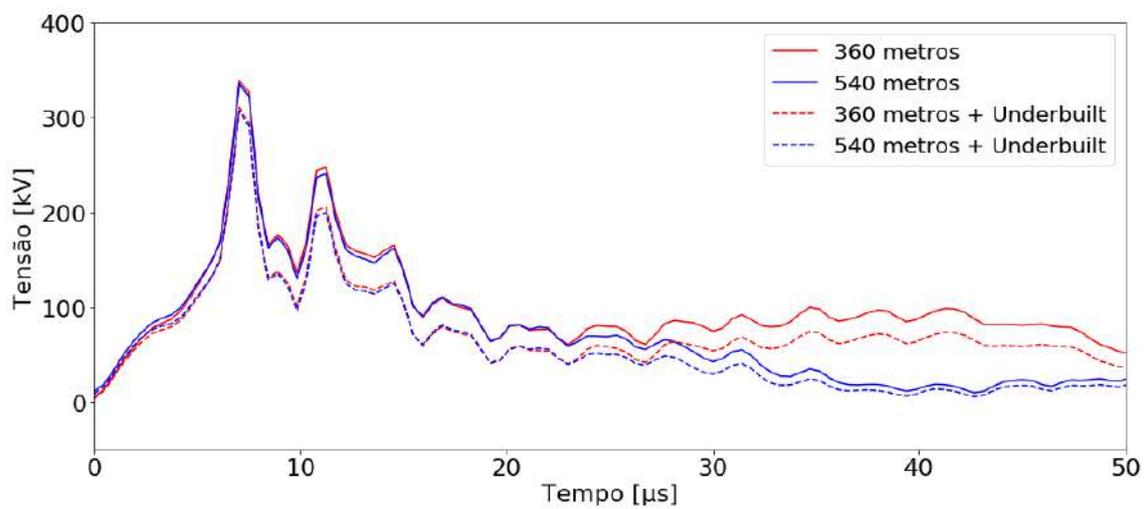
Figura 5.7-1 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 100 ohm.m



(a) - Topologia 1

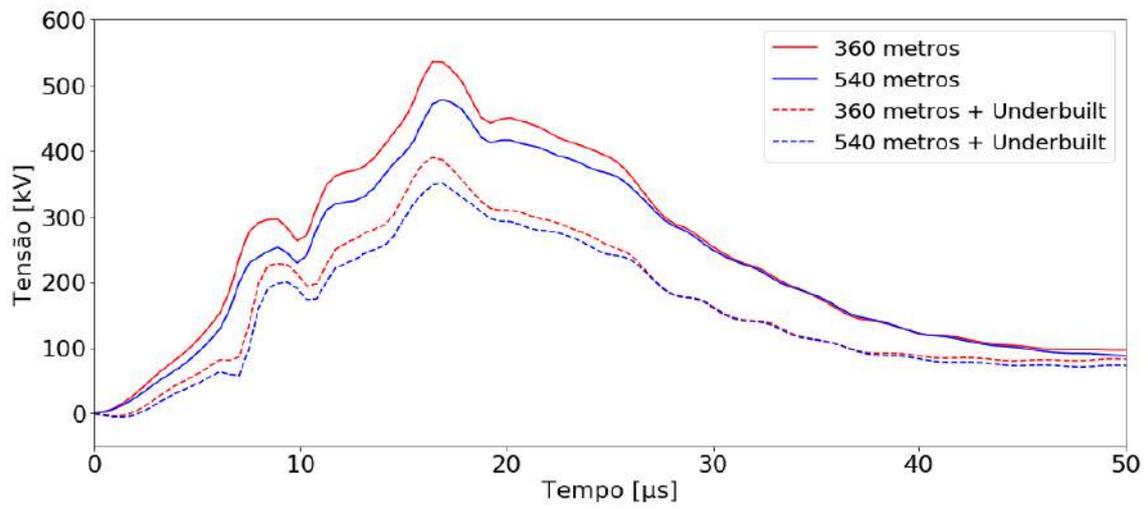


(b) - Topologia 2

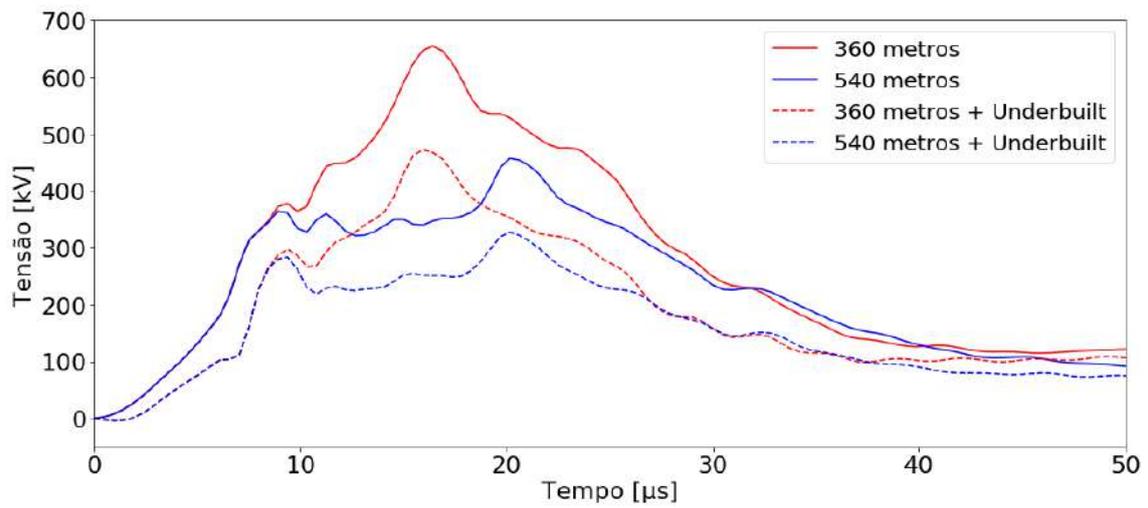


(c) - Topologia 3

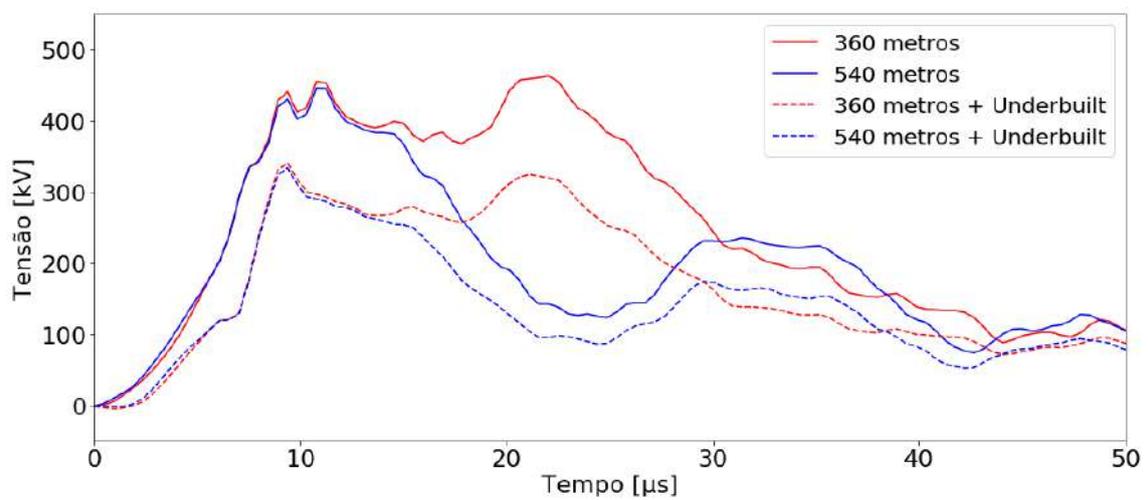
Figura 5.7-2 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m



(a) - Topologia 1

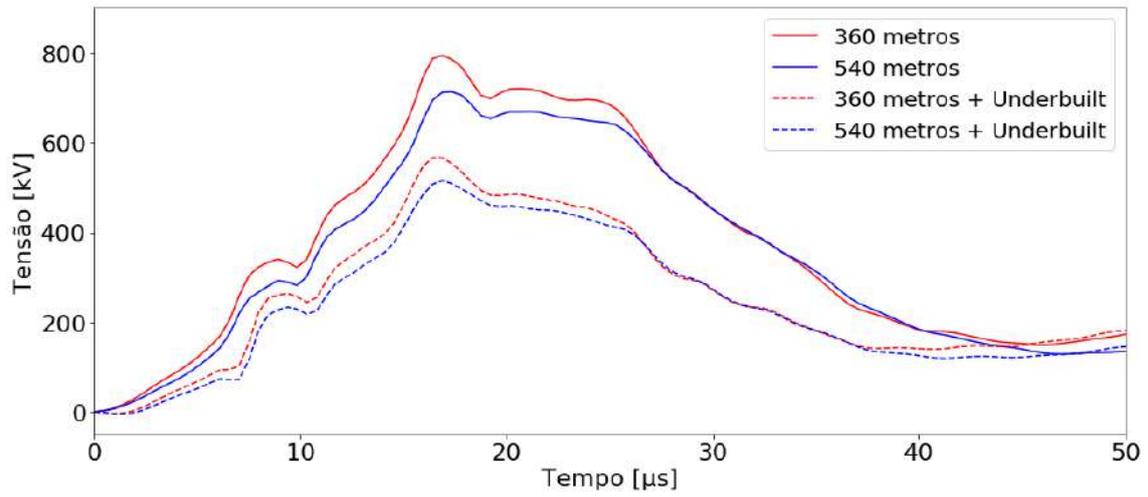


(b) - Topologia 2

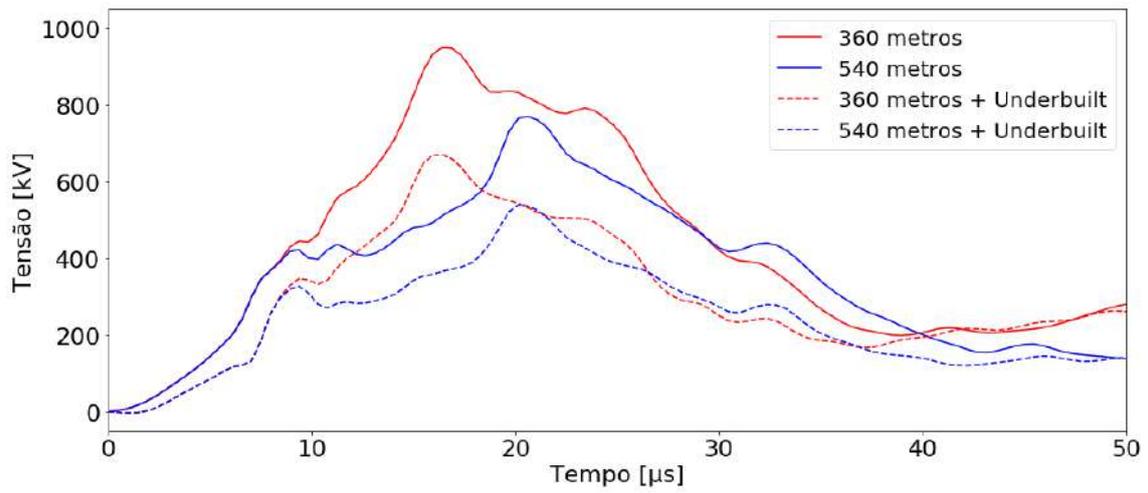


(c) - Topologia 3

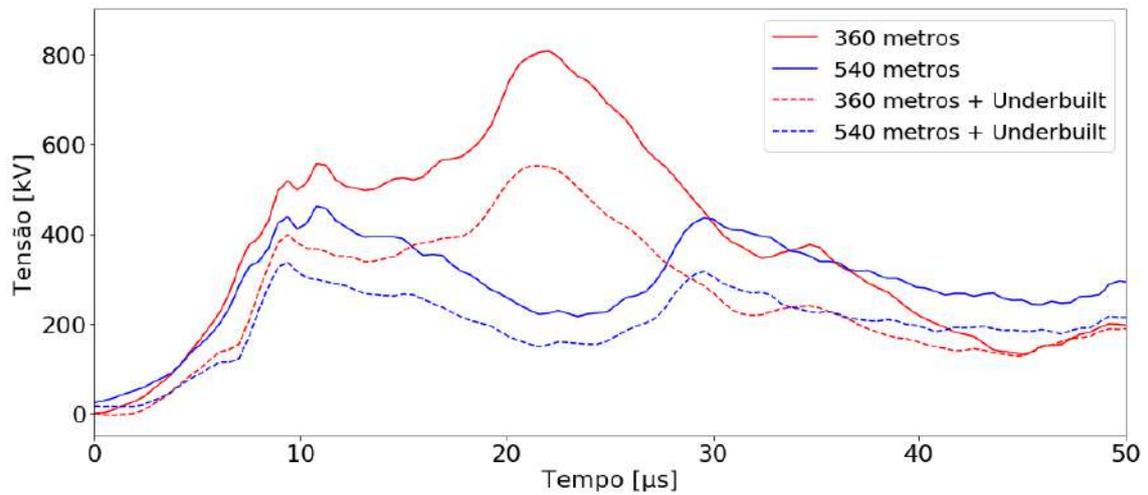
Figura 5.7-3 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m



(a) - Topologia 1



(b) - Topologia 2



(c) - Topologia 3

Figura 5.7-4 - Comparação das Sobretensões obtidas utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

As tabelas a seguir resumem os resultados obtidos nas simulações. Os valores percentuais apresentados representam a diferença percentual com relação ao sistema de aterramento com comprimento total de cabos contrapesos de 360 metros e sem utilizar cabos para-raios *Underbuilt*.

Tabela 5.7-1 – Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 100 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	360	253,17	--	0,019	--
	540	243,13	-3,97%	0,015	-21,05%
	360 + <i>Underbuilt</i>	243,48	-3,83%	0,015	-21,05%
	540 + <i>Underbuilt</i>	235,30	-7,06%	0,012	-36,84%
2	360	253,92	--	0,020	--
	540	253,91	-0,01%	0,020	0,00%
	360 + <i>Underbuilt</i>	244,11	-3,87%	0,016	-20,00%
	540 + <i>Underbuilt</i>	244,10	-3,87%	0,016	-20,00%
3	360	247,94	--	0,017	--
	540	248,34	0,16%	0,017	0,00%
	360 + <i>Underbuilt</i>	239,22	-3,51%	0,014	-17,65%
	540 + <i>Underbuilt</i>	239,54	-3,38%	0,014	-17,65%

Tabela 5.7-2 – Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 1.000 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	360	322,52	--	0,124	--
	540	300,93	-6,69%	0,084	-32,26%
	360 + <i>Underbuilt</i>	297,65	-7,71%	0,075	-39,52%
	540 + <i>Underbuilt</i>	280,86	-12,92%	0,054	-56,45%
2	360	224,37	--	0,206	--
	540	337,17	50,28%	0,174	-15,53%
	360 + <i>Underbuilt</i>	309,22	37,82%	0,107	-48,06%
	540 + <i>Underbuilt</i>	309,16	37,79%	0,101	-50,97%
3	360	339,11	--	0,201	--
	540	335,58	-1,04%	0,186	-7,46%
	360 + <i>Underbuilt</i>	310,90	-8,32%	0,117	-41,79%
	540 + <i>Underbuilt</i>	307,77	-9,24%	0,109	-45,77%

Tabela 5.7-3 Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 4.000 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	360	535,75	--	4,099	--
	540	478,21	-10,74%	2,914	-28,91%
	360 + <i>Underbuilt</i>	390,22	-27,17%	1,122	-72,63%
	540 + <i>Underbuilt</i>	350,75	-34,53%	0,822	-79,95%
2	360	654,69	--	8,081	--
	540	457,46	-30,13%	2,320	-71,29%
	360 + <i>Underbuilt</i>	472,43	-27,84%	2,142	-73,49%
	540 + <i>Underbuilt</i>	327,34	-50,00%	0,636	-92,13%
3	360	463,36	--	3,482	--
	540	446,39	-3,66%	2,025	-41,84%
	360 + <i>Underbuilt</i>	341,12	-26,38%	0,918	-73,64%
	540 + <i>Underbuilt</i>	333,97	-27,92%	0,539	-84,52%

Tabela 5.7-4 Resultados das Simulações utilizando Cabos Para-raios *Underbuilt* - Resistividade do Solo = 10.000 ohm.m

Topologia do Aterramento	Comprimento Total de Cabo Contrapeso (m)	Pico da Sobretensão (kV)	Varição (%)	Desligamentos/ 100km/ano	Varição (%)
1	360	794,73	-	20,306	-
	540	713,53	-10,22%	15,644	-22,96%
	360 + <i>Underbuilt</i>	566,51	-28,72%	5,358	-73,61%
	540 + <i>Underbuilt</i>	515,53	-35,13%	4,163	-79,50%
2	360	951,31	-	32,759	-
	540	770,60	-19,00%	13,830	-57,78%
	360 + <i>Underbuilt</i>	671,20	-29,44%	8,847	-72,99%
	540 + <i>Underbuilt</i>	540,65	-43,17%	3,537	-89,20%
3	360	807,50	-	17,623	-
	540	519,84	-35,62%	2,614	-85,17%
	360 + <i>Underbuilt</i>	551,89	-31,65%	4,428	-74,87%
	540 + <i>Underbuilt</i>	374,14	-53,67%	0,666	-96,22%

Para os casos simulados com solos com resistividade de 100 ohm.m, as curvas de sobretensões obtidas são bastante similares. Não foram obtidas diferenças significativas no valor do pico da sobretensão para os casos simulados e na taxa de

desligamentos anual estimada que justifiquem a utilização de cabos para-raios *Underbuilt*, visto que os resultados obtidos para solos com baixa resistividade já representam valores bastante favoráveis de desempenho para a linha de transmissão.

Para os casos simulados com solo com resistividade de 1.000 ohm.m é possível observar a atuação dos cabos para-raios *Underbuilt* na redução da quantidade estimada de desligamentos a cada 100 km anual. Para a topologia 1, ao aumentar o comprimento total dos cabos contrapesos de 360 metros para 540 metros, obtém-se uma redução de 32,26%. Enquanto, caso fosse mantido o comprimento total dos cabos contrapesos em 360 metros e fossem instalados os cabos para-raios *Underbuilt*, seria obtida uma redução de 39,52%. Fenômeno semelhante ocorre com as topologias 2 e 3, onde é possível observar que a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt* representa uma redução mais significativa na taxa de desligamentos estimada. Com relação aos cenários simulados com comprimento total de cabos contrapesos de 540 metros e considerando a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt*, é possível observar que não houve redução significativa nos resultados da taxa de desligamentos estimada, quando comparados com os resultados obtidos com comprimento total de 360 metros juntamente com a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt*, para as topologias 2 e 3.

Vale ressaltar que, para a topologia 2 considerando o solo com resistividade de 1.000 ohm.m e comprimento total de cabos contrapesos de 360 metros, a forma de onda da sobretensão, que resultou no maior número de desligamentos estimado, é obtida na cadeia de isoladores instalada na mísula inferior. Nos demais cenários apresentados no item b da Figura 5.7-2, a forma de onda da sobretensão que determina o desempenho estimado da linha de transmissão é obtida na cadeia de isoladores instalada na mísula inferior, justificando assim, as diferenças encontradas nas formas de onda entre os cenários simulados.

Para os casos simulados com solo com resistividade de 4.000 ohm.m é possível observar uma redução expressiva nos resultados obtidos do pico da sobretensão e na taxa de desligamentos estimada. As curvas de sobretensões obtidas e apresentadas na Figura 5.7-3 permitem observar a redução significativa na amplitude das formas de onda nos cenários simulados considerando a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt*, com os respectivos cenários sem considerar a instalação dos para-raios *Underbuilt*. Para a topologia 1, ao aumentar o comprimento total dos cabos contrapesos de 360 metros para 540 metros, obtém-se uma redução de 28,91%. Enquanto, caso fosse mantido o comprimento total dos cabos contrapesos em 360 metros e fossem instalados os cabos para-raios *Underbuilt*, seria obtida uma

redução de 72,63%. A mesma comparação pode ser realizada com as topologias 2 e 3, porém seriam obtidas reduções ainda mais expressivas de 73,49% e 73,64%, respectivamente. Os cenários simulados considerando o sistema de aterramento com comprimento total de cabos contrapesos de 540 metros e considerando a instalação dos cabos para-raios *Underbuilt* apresentam ainda uma redução significativa no resultado da taxa de desligamentos anual estimada, ao contrário dos resultados obtidos com o solo com resistividade de 1.000 ohm.m.

Para os casos simulados com solo com resistividade de 10.000 ohm.m, as topologias de aterramento obtiveram resultados significativamente distintos para a taxa de desligamentos anual, sendo os resultados mais favoráveis obtidos com a topologia 3, ou seja, adotando o arranjo não convencional de cabos contrapesos no sistema de aterramento. Para o cenário utilizando comprimento total de cabos contrapesos de 540 metros e a instalação de cabos para-raios *Underbuilt* foi possível obter uma redução de 96,22%, em comparação com o resultado utilizando 360 metros de comprimento total de cabos contrapesos sem os cabos para-raios *Underbuilt*.

Portanto, em função do comprimento efetivo dos cabos contrapesos, a partir de certo ponto, o aumento do comprimento dos cabos contrapesos instalados não representará uma melhoria significativa no desempenho da linha de transmissão. Neste cenário a instalação de cabos para-raios *Underbuilt* representa uma alternativa válida e eficaz, porém é necessário realizar uma simulação precisa contendo as características do sistema, principalmente com relação à resistividade do solo onde se encontra a linha de transmissão, pois a eficácia em se instalar para-raios *Underbuilt* é obtida em regiões que apresentam solos com resistividades elevadas, conforme pôde ser observado nos resultados das simulações apresentadas.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões Gerais

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e contribuições desenvolvidas ao longo do texto nos capítulos anteriores. O trabalho teve duas vertentes: desenvolvimento de uma ferramenta computacional e a avaliação de diferentes estratégias comumente utilizadas para melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. A partir da pesquisa de trabalhos existentes, desenvolvimento da ferramenta computacional, simulações e análise dos resultados, podem ser feitas as conclusões apresentadas a seguir.

Inicialmente foram apresentados alguns conceitos básicos relativos a descargas atmosféricas, com destaque para os tipos de descargas e o seu processo de formação, onde é possível observar que, apesar do volume de pesquisas e trabalhos realizados, este fenômeno ainda não é completamente conhecido. A definição de alguns conceitos fundamentais para o cálculo do desempenho das linhas de transmissão também foram apresentados, como a densidade de descargas atmosféricas para o solo. O levantamento apresentado das linhas de transmissão construídas no Brasil permitiu observar que a maioria delas é construída em regiões com valores relativamente altos de densidade de descargas atmosféricas para o solo. Foram definidos também os tipos de desligamentos provocados pela incidência de descargas atmosféricas na linha de transmissão, com destaque para o *Backflashover*, sendo este o fenômeno de maior ocorrência.

O estudo do desempenho das linhas de transmissão na ocasião da incidência de uma corrente de retorno de uma descarga atmosférica em uma das estruturas contempla notável complexidade. Diversos componentes do sistema atuam simultaneamente e, portanto, são necessários de serem representados através de modelos matemáticos consistentes que reproduzam o seu comportamento transitório. Neste trabalho foi apresentado um breve levantamento histórico dos principais trabalhos existentes que culminaram na modelagem matemática atualmente utilizada na literatura técnica para representar a forma de onda das correntes de retorno das descargas atmosféricas, as estruturas que sustentam os cabos condutores e para-raios, os parâmetros da linha de transmissão e, por fim, a impedância do sistema de aterramento. Ênfase maior deve ser concedida ao último, pois a redução da impedância do sistema de aterramento é amplamente utilizada como medida para aprimorar o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

A modelagem precisa do sistema de aterramento, através da impedância de aterramento, e sua influência na resposta do sistema teve grande destaque ao longo do presente texto. Foram levantados alguns dos principais trabalhos realizados ao longo do século passado e presente, onde se constatou que a modelagem mais precisa utiliza uma metodologia baseada na teoria de campos eletromagnéticos, em detrimento das abordagens baseadas na teoria de circuitos ou de linhas de transmissão. Destaca-se ainda que a avaliação no domínio da frequência permite a representação adequada da condutividade e permissividade elétrica, pois estes parâmetros são comprovadamente variantes com a frequência. O acoplamento direto da impedância de aterramento às estruturas utilizadas no sistema da linha de transmissão permitiu avaliar como diferentes topologias de sistemas de aterramento influenciam o desempenho do sistema. Vale ressaltar que a maior precisão na modelagem tem como consequência o maior tempo de processamento computacional necessário para efetuar os cálculos. Todavia, com a evolução da capacidade de processamento e de armazenamento dos computadores atuais, este agravante tem sido amenizado.

Com base nas modelagens dos elementos do sistema que compõem uma linha de transmissão, foi elaborada a ferramenta computacional, *PRTL-mHEM*, em código aberto que permite avaliar o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas. Por ser em código aberto, permite que sejam realizadas adequações e melhorias em sua estrutura por outros pesquisadores no futuro. A criação desta ferramenta computacional representa um dos principais objetivos deste trabalho, atendendo a demanda por modelagens mais precisas sem que ocorra prejuízo na generalidade de sua utilização. Esta ferramenta permite a inclusão da geometria e características das estruturas utilizadas, assim como dos cabos condutores e para-raios (inclusive *Underbuilt*), como também a disposição e características dos cabos contrapesos utilizados no sistema de aterramento. Os cálculos são realizados no domínio da frequência utilizando a transformada numérica de Laplace e os resultados são obtidos no domínio do tempo utilizando a transformada numérica inversa de Laplace. O desempenho da linha de transmissão é então mensurado através do número de desligamentos estimados em função das curvas de sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores.

A ferramenta computacional desenvolvida, *PRTL-mHEM*, foi utilizada para realizar diversas simulações de interesse prático utilizando uma estrutura de circuito duplo usualmente utilizada em sistemas de transmissão com nível de tensão de 230 kV. Os resultados do número de desligamentos estimados juntamente com as

formas de onda das sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores permitem realizar as conclusões que são apresentadas a seguir:

- i. Com relação à influência dos parâmetros do solo, os modelos mais simples apresentaram maiores valores para o número de desligamentos estimados em comparação com os resultados obtidos com os modelos mais precisos que consideram os parâmetros do solo, condutividade e permissividade elétrica, variantes com a frequência. Este fato agrava-se conforme a resistividade do solo aumenta.
- ii. As sobretensões obtidas nas cadeias dos isoladores se comportam de maneira distinta, em função da resistividade do solo. Os resultados obtidos permitiram concluir que, em solos com baixa resistividade, a cadeia instalada na mísula superior apresentou o maior pico de sobretensão e é significativamente mais severa que a sobretensão obtida na cadeia instalada na mísula inferior. Todavia, conforme o valor da resistividade do solo aumenta, a diferença entre as sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores é reduzida até que em certo ponto, ocorre a inversão deste fenômeno e a cadeia de isoladores instalada na mísula inferior que passa a apresentar a sobretensão mais severa. Este fenômeno justifica a necessidade de se calcular as sobretensões obtidas e a possível ruptura do isolamento em todas as cadeias de isoladores, de maneira a ser possível apresentar nos resultados a condição mais severa.
- iii. A disposição e o comprimento dos cabos contrapesos que são instalados no solo e conectados as estruturas influenciam no valor da impedância a ser obtida e, por consequência, no desempenho da linha de transmissão na ocorrência de uma descarga atmosférica. Foram analisadas neste trabalho três topologias de sistemas de aterramento: A primeira delas constitui a topologia convencional usualmente utilizada nos sistemas de aterramento das linhas de transmissão; enquanto que a segunda e a terceira topologias representam alternativas usualmente utilizadas em regiões que possuem restrições ambientais para a instalação dos cabos contrapesos. Os resultados das simulações permitem concluir que topologias alternativas podem ter desempenho superior em solos com resistividade elevada. Sendo assim, é necessária a simulação de cada caso e suas características para a correta decisão acerca do dimensionamento dos sistemas de aterramento.

- iv. A prática de aumentar o comprimento dos cabos contrapesos instalados, com o objetivo de melhorar o desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas, não funciona indefinidamente. Este fato decorre dos cabos contrapesos possuírem um comprimento efetivo, a partir do qual o aumento no comprimento dos cabos contrapesos não provoca redução no valor da impedância de aterramento e, por consequência, não representa melhoria no desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas. Os resultados das simulações corroboram com o fato de que o comprimento efetivo de um sistema de aterramento aumenta conforme a resistividade do solo aumenta.
- v. A avaliação da alternativa não convencional de instalar cabos para-raios *Underbuilt* ganha notabilidade neste cenário onde simplesmente aumentar o comprimento dos cabos contrapesos instalados no sistema de aterramento não melhora o desempenho da linha de transmissão. A instalação de cabos para-raios *Underbuilt* representa, portanto, uma alternativa válida e eficaz, porém é necessária a avaliação do sistema e suas características, pois os resultados das simulações permitem concluir que a sua eficácia é obtida em regiões que apresentam solos com resistividades elevadas.

Por fim, ressalta-se que a aplicação da ferramenta desenvolvida *PRTL-mHEM* pode ser utilizada para simular diversas configurações de geometrias de estruturas e topologias de sistemas de aterramento que, ao longo do tempo, podem ser salvas e poderão constituir um banco de informações. Este banco de informações poderá ser então utilizado para acelerar e aperfeiçoar a tomada de decisão acerca de qual a melhor medida a ser executada com o objetivo de obter melhorias no desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

6.2 Propostas de Continuidade do Trabalho

Tendo em vista as conclusões e contribuições apresentadas na seção anterior, percebe-se que algumas atividades de pesquisa permitem investigação adicional em trabalhos futuros. A seguir são apresentadas algumas propostas de continuidade para o trabalho:

- i. Inclusão do efeito não linear da ionização do solo na ferramenta computacional desenvolvida e análise da sua influência nos resultados obtidos para o desempenho das linhas de transmissão quanto ao número de desligamentos anuais estimado e as curvas de sobretensões transitórias obtidas no sistema.

- ii. Análise de outros modelos de variação dos parâmetros condutividade e permissividade elétrica do solo e sua influência no desempenho do sistema.
- iii. Inclusão e avaliação de solos estratificados, principalmente no que se refere ao sistema de aterramento e sua influência no desempenho da linha de transmissão.
- iv. Inclusão da taxa de desligamentos estimada por *Flashover* decorrente de descargas diretas devido à falha de blindagem dos cabos para-raios. A ferramenta computacional desenvolvida contempla apenas o número de desligamentos estimados devido ao fenômeno de *Backflashover*, que é o fenômeno responsável pela maioria dos desligamentos não programados.
- v. Inclusão da taxa de desligamentos estimada devido a descargas atmosféricas no meio do vão.
- vi. Avaliação de técnicas matemáticas alternativas com o objetivo de acelerar o desempenho computacional, principalmente do modelo do sistema de aterramento, em função da execução dos seus cálculos demandarem mais tempo.
- vii. Inclusão da possibilidade de serem utilizados, nas fases da linha de transmissão, os feixes assimétricos, usualmente utilizados em Linhas de Potência Natural Elevada (LPNE).
- viii. Avaliar o desempenho da linha de transmissão utilizando outras formas de onda de corrente como, por exemplo, a forma de onda das correntes de descargas subsequentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Visacro, *Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*, São Paulo: Artliber, 2005.
- [2] A. Soares Júnior, *Tese de Doutorado. Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas*, Belo Horizonte, 2001.
- [3] J. C. Salari Filho, *Tese de Doutorado. Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão - Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência*, Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.
- [4] CIGRE Working Group 01 (Lightning), "Brochure 63 - Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines," 1991.
- [5] M. A. Uman, *The Lightning Discharge*, Orlando, Florida: Academic Press Inc., 1987.
- [6] G. Simpson e F. J. Scrase, "The Distribution of Electricity in Thunderclouds," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, pp. 309-352, 1937.
- [7] F. Kiessling, P. Nefzger, J.F.Nolasco e U.Kaintzyk, *Overhead Power Lines, Planning, Design, Construction*, Springer, 2002.
- [8] ABNT, "Norma Técnica Brasileira NBR-5419: Proteção de Edificações," Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1993.
- [9] Geology.com, "World Lightning Strikes Map," [Online]. Available: <https://geology.com/articles/lightning-map.shtml>. [Acesso em 10 Maio 2019].
- [10] Operador Nacional do Sistema, "http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas," [Online]. Available: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. [Acesso em 17 Março 2019].
- [11] ANEEL, "Editais de Transmissão - ANEEL," 15 Fevereiro 2018. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/transmissao4>. [Acesso em 15 Maio 2019].
- [12] IEEE, *Std 1410 Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*, 2010.
- [13] F. H. Silveira, S. Visacro e R. E. S. Filho, "Calculation of Backflashover Outage Rate of Transmission Lines: A Discussion on Traditional Methodologies and Recent Advances," *XIII SIPDA*, Outubro 2015.
- [14] A. Soares Júnior, M. A. O. Schroeder e S. Visacro, "Transient Voltages in Transmission Lines caused by Direct Lightning Strikes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n. 2, pp. 1447-1452, 2005.
- [15] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Press, 1999.
- [16] Quora, "What is a Flashover in Electricity," 14 de Setembro de 2019. [Online]. Available: <https://www.quora.com/What-is-a-flashover-in-electricity>. [Acesso em 07 de Junho de 2020].
- [17] S. Visacro, "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines," *Journal of Lightning Research*, 2007.
- [18] C. E. R. Bruce e R. H. Golde, "The Lightning Discharge," *The Journal of the*

Institution of Electrical Engineers, vol. 88, pp. 487-520, 1941.

- [19] M. A. Uman e D. K. McLain, "Magnetic Field of Lightning Return Strokes," *Journal of Geophysical Research*, pp. 6899-6910, 1969.
- [20] R. Jones, "On the Use of Tailored Return-Stroke Current Representations to Simplify the Analysis of Lightning Effects on Systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, p. 95-96, 1977.
- [21] R. L. Gardner, L. Baker, C. E. Baum e D. J. Andersh, "Comparison of Lightning with Public Domain HEMP Waveforms on the Surface of an Aircraft," *6^o EMC Symposium*, pp. 175-180, 1985.
- [22] F. Heidler, *Lightning Electromagnetic Impulse, Theorie und Messungen, Tese Ph.D.*, Munich: Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal das Forças Armadas, 1987.
- [23] F. Heidler, J. M. Cvetié e B. V. Stanié, "Calculation of Lightning Current Parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n. 2, pp. 399-404, 1999.
- [24] A. D. Conti e S. Visacro, "Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, n. 2, pp. 448-451, 2007.
- [25] F. H. Silveira, A. D. Conti e S. Visacro, "Lightning Overvoltage Due to First Strokes Considering a Realistic Current Representation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 52, pp. 929-935, 2010.
- [26] A. C. S. Lima e C. Portela, "Inclusion of Frequency Dependent Soil Parameters in Transmission Line Modeling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 492-498, Janeiro 2007.
- [27] A. C. S. Lima, R. F. S. Dias e K. O. Salim, "An Open Framework for Lightning Performance of Overhead Transmission Lines," *XIV SIPDA*, 6 Outubro 2017.
- [28] J. Arrillaga e N. R. Watson, *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001.
- [29] R. H. Galloway, W. B. Shorrocks e L. M. Wedepohl, "Calculation of Electrical Parameters for Short and Long Polyphase Transmission Lines," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 111, pp. 2051-2059, 1964.
- [30] A. E. Kennelly, F. A. Laws e a. P. H. Pierce, "Experimental Researches on Skin Effect in Conduction," *AIEE Transactions*, pp. 1749-1814, 1915.
- [31] W. A. Lewis e P. D. Tuttle, "The Resistance and Reactance of Aluminum Conductors, Steel Reinforced," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III: Power Apparatus and Systems*, p. 1189-1214, 1958.
- [32] A. Semlyen e M. H. Abdel-Rahman, "Transmission line modelling by rational transfer functions," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 9, pp. 3576-3584, 1982.
- [33] L. M. Wedepohl e D. J. Wilcox, "Transient analysis of underground power-transmission system - System model and wave propagation characteristics," *Proceedings of IEE*, pp. 253-260, 1973.
- [34] J. R. Carson, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return," *Bell Systems Technical Journal*, pp. 539-554, 1926.
- [35] J. R. Wait, "Theory of Wave Propagation Along a Thin Wire Parallel to An Interface," *Radio Science*, vol. 7, pp. 675-679, 1972.

- [36] L. M. Wedepohl e A. E. Efthymiadis, "Wave Propagation in Transmission Lines Over Lossy Ground: A New, Complete Field Solution," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 125, pp. 505-510, 1978.
- [37] C. Gary, "Approche Complète de la Propagation Multifilaire en Haute Frèquence par Utilisation des Matrices Complexes," *EDF Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches-Série B*, pp. 5-20, 1976.
- [38] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen e A. Castanheira, "The Complex Ground Return Plane a Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. PAS-100, p. 3686–3693, 1981.
- [39] A. Semlyen e A. Deri, "Time domain modelling of frequency dependent three-phase transmission line impedance.," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 1549-1555, 1985.
- [40] P. Petterson, "Propagation of Waves on a Wire above a Lossy Ground - Different Formulations with Approximations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, pp. 1173-1180, 1999.
- [41] M. M. Y. Tomasevich e A. C. S. Lima, "Impact of Frequency-Dependent Soil Parameters in the Numerical Stability of Image Approximation-Based Line Models," *IEEE Transactions on Eletromagnetic Compatibility*, vol. 58, pp. 323-326, 2016.
- [42] M. M. Y. Tomasevich, *Viability Assessment of Transmission Line Models in Time And Frequency Domains (Tese de Doutorado)*, Rio de Janeiro, 2015.
- [43] M. Y. Tomasevich e A. C. S. Lima, "Investigation on the Limitation of Closed-Form Expressions for Wideband Modeling of Overhead Transmission Lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 130, pp. 113-123, 2016.
- [44] C. A. Jordan, "Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Ground Wires," *Gen. Electr. Rev.*, vol. 37, pp. 180-186, 1934.
- [45] C. F. Wagner e A. R. Hileman, "A new Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines III - A Simplified Method: Stroke to Tower," *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 79, pp. 589-603, 1960.
- [46] M. A. Sargent e M. Darveniza, "Tower Surge Impedance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. PAS-88, pp. 680-687, 1969.
- [47] W. A. Chisholm e Y. Chow, "Tavel Time of Transmission Towers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. PAS-104, pp. 2922-2928, 1985.
- [48] M. Ishii, E. Ohsaki, T. Kawamura, K. Murotani, T. Kouno e T. Higuchi, "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, pp. 1327-1335, 1991.
- [49] A. Ametani e T. Kawamura, "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 867-875, 2005.
- [50] R. A. R. Moura, *Tese de Doutorado. Representação de Linha de Transmissão com Geometria Não Uniforme para Estudos de Sobreensões Atmosféricas*, Rio de Janeiro, 2018.
- [51] W. A. Chisolm, Y. L. Chow e K. D. Srivastava, "Lightning Surge Response of Transmission Towers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n.

PAS-102, pp. 3232-3242, 1983.

- [52] IEEE Working Group Report, "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, pp. 1254-1267, 1993.
- [53] S. Visacro, "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, n. 1, Janeiro 2007.
- [54] R. Alipio e S. Visacro, "Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 716-723, Abril 2014.
- [55] L. V. Bewley, "Theory and Tests of the Counterpoise," *Electrical Engineering*, vol. 53, pp. 1163-1172, 1934.
- [56] E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, New York: Dover Publications, 1949.
- [57] C. Mazzetti e G. M. Veca, "Impulse Behavior of Ground Electrodes," *IEEE Transactions on power apparatus and systems*, n. PAS-102, pp. 3148-3156, 1983.
- [58] F. Dawalibi, "Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Conductors. Part I - Single Conductor. Part 2 - Ground Network," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 105-119, 1986.
- [59] L. Grcev, *Computation of Grounding System Transient Impedance. Tese de Doutorado*, Croácia: Universidade de Zagreb, 1986.
- [60] L. Grcev e F. Dawalibi, "An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, pp. 1773-1781, 1990.
- [61] S. Visacro, *Modelagem de Aterramentos Elétricos. Tese de Doutorado*, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1992.
- [62] S. Visacro e A. Soares Junior, "HEM: A Model for Simulation of Lightning-related Engineering Problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1206-1208, 2005.
- [63] R. S. Alípio, *Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e Frequência*, Belo Horizonte, 2008.
- [64] L. Grcev e M. Popov, "On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1598-1603, 2005.
- [65] L. D. Grcev, A. Kuhar, V. Arnautovski-Toseva e B. Markovski, "Evaluation of High-Frequency Circuit Models for Horizontal and Vertical Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, pp. 3065-3074, 2018.
- [66] J. He, Y. Gao, R. Zeng, J. Zou, X. Liang, B. Zhang, J. Lee e S. Chang, "Effective Length of Counterpoise Wire Under Lightning Current," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, n. 2, pp. 1585-1591, 2005.
- [67] J.-H. Choi, J.-H. Kim, B.-H. Lee e Y.-K. Chung, "An Analysis of Conventional Grounding Impedance Based on the Impulsive Current Distribution of a Counterpoise," *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP*, 2010.
- [68] V. Arnautovski-Toseva, L. Grcev e M. Kacarska, "High Frequency Grounding Study - Image and Transmission Line Models vs. Electromagnetic Model," *21st International Conference on Software, Telecommunications and Computer*

Networks-(SoftCOM 2013) IEEE, pp. 1-5, 2013.

- [69] S. Visacro e F. H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Methodology to Design Grounding Electrodes to Ensure an Expected Outage Rate," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, pp. 237-245, 2015.
- [70] S. Visacro e F. H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, pp. 1524-1532, 2016.
- [71] A. C. S. Lima, R. A. R. Moura, P. H. N. Vieira, M. A. O. Schroeder e M. T. C. Barros, "A Computational Improvement in Grounding Systems Transient Analysis," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, pp. 765-773, 2020.
- [72] L. D. Grcev, "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 815-823, 1996.
- [73] A. M. Mousa, "The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, pp. 1669-1677, 1994.
- [74] L. Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 441-451, Janeiro 2009.
- [75] S. Visacro e R. Alipio, "Frequency Dependence of Soil Parameters Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 927-935, 2012.
- [76] R. Alipio e S. Visacro, "Frequency Dependence of Soil Parameters: Effects on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, pp. 132-139, 2012.
- [77] R. L. Smith-Rose, "Electrical Measurements on Soil with Alternating Currents," *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, n. AP-75, pp. 221-237, 1934.
- [78] D. Cavka, N. Mora e F. Rachidi, "A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, pp. 177-187, 2014.
- [79] S. Visacro e C. M. Portela, "Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems," *Proceedings of Sym. High Voltage Engineering, Braunschweig, Alemanha*, 1987.
- [80] C. M. Portela, M. C. Tavares e J. Pissolato Filho, "Influence of a More Accurate Soil Representation in Electromagnetic Transient Phenomena," *Proceedings. International Conference on Power System Technology*, pp. 1426-1431, 2002.
- [81] S. Visacro e F. H. Silveira, "The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, pp. 434-441, Junho 2015.
- [82] D. J. Wilcox, "Numerical Laplace Transformation and Inversion," *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 15, pp. 247-265, 1978.
- [83] P. Moreno e A. Ramirez, "Implementation of the Numerical Laplace Transform: A Review," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 2599-2609, 2008.
- [84] A. Ramirez, P. Gomez, P. Moreno e A. Gutierrez, "Frequency Domain Analysis of Electromagnetic Transients through the Numerical Laplace Transform," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1136-1139, 2004.

- [85] P. Gómez e F. A. Uribe, "The Numerical Laplace Transform: An Accurate Technique for Analysing Electromagnetic Transients on Power System Devices," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, pp. 116-123, 2009.
- [86] L. M. Wedepohl, "Power System Transients: Errors incurred in the Numerical Inversion of the Laplace Transform," *Proc. of the 26th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1983.
- [87] IEEE, *Std 1243 Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, 1997.
- [88] Operador Nacional do Sistema, "Procedimentos de Rede. Submódulo 2.4 - Revisão 2.0 - Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão Aéreas," 2011.
- [89] R. L. Witzke e T. J. Bliss, "Surge Protection of Cable-Connected Equipment," *AIEE Transactions*, vol. 69, pp. 527-542, 1950.
- [90] R. O. Caldwell e M. D. Darveniza, "Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 92, pp. 1420-1428, 1973.
- [91] M. Darveniza e A. E. Vlastos, "The Generalized Integration Method for Predicting Impulse Volt-Time Characteristics for non-Standard Wave Shapes - a Theoretical Basis," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 23, pp. 373-381, 1988.
- [92] F. H. Silveira e S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, pp. 1186-1191, 2020.
- [93] A. J. Eriksson, "The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, n. PWRD-2, pp. 859-870, 1987.
- [94] V. R. A. R. Lima, "PRTL-mHEM - A Tool for Lightning Flash Performance," Julho 2020. [Online]. Available: <https://github.com/VitorLima1990/PRTL-mHEM/releases/tag/v1.0> DOI: 10.5281/zenodo.3924693.
- [95] Python Software Foundation, "About Python | Python.org," [Online]. Available: <https://www.python.org/about/>. [Acesso em 10 Abril 2020].
- [96] M. Weisfeld, *The Object-Oriented Thought Process*, Addison-Wesley, 2019.
- [97] I. A. Metwally e F. H. Heidler, "Improvement of the Lightning Shielding Performance of Overhead Transmission Lines by Passive Shield Wires," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, 2003.
- [98] T. Thanasaksiri, "Improving the Lightning Performance of Overhead Lines Applying Additional Underbuilt Shield Wire," 2013.
- [99] R. J. Harrington e M. Mueen, "A Simple Approach to Improve Lightning Performance of an Uprated Substation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1633-1639, Julho 1996.
- [100] S. Visacro, F. H. Silveira e A. D. Conti, "The Use of Underbuilt Wires to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, 2011.
- [101] N. V. Ninh, T. Pham e T. V. Tran, "A Method to Improve Lightning Performance of Transmission Lines in High Footing Resistance Areas," *Conference Proceedings of ISEIM*, pp. 761-764, 2017.
- [102] R. Araneo, G. Lovat, S. Celozzi, J. B. Faria, A. Andreotti e L. Verolino, "Improvement of Lightning Performance of Overhead Power Lines by Addition of

Underbuilt Ground Wires,” 2018.

- [103] F. Koehler e J. Swingler, “Analysis of Flashover Mitigation Measures to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines,” 2018.
- [104] F. Dawalibi e D. Mukhedkar, “Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure. Parts I, II and III.,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. PAS-94, pp. 252-272, 1975.
- [105] R. J. Heppe, “Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. PAS-98, pp. 1978-1989, 1979.
- [106] B. P. Gupta e B. Thapar, “Impulse Impedance of Grounding Grids,” *IEEE Transactions Power Application Systems*, vol. 99, n. 6, pp. 2357-2362, 1980.

APÊNDICE A. ARQUIVOS DE DADOS DE ENTRADA DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL *PRTL-mHEM*

A.1 Inserção da Disposição Geométrica da Estrutura Metálica

O arquivo de entrada de dados que define a disposição geométrica dos cabos condutores e para-raios nas estruturas metálicas é apresentado a seguir. O exemplo abaixo contempla a estrutura de 230 kV, circuito duplo, considerando a utilização do para-raios *Underbuilt*, utilizada nas simulações realizadas no Capítulo 5 desta dissertação.

```
STRUCTURE FILE INPUT DATA
INSTRUCTIONS:
1)X, Y, SAG, RADIUS AND SPACING VALUES IN METER
2)Y VALUES ARE THE CABLE VERTICAL DISTANCES TO THE GROUND ON THE TOWER
3)CORE STANDS FOR THE CORE RADIUS OF THE CABLE. FOR HOMOGENEOUS CABLE INSERT 0.
4)RDC IS THE CABLE DC RESISTANCE IN OHM/METER
5)N IS THE NUMBER OF CABLES PER PHASE
6)BUNDLE_ANGLE IS THE ANGLE BETWEEN THE FIRST SUBCONDUCTOR OF THE BUNDLE AND THE
HORIZONTAL AXIS. FOR SINGLE CONDUCTORS INSERT 0.
7)DESCRIPTION CAN BE "PHASE", "GW" (GROUND WIRE) OR "UNDERBUILT"

START INPUT DATA
TITLE: ESTRUTURA TESTE 230 kV CD
  X      Y      SAG      RADIUS CORE  N SPACING  BUNDLE_ANGLE      RDC DESCRIPTION
-4.0  37.35  17.85  0.013265  0  1      0      0  0.00007998  PHASE
-4.0  31.35  17.85  0.013265  0  1      0      0  0.00007998  PHASE
-4.0  25.35  17.85  0.013265  0  1      0      0  0.00007998  PHASE
  4.0  25.35  17.85  0.013265  0  1      0      0  0.00007998  PHASE
  4.0  31.35  17.85  0.013265  0  1      0      0  0.00007998  PHASE
  4.0  37.35  17.85  0.013265  0  1      0      0  0.00007998  PHASE
-4.5  42.05  14.63  0.004570  0  1      0      0  0.00419     GW
  4.5  42.05  14.63  0.004570  0  1      0      0  0.00419     GW
  0.0  24.85  14.63  0.004570  0  1      0      0  0.00419     UNDERBUILT
END USER INPUT DATA
```

A.2 Inserção dos Dados da Simulação

Um exemplo do arquivo de entrada de dados que define os parâmetros desejados para a simulação é apresentado a seguir.

```
BASIC INPUT FILE DATA
TITLE: TESTING 138 kV SIMULATION
SPEED OF LIGHT (IN METER/SECONDS) [c]: 300000000
RELATIVE PERMITTIVITY [Er]: 10
GROUND CONDUCTIVITY (IN S/METERS): 0.00025
SPAN LENGHT (IN METERS): 400
TERMINAL SPAN LENGHT (IN METERS): 10000
SIMULATION TIME (IN SECONDS): 0.000100
NUMBER OF FREQUENCY SAMPLES: 512
IMPEDANCES VALUES IN OHMS USED FOR THE TOWER CASCADE MODEL. FROM THE TOWER TOP TO
BOTTOM, INSERT FOUR VALUES SEPARATED BY COMMA (LEAVE IT BLANK FOR USING RECOMMENDED
VALUES): 130,240,240,290

GROUND MODEL CALCULATION
CONSTANT GROUND RESISTANCE VALUE (LEAVE IT BLANK FOR FREQUENCY DEPENDENT GROUND
MODEL):
PREVIOUSLY CALCULATED INPUT FREQUENCY DEPENDENT GROUND MODEL FILENAME (LEAVE IT
BLANK FOR A NEW CALCULATION):
SOIL PARAMETERS FREQUENCY DEPENDENT MODEL (NONE, GROUND ONLY OR FULL MODE): FULL
MODE
OUTPUT FREQUENCY DEPENDENT GROUND MODEL FILENAME (LEAVE IT BLANK IF YOU DO NOT WANT
TO SAVE):

OUTAGES CALCULATION DATA
CALCULATE FLASHOVER RATE (YES OR NO): YES
TIME CONSIDERED FOR OUTRAGES CALCULATION (IN SECONDS): 0.000040
ARC DISTANCE (m): 2.19
CRITICAL FLASHOVER (LEAVE IT BLANK FOR A NEW CALCULATION) (kV): 1000
THUNDER DAYS IN A YEAR (OR FILL THE GROUND FLASH DENSITY BELOW): 77
GROUND FLASH DENSITY (OR FILL THE THUNDER DAYS IN A YEAR ABOVE):
```

A.3 Inserção da Disposição Geométrica dos Cabos Contrapesos

O arquivo de entrada de dados que define a disposição geométrica dos cabos contrapesos no sistema de aterramento é apresentado a seguir. O exemplo abaixo representa a disposição do arranjo convencional de cabos contrapesos, com comprimento total de 120 metros, apresentado na Figura 5.2-3.

```
GROUND ELECTRODES FILE INPUT DATA
INSTRUCTIONS:
1)Xi, Yi, Zi, Xf, Yf, Zf, DIAMETER VALUES IN METER
2)Zi AND Zf NEGATIVE VALUES ARE RELATED TO BURIED GROUND ELECTRODES
3)INSERT "I" WHERE THE CURRENT INJECTION IS PLACED ON THE GROUND ELECTRODES. THE
INJECTION POINT CONSIDERED IS THE Xi, Yi, Zi.
4)THE PROGRAM WILL CALCULATE THE IDEAL SEGMENTATION LENGTH OF THE GROUND ELECTRODES
IF THE SEGMENTATION LENGHT IS NOT PROVIDED BELOW

START INPUT DATA
TITLE: CONVENTIONAL GROUND ELECTRODES CONFIGURATION
SEGMENTATION LENGTH (IN METERS):
      Xi      Yi      Zi      Xf      Yf      Zf      DIAMETER  INJECTION
      5.0      5.0     -0.8   12.0711  12.0711  -0.8    0.00914    I
12.0711  12.0711  -0.8   32.0711  12.0711  -0.8    0.00914
      5.0     -5.0     -0.8   12.0711 -12.0711  -0.8    0.00914    I
12.0711 -12.0711 -0.8   32.0711 -12.0711 -0.8    0.00914
      -5.0      5.0     -0.8  -12.0711  12.0711  -0.8    0.00914    I
-12.0711  12.0711 -0.8  -32.0711  12.0711  -0.8    0.00914
      -5.0     -5.0     -0.8  -12.0711 -12.0711  -0.8    0.00914    I
-12.0711 -12.0711 -0.8  -32.0711 -12.0711  -0.8    0.00914
END USER INPUT DATA
```