

### PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# INVESTIGAÇÃO DO USO DE PARA-RAIOS PARA PROTEÇÃO DE CABOS SUBTERRÂNEOS SUBMETIDOS A SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

Aluno: Thiago Veloso GomesOrientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de O. SchroederCo-orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

São João del-Rei, Maio de 2016.



### PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

# INVESTIGAÇÃO DO USO DE PARA-RAIOS PARA PROTEÇÃO DE CABOS SUBTERRÂNEOS SUBMETIDOS A SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

por

## Thiago Veloso Gomes

Texto da Dissertação de Mestrado submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Linha de pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado

Aluno: Thiago Veloso Gomes Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

São João del-Rei, Maio de 2016.

Dedico este trabalho ao meu querido irmão, Dr. Isaac Veloso Gomes, guerreiro bravo e solitário, modelo de resiliência, dedicação e obstinação.

### AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, pois DELE nunca me faltou nada.

Também aos meus pais, Vicente Gomes e Marli Veloso Gomes, pois deles sempre tive o amor e o exemplo, transmitidos por meio de muita orientação, suporte e sacrifício.

Ao meu irmão, Engenheiro Matheus Veloso Gomes, pela amizade incondicional.

Ao meu querido irmão, Doutor Isaac Veloso Gomes. Sua resiliência e obstinação nunca serão esquecidos e sempre serão modelos em minha vida.

Ao amigo Samir Martins, irmão que a vida me deu, pela amizade cristã e pela experiência adquirida nas conversas sempre edificadoras ao longo dos anos.

A querida Alessandra Hamasaki, por todo o apoio e conselho dado desde o início deste trabalho.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Marco Aurélio Schroeder, pela amizade, aprendizado, amadurecimento e todo apoio dado durante este projeto.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Rafael Alípio, pelo grande apoio prestado durante o desenvolvimento deste e de outros trabalhos.

Ao coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSJ, Professor Leonidas Chaves de Resende e sua secretária, Mauricéia Yagi, pela presteza e boa vontade sempre quando necessário.

A FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

A todos os amigos, de todos os tempos e lugares, que por limitação de espaço, não pude citar aqui. Vocês estão sempre comigo!

AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	xi
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Relevância e contextualização	1
1.2 - Objetivo	4
1.3 - Estrutura da Dissertação	5
CAPÍTULO 2 - ESTUDO DO ESTADO DA ARTE	7
2.1 - Descargas atmosféricas	7
2.1.1 - Caracterização das descargas atmosféricas	7
2.1.2 - Características da corrente de retorno	8
2.1.3 - Efeitos da incidência direta da descarga em uma linha de transmissão .	11
2.2 - Modelagem da corrente de descarga	16
2.2.1 - Introdução	16
2.2.2 - Forma de onda do tipo dupla rampa	16
2.2.3 - Forma de onda do tipo dupla exponencial	17
2.2.4 - Forma de onda do tipo curva de Heidler	18
2.3 - Modelagem de Linhas de Transmissão	20
2.3.1 - Introdução	20
2.3.2 - Modelagem de Linhas de Transmissão	20
2.3.3 - Modelo para linha de transmissão curta	21
2.3.4 - Modelo para linha de transmissão média	21
2.3.5 - Modelos a parâmetros distribuídos (Modelo de Bergeron)	23
2.3.6 - Modelo a parâmetros variantes com a frequência (Modelo de J. Marti)	26
2.4 - Modelagem das Torres de Transmissão	30
2.4.1 - Introdução	30
2.4.2 - Altura da torre	30
2.4.3 - Impedância de surto da torre de transmissão	31
2.4.4 – Modelagem da impedância de aterramento das torres de transmissão.	32
2.5 - Modelagem dos Para-Raios	35
2.5.1 - Introdução	35

# SUMÁRIO

2.5.2 - Modelo IEEE	37
2.5.3 - Modelo de Pinceti e Giannettoni (Modelo Simplificado)	39
2.5.4 - Modelo de Fernández e Díaz	41
2.6 - Subestações	44
2.6.1 - Introdução	44
2.6.2 - Barramentos, condutores e cabos	45
2.6.3 - Disjuntores, transformadores de potência e transformadores de instrumentação e demais equipamentos	45
2.6.4 - Isoladores e suportes de barramentos	46
2.7 - Requisitos para coordenação de isolamento	47
2.8 - Programa de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTP	51
CAPÍTULO 3 - RESULTADOS	54
3.1 - Introdução	54
3.2 - Definição do Problema	54
3.3 - Casos Estudados	60
3.4 - Implementação no ATP	61
3.4.1 - Modelagem da Descarga Atmosférica	61
3.4.2 - Modelagem da Linha Aérea	63
3.4.3 - Modelagem dos Cabos Subterrâneos	63
3.4.4 - Modelagem da Subestação	64
3.4.5 - Modelagem das Torres de Transmissão e Aterramentos	65
3.4.6 - Modelagem dos Para-raios ZnO	65
3.4.7 - Aspectos finais referentes às simulações no ATP	69
3.5 – Investigação das solicitações dielétricas sobre o sistema	71
3.5.1 - Investigação da solicitação dielétrica sobre os cabos subterrâneos de ocorrência de falha de blindagem e consequente descarga direta sobre o co da fase A	evido à Indutor 71
3.5.2 - Investigação da solicitação dielétrica sobre os cabos subterrâneos de descarga direta sobre o cabo para-raios e ocorrência de backflashover	∍vido à 84
3.6 - Discussão dos resultados	96
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	107
4.1 - Discussões finais	107
4.2 - Propostas de continuidade	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

#### RESUMO

Descargas atmosféricas são a principal causa de curtos-circuitos e de desligamentos das linhas de transmissão em todo o mundo. No Brasil, essa realidade pode se agravar, pois a densidade de ocorrências de descargas atmosféricas tende a ser mais elevada e suas características medianas podem ser mais agressivas, principalmente em relação a países localizados nas zonas temperadas. O efeito nefasto da incidência de descargas atmosféricas sobre o sistema elétrico pode ser ainda mais destrutivo quando há presença de seções subterrâneas na linha de transmissão. O uso de seções subterrâneas tem se tornado cada vez mais frequente em grandes centros urbanos. Seu uso caracteriza grande descontinuidade na impedância de surto da linha, que intensifica as sobretensões atmosféricas sobre o isolamento dos cabos subterrâneos, o que pode ocasionar a redução da confiabilidade e segurança da linha. O objetivo deste trabalho é investigar as solicitações dielétricas sobre os cabos isolados que constituem a seção subterrânea de uma linha de 138 kV, no sentido de se determinar a melhor forma de mitigação de seus efeitos danosos, baseado no uso de para-raios de óxido de zinco. Esse estudo leva em consideração a alta resistividade do solo brasileiro e os critérios utilizados no Brasil para determinação do valor da resistência de aterramento de torres de transmissão e para-raios. Para tal, são investigadas incidências diretas de primeira descarga e descarga subsequente negativa de retorno sobre condutores fase e sobre o cabo para-raios. Também são analisados resultados gerados por diferentes modelos de para-raios. A proteção é considerada satisfatória se uma margem de segurança mínima de 15% do Nível Básico de Isolamento (NBI), cujo valor é 650 kV, é atendido. Os resultados mostram que as máximas solicitações dielétricas ocorrem devido à incidência direta da primeira descarga de retorno sobre os condutores fase. A incidência de descarga subsequente também supera a margem de seguranca do isolamento da secão subterrânea, em todas as fases da linha. Primeiras descargas de retorno sobre o cabo para-raios podem eventualmente superar essa margem. Descargas subsequentes sobre o cabo-para raios não produzem solicitações dielétricas superiores à margem de seguranca sobre os cabos subterrâneos. Nota-se uma intensa influência dos pontos de descontinuidade decorrentes da resistência de aterramento das torres e dos para-raios, no processo de reflexão das ondas de tensão e corrente, o que majora significativamente as solicitações dielétricas sobre as isolações do sistema, inclusive sobre os cabos subterrâneos. Tal fato dificulta a atenuação efetiva das sobretensões atmosféricas sobre esses cabos. A dificultade de redução do valor da resistência de aterramento conduziu à necessidade de implementação de medidas complementares de mitigação das solicitações dielétricas sobre a seção subterrânea. Nesse sentido, foi necessário utilizar para-raios nas duas extremidades da seção subterrânea e, também, na torre de transmissão anterior à junção dos cabos subterrâneos com a linha aérea. Também, foi preciso estender o comprimento da seção subterrânea, para que a margem mínima de segurança dos isolamentos dos cabos fosse atendida. Entretanto, essas medidas representam custos adicionais, o que pode levar à inviabilidade de sua implantação. Tal fato ressalta a importância crucial da redução do valor da resistência de aterramento, para assegurar uma vigorosa atenuação das sobretensões sobre os cabos subterrâneos e sobre o sistema como um todo.

Palavras-chave: Descarga atmosférica, cabos subterrâneos, coordenação de isolamento, pararaios de óxido de zinco, sobretensão atmosférica, Nível Básico de Isolação.

### ABSTRACT

Lightning strikes are the main cause of short circuits and shutdown on transmission lines around the world. In Brazil, this situation can be aggravated because the density of lightning occurrence tends to be higher and their medians features can be more aggressive, especially in relation to countries located in temperate zones. The detrimental effect of lightning incidence on the electric system can be further destructive when there is presence of underground sections in the transmission line. The use of underground sections has become increasingly common in large urban centers. Its use features large discontinuity in the line surge impedance, which intensifies the lightning overvoltages on the insulation of the underground cables, which can lead to reduced reliability and safety of the line. The objective of this study is to investigate the dielectric request on insulated cables that constitute the underground section of a 138 kV line, in order to determine the best way to mitigate its harmful effects, based on the use of Metal-oxide surge arresters. This study takes into account the high resistivity of the Brazilian soil and the criteria used in Brazil to determine the value of towers and arresters grounding resistance. In this way, direct negative first and subsequent return strokes on phase conductor and shield wires are investigated. They are also analyzed results generated by different models of surge arresters. The protection is considered satisfactory if a minimum safety margin of 15% of the 650 kV Basic Insulation Level (BIL) is met. The results show that the maximum dielectric request is due to direct incidence of the first return discharge on the phase conductors. The incidence of subsequent discharge also overcomes the safety margin of the underground section insulation. First return discharge on the shield wire can eventually overcome that margin. Subsequent discharges over the shield wire do not produce dielectric requests that exceed the safety margin of the underground cables. It can be seen a strong influence of discontinuity points due to the grounding resistance of towers and arresters on reflection of voltages and current waves, which significantly elevate the dielectric request in the insulations of the system, including underground cables. This fact complicates the effective mitigation of lightning voltages on these cables. The difficulty of reducing the grounding resistance value led to the need for complementary measures to mitigate dielectric requests on the underground section. Thus, it was necessary to install surge arresters at the both underground section joints and also at the tower before the underground cables joint with the overhead line. It was also necessary to extend the length of the underground section, so that the minimum safety margin of insulation was met. However, these measures represent additional costs, which can lead to the impossibility of its implementation. This fact highlights the importance of reducing the grounding resistance value, to guarantee vigorous surge attenuation on the underground cables and the entire system.

Key words: Lightning strike, underground cables, insulation coordination, metal-oxide surge arrester, atmospheric overvoltage, Basic Insulation Level.

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ruptura de Isolamento por flashover. (Adaptado de: Visacro, 2005.)12
Figura 2.2: Ruptura de Isolamento por backflashover. (Fonte: Visacro, 2005)13
Figura 2.3: Determinação da onda resultante no topo da torre
Figura 2.4: Forma de onda do tipo dupla rampa17
Figura 2.5: Onda dupla exponencial18
Figura 2.6: Forma de onda do tipo Heidler19
Figura 2.7: Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta21
Figura 2.8: Circuito $\pi$ -nominal de uma linha de transmissão média22
Figura 2.9: Modelo à parâmetros distribuídos23
Figura 2.10: Circuito equivalente do modelo a parâmetros distribuídos de uma linha sem perdas25
Figura 2.11: Circuito equivalente do modelo de J. Marti para uma linha polifásica (domínio da frequência) (Fonte: Araújo e Neves, 2005)28
Figura 2.12: Esquema típico de aterramento de uma torre de transmissão32
Figura 2.13: Variação do módulo e fase da impedância de aterramento em função da frequência (Fonte: Alípio et al., 2008)
Figura 2.14: Curvas de impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo para diferentes solos e corrente impulsiva de 1,2/20 µs (Fonte: Alípio, 2008)
Figura 2.15 : Característica V-I não linear de para-raios de óxido de zinco (ZnO) e de carboneto de silício (SiC) (Fonte: Martinez-Velasco e Castro-Aranda, 2010)36
Figura 2.16: Circuito equivalente do modelo dependente da frequência do IEEE (Fonte: IEEE Working Group 3.4.11, 1992)
Figura 2.17: Característica não linear das resistências A0 e A1 (Fonte: IEEE Working Group 3.4.11, 1992)
Figura 2.18: Circuito equivalente do modelo simplificado (Fonte: Pinceti e Giannettoni, 1999)
Figura 2.19: Circuito equivalente do modelo de Fernandez e Diaz
Figura 2.20: Curvas de seleção de L1, para elementos de corrente nominal de 10 kA. (Fonte: Fernandez e Diaz, 2001)42
Figura 2.21: Dedução do circuito equivalente de um para raios ZnO completo. (Adaptado de Fernandez e Diaz, 2001)43
Figura 2.22: Representação de disjuntores. (a) Tanque morto; (b) Tanque vivo. (Adaptado de: Imece et al., 1996)45
Figura 3.1: Diagrama do sistema de 138 kV em estudo54
Figura 3.2: Geometria da torre metálica autoportante de 138 kV, circuito simples56

Figura 3.3: Perfil da seção subterrânea do sistema em estudo (medidas em milímetros)
Figura 3.4: Descrição das camadas que constituem o cabo isolado 138 kV58
Figura 3.5: Representação esquemática da torre de transmissão, conforme De conti et al. (2006), onde $Zeq1 > Zeq2 > Zeq3 > Zeq4$ e v = 2,4 × 108 ms
Figura 3.6: Forma de onda de corrente de retorno de primeira descarga, obtida no ATP62
Figura 3.7: Forma de onda de corrente de retorno de descargas subsequentes, obtida no ATP62
Figura 3.8: Circuitos equivalentes do: (a) transformador de potência e; (b) do disjuntor de potência, para sistema 138 kV
Figura 3.9: Circuito implementado no ATP para validação do modelo IEEE 66
Figura 3.10: Tensão residual sobre o para-raios conforme modelo IEEE67
Figura 3.11: Circuito implementado no ATP para validação do modelo de Pinceti68
Figura 3.12: Tensão residual sobre o para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.13: Circuito implementado no ATP para investigação da incidência da descarga em condutor fase e ocorrência de flashover71
Figura 3.14: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A
Figura 3.15: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A72
Figura 3.16: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores73
Figura 3.17: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores
Figura 3.18: Circuito referente implementação do caso 1.2, conforme modelo IEEE74
Figura 3.19: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE. 75
Figura 3.20: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE
Figura 3.21: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência de primeira descarga de retorno na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores
Figura 3.22: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência de descarga subsequente na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores
Figura 3.23: Circuito referente implementação do caso 1.3, conforme modelo IEEE77
Figura 3.24: Tensões residuais para o caso 1.3, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE. 78
Figura 3.25: Tensões residuais para o caso 1.3, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE

Figura 3.26: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação, conforme modelo de Pinceti
Figura 3.27: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.28: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti80
Figura 3.29: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência de primeira descarga de retorno na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores
Figura 3.30: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência de descarga subsequente na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores
Figura 3.31: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação e na junção com a linha aérea, conforme modelo de Pinceti
Figura 3.32: Tensões residuais para o caso 1.5, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.33: Tensões residuais para o caso 1.5, devido a incidência de uma descarga subsequente na Fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti83
Figura 3.34: Circuito implementado no ATP para investigação da incidência de descarga no cabo para-raios e da ocorrência de backflashover, nas torres 1, 2 e 384
Figura 3.35: Sobretensão atmosférica sobre as cadeias de isoladores da torre 1, devido à primeira descarga85
Figura 3.36: Sobretensões nos condutores das fases A, B e C, para o caso 2.1, devido à primeira descarga de retorno85
Figura 3.37: Sobretensão atmosférica sobre as cadeias de isoladores da torre 1, devido à descarga subsequente87
Figura 3.38: Sobretensões nos condutores das fases A, B e C, para o caso 2.1, devido à descarga subsequente
Figura 3.39: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação, conforme modelo IEEE
Figura 3.40: Tensões residuais para o caso 2.2, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.89
Figura 3.41: Tensões residuais para o caso 2.2, devido a incidência de descarga subsequente na Fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE89
Figura 3.42: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação e na junção com linha aérea, conforme modelo IEEE
Figura 3.43: Tensões residuais para o caso 2.3, devido a incidência da primeira descarga de retorno no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE91

Figura 3.44: Tensões residuais para o caso 2.3, devido a incidência de descarga subsequente no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE. 
Figura 3.45: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação, conforme modelo de Pinceti
Figura 3.46: Tensões residuais para o caso 2.4, devido a incidência da primeira descarga de retorno no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.47: Tensões residuais para o caso 2.4, devido a incidência de descarga subsequente no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.48: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação e na junção com linha aérea, conforme modelo de Pinceti
Figura 3.49: Tensões residuais para o caso 2.5, devido a incidência da primeira descarga de retorno no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.50: Tensões residuais para o caso 2.5, devido a incidência de descarga subsequente no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti
Figura 3.51: Variação da sobretensão na fase A (caso 1.1) e na fase C (caso 2.1), em função do comprimento da seção subterrânea, para incidência de primeira descarga de retorno
Figura 3.52: Variação da sobretensão na fase A (caso 1.1) e na fase C (caso 2.1), em função do valor da resistência de aterramento, para incidência de primeira descarga de retorno

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Principais índices de densidade de descargas atmosféricas (Fonte:Visacro, 2005)1
Tabela 2.1: Parâmetros para ondas do tipo dupla exponencial (Fonte: Salari Filho, 2006)
Tabela 2.2: Valores de $A_0$ e $A_1$ , referentes a Figura 2.17. (Fonte: IEEE Working Group 3.4.11, 1992)
Tabela 2.3: Valores de A <sub>0</sub> e A <sub>1</sub> , referentes a Figura 2.18. (Fonte: Pinceti e Giannettoni,1999).40
Tabela 2.4: Tensão residual e erro relativo para cada modelo. (Fonte: Christodoulou etal. 2008).44
Tabela 2.5: Valores mínimos de capacitância a serem utilizados para estudos de descargas atmosféricas. (Adaptado de: Imece <i>et al.</i> , 1996)46
Tabela 2.6: Valores de pico, em kV, normalizados para as tensões suportáveis nominais de impulso (Adaptado de IEC, 2010)48
Tabela 2.7: Nível de isolamento padrão para sistemas de alta tensão (Adaptado de IEC, 2006)
Tabela 2.8: Valores de pico, em kV, normalizados para as tensões suportáveis nominais de impulso (Adaptado de IEEE, 2010)50
Tabela 2.9: Tensão nominal suportável a impulso atmosférico para sistemas de alta tensão (Adaptado IEEE, 2010)
Tabela 3.1: Parâmetros referentes à forma de onda de corrente de retorno de primeiradescarga.55
Tabela 3.2: Parâmetros referentes à forma de onda de corrente de retorno de primeiradescarga subsequente.55
Tabela 3.3: Configuração dos condutores fase e para-raios56
Tabela 3.4: Dados referentes aos condutores utilizados no sistema em estudo 57
Tabela 3.5: Dados construtivos do condutor utilizado para implementação da linha aérea
Tabela 3.6: Dados construtivos do cabo isolado utilizado na seção subterrânea 57
Tabela 3.7: Comprimento e impedância de surto de cada segmento da torre, conformeDe Conti et al., (2006)
Tabela 3.8: Especificação do para-raios de óxido de zinco utilizado no sistema 60
Tabela 3.9: Relação dos casos investigados61
Tabela 3.10: Parâmetros utilizados para modelagem da linha aérea
Tabela 3.11: Parâmetros utilizados para modelagem da rede subterrânea64

Tabela 3.12: Característica V-I de A <sub>0</sub> e A <sub>1</sub> utilizada para implementação das resistências não lineares do circuito equivalente IEEE66
Tabela 3.13: Valores utilizados para ajuste dos parâmetros do circuito equivalente domodelo IEEE.66
Tabela 3.14: Característica V-I de A₀ e A₁ utilizada para implementação das resistências não lineares do circuito equivalente de Pinceti
Tabela 3.15: Valores utilizados para ajuste dos parâmetros do circuito equivalente do modelo de Pinceti
Tabela 3.16: Comparativo das sobretensões atmosféricas referente à falha de blindagem e ocorrência de primeira descarga na fase A, com e sem a presença das cadeias de isoladores
Tabela 3.17: Comparativo das sobretensões atmosféricas referente à falha de blindagem e ocorrência de primeira descarga na fase A, com e sem a presença das cadeias de isoladores
Tabela 3.18: Resumo das sobretensões obtidas para primeira descarga de retorno98
Tabela 3.19: Resumo das sobretensões obtidas para descarga subsequente 100
Tabela 3.20: Comparação percentual entre os resultados produzidos pelos modelos IEEE e de Pinceti
Tabela 3.21: Energia absorvida pelos para-raios

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

#### 1.1 - Relevância e contextualização

A descarga atmosférica consiste em uma intensa descarga elétrica que ocorre na atmosfera. Este fenômeno se caracteríza por meio do fluxo intenso e de curta duração de uma corrente elétrica impulsiva que pode ocorrer dentro de uma nuvem, entre nuvens e entre uma nuvem e o solo (Visacro, 2005).

As descargas entre nuvem e solo são o fator determinante para definição do isolamento de equipamentos e de materiais de média e alta tensão. Já para níveis de tensão de linha acima de 345 kV, o isolamento é definido pelas sobretensões de manobra do sistema (Portela, 1982). De forma geral, para níveis de tensão cada vez maiores, a influência das descargas atmosféricas se torna cada vez menor, porém sua importância deve ser sempre levada em consideração (Portela, 1979).

A importância das descargas atmosféricas se verifica ao se notar que essa é, em geral, a principal causa de ocorrência de curtos-circuitos e de desligamentos das linhas de transmissão e distribuição em todo o mundo (Salari Filho, 2006). No Brasil, esse fenômeno pode ser especialmente importante, pois os valores médios de densidade de descargas atmosféricas tendem a ser elevados, principalmente em relação a países localizados nas zonas temperadas (Visacro, 2005). Além disso, o solo brasileiro em geral possui características bastante desfavoráveis. A Tabela 1.1 apresenta alguns índices típicos de descargas atmosféricas em algumas partes do mundo.

Local	Índices típicos de descargas (Desc./km²/ano)
Alemanha	1-1,5
Áustria	~1,5 (1 - 6)
França	~1,7 (0,5 - 5)
Itália	~1,5 (1 - 5)
Austrália	0,2 - 4,0
África do Sul	~4,0 (0,5 - 14)
Estados Unidos	~2,0 (0,1 - 14)
México	1,0 - 10,0
Brasil	4,0 (1,0 - 12)

Tabela 1.1: Principais índices de densidade de descargas atmosféricas (Fonte: Visacro, 2005).

Já ao considerar determinadas regiões do Brasil, como o estado de Minas Gerais, essa densidade de descargas atmosféricas se torna ainda mais elevada, podendo chegar a 12 descargas/km<sup>2</sup>/ano. Além disso, tem-se menção de que 30 % dos desligamentos nas linhas de distribuição de 13,8 kV sejam causados por ocorrência de descargas atmosféricas, que por sua vez são causa de pelo menos 70 % dos desligamentos em linhas de transmissão de até 230 kV (Carvalho et al., 1997). Esses números tornam ainda mais importante o desenvolvimento de equipamentos e métodos de proteção cada vez mais eficientes, no sentido de prevenir os efeitos destrutivos das descargas atmosféricas em um sistema elétrico.

Com relação aos estudos de proteção do sistema contra descargas atmosféricas, é importante conhecer suas formas de inicidência no sistema de transmissão. A primeira delas é aquela que ocorre nas proximidades da linha. Nesse caso, a descarga elétrica atua como fonte de campo eletromagnético, que induz uma tensão na linha proporcional à magnitude e à taxa de crescimento da corrente de descarga. Diz-se então que a linha é "iluminada" por esse campo. Neste caso o pico de sobretensão pode chegar a algumas centenas de quilovolts, o que pode causar ruptura de isolamento na linha (Visacro, 2005). No entanto, esse tipo de ocorrência é mais preocupante quando se trata de sistemas de baixa e média tensão (Silveira, 2006), não sendo abordada nesse trabalho. Já no caso de incidência direta de descargas no sistema elétrico, existem três mecanismos básicos de ruptura do isolamento no sistema. A primeira delas é o flashover, referente à ruptura de isolamento por incidência direta da descarga atmosférica em algum dos condutores de fase da linha. A segunda é referente à ruptura de isolamento da linha causada por incidência direta da descarga nos cabos de blindagem. Esse processo recebe o nome de backflashover. Já a terceira forma de ocorrência é a ruptura que ocorre a meio de vão, também decorrente da incidência da descarga em cabos de blindagem. Todos esses mecanismos são tratados com mais detalhes no decorrer deste trabalho.

A corrente devida à descarga atmosférica, chamada de corrente de retorno, que incide em uma linha de transmissão aérea, se divide aproximadamente em duas parcelas iguais à metade do valor inicial (Bewley, 1929). Para cada lado da linha propaga uma dessas ondas de corrente. Essas, por sua vez, possuem característica impulsiva e, portanto, tratam-se de fenômenos de alta frequência. Nesse caso, a linha é caracterizada por sua impedância de surto, que associa o pico da onda de tensão ao pico de onda de corrente, por meio da relação  $V_p = Z_s \cdot I_p$ , onde o índice "p" indica o valor de pico. Devido a isso, a magnitude destas ondas de tensão e corrente ainda pode sofrer atenuações ou amplificações, geradas pelo processo de reflexão dessas

ondas em pontos do sistema onde ocorre descontinuidade do valor da impedância de surto. Este fenômeno ocorre até que toda a energia do impulso seja absorvida pelos elementos do sistema (Visacro, 2005).

Um exemplo de ocorrência desse tipo de descontinuidade é quando são utilizados cabos isolados em trechos específicos de uma linha de transmissão. Em diversos países, inclusive no Brasil, o uso de cabos isolados para construção de redes subterrâneas em conjunto com linhas aéreas tem se tornado cada vez mais presente (Puffer et al., 2014). Cabos desse tipo têm como característica a baixa impedância de surto, comparada com a impedância de surto de linhas aéreas e, devido a isso, a junção de ambas representa uma grande descontinuidade na impedância de surto do sistema, o que pode intensificar o efeito nefasto da incidência de uma descarga atmosférica na linha de transmissão aérea. Aplicações deste tipo têm recebido especial atenção de pesquisadores em diversos países (Wedepohl e Wilcox, 1973; Ametani, 1980; Morched et al., 1999; Gustavsen et al., 2005; Puffer et. Al, 2014), devido a expectativas quanto a problemas de sobretensões transitórias induzidas nos condutores de sistemas subterrâneos sujeitos a descargas atmosféricas, surtos de manobra e falhas de isolamento. Devido a isso, estudos acerca do desenvolvimento de novas técnicas de proteção de sistemas elétricos por meio do uso de para-raios têm sido realizados em diversas partes do mundo (Dang et al., 1986; IEEE, 1997; Martinez e Durbak, 2005; Puffer et al., 2014).

O equipamento capaz de atenuar as sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas em linhas de transmissão é o para-raios. Este dispositivo é instalado em paralelo com o aparato a ser protegido e tem como característica principal proporcionar uma baixa resistência na presença de uma sobretensão e de limitar vários tipos de transitórios de tensão a valores abaixo dos níveis de isolação do aparato (Martinez-Velasco, 2010), inclusive transitórios decorrentes de descargas atmosféricas. O para-raios atua como um circuito fechado na presença de sobretensões e como um circuito aberto em caso de operação normal do sistema. Dessa forma, a sua característica tensão-corrente (V-I) deve ser não linear. Em sistemas de alta tensão, são utilizados para-raios de óxido de zinco (ZnO), que possuem característica V-I altamente não linear. Para a sua correta seleção, o Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE – propõe em um de seus padrões um método iterativo, onde um para-raios deve ser selecionado e suas característircas determinadas, mediante os parâmetros do sistema em questão. Em seguida, é selecionada (ou determinada) a suportabilidade da isolação. Por fim é avaliada a coordenação de isolamento (IEEE, 1997a).

#### 1.2 - Objetivo

Tendo em vista a relevância da aplicação de para-raios na proteção de cabos isolados, conforme descrito na seção anterior, o objetivo deste trabalho é investigar os transitórios elétricos devidos a descargas atmosféricas que incidem diretamente sobre condutores fase e sobre o cabo para-raios, de linhas de transmissão trifásicas de alta tensão blindadas, constituídas de seções subterrâneas, por meio da utilização de cabos isolados. São analisadas as solicitações dielétricas nas junções entre linha aérea e cabos subterrâneos, decorrentes de descargas atmosféricas, com e sem a utilização de arranjos de proteção por meio do uso de para-raios. Para isso, são utilizadas algumas configurações distintas, a fim de avaliar a influência da variação do número e do posicionamento de para-raios no sistema, além da variação do comprimento do cabo subterrâneo.

Para fins deste trabalho, é realizado uso de diferentes modelos matemáticos para implementação dos vários elementos do sistema. Para simulação das descargas atmosféricas, são utilizadas fontes de impulso de corrente do tipo Heidler. Para modelagem das linhas de transmissão e dos cabos isolados, é utilizado o modelo a parâmetros variantes com a frequência de J. Marti (1982). Para simulação de pararaios são adotados o modelo IEEE (1992) e o modelo de Pinceti e Gianettonni (1999). São modeladas e inseridas neste estudo as torres de transmissão e os condutores de aterramento dos para-raios, a fim de se considerar a influência desses elementos no comportamento transitório da linha. O aterramento das torres e dos para-raios é modelado a partir de uma resistência de aterramento concentrada, de valor em conformidade com os critérios adotados no Brasil, com o intuito de se avaliar sua influência sobre as sobretensões atmosféricas calculadas sobre os cabos subterrâneos. Todos esses modelos são descritos com mais detalhes no decorrer deste trabalho. O Software utilizado nas simulações é o ATP/EMTP (Meyer e Liu, 1992), por ser uma ferramenta poderosa para análise de transitórios e por ser largamente utilizada na literatura (Puffer et al., 2014). Por meio dele é possível implementar os modelos citados anteriormente, afim de compor e analisar o sistema em estudo.

#### 1.3 - Estrutura da Dissertação

Este trabalho está dividido em 4 capítulos. No Capítulo 1, é levantada a relevância do estudo acerca do uso de cabos subterrâneos em linhas de transmissão de alta tensão e uma breve contextualização do estudo realizado nesse trabalho. Nesse sentido, são elucidadas as principais referências existentes no atual estado da arte e que são utilizadas como base no presente trabalho. Também são citados os principais conceitos inerentes a descargas atmosféricas, formas de incidência em linhas de transmissão, mecanismos de ruptura dielétrica, propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência, características e influência de seções constituídas de cabos isolados. Também é apresentada a justificativa do tema investigado, que por sua vez compõe o objetivo desse trabalho. Por fim, a estrutura da dissertação é apresentada.

Uma revisão teórica e bibliográfica é apresentada no Capítulo 2, a respeito da caracterização das descargas atmosféricas e dos efeitos de sua incidência sobre uma linha de transmissão. Também são descritas as técnicas para modelagem das ondas de tensão e correntes viajantes, decorrentes da corrente de descarga. Em seguida, são tratados os diferentes modelos matemáticos de linha de transmissão e de cabos isolados que são utilizados para investigação do problema proposto. Posteriormente, são descritos os modelos matemáticos dependentes da frequência utilizados para implementação dos para-raios. Por fim, é abordada a modelagem dos principais equipamentos e elementos de uma subestação elétrica, no âmbito do estudo de fenômenos de altas frequências.

O Capítulo 3 consiste na apresentação da metodologia empregada para realização deste trabalho. É feita uma introdução ao problema proposto para estudo e de todas as premissas e restrições consideradas. Em seguida, são definidos os passos e as técnicas propostas para realização gradativa da investigação do sistema proposto. Também, são apresentados os principais resultados obtidos a partir da simulação de uma linha de transmissão de alta tensão com seção subterrânea, submetida a descargas atmosféricas que incidem nos condutores fase ou no cabo para-raios. São investigadas as máximas solicitações dielétricas nesses cabos durante o transitório eletromagnético, com especial atenção ao antendimento ao Nível Básico de Isolação e à energia total absorvida pelos para-raios, nas diferentes configurações adotadas como possíveis soluções para o problema em estudo. Por fim, os resultados obtidos a partir dos diferentes modelos são comparados, tendo como base informações presentes na literatura e é feita uma discussão crítica dos mesmos.

Por fim, no Capítulo 4, são apresentadas as conclusões do trabalho e as considerações finais, bem como as pesquisas a serem realizadas em trabalhos futuros. Também, é apresentado um resumo das principais contribuições deste trabalho.

### **CAPÍTULO 2 - ESTUDO DO ESTADO DA ARTE**

#### 2.1 - Descargas atmosféricas

#### 2.1.1 - Caracterização das descargas atmosféricas

A descarga atmosférica consiste basicamente em uma descarga elétrica de grande magnitude que ocorre na atmosfera. O impulso de corrente elétrica decorrente de uma descarga atmosférica que incide diretamente em um corpo, como edificações, sistemas elétricos e seres vivos, representa a condição mais severa de ocorrência deste fenômeno (Visacro, 2005). A potência dissipada neste corpo, devido a essa corrente impulsiva, pode gerar destruição intensa. Além disso, sua característica de variação rápida é uma importante fonte de distúrbios eletromagnéticos em sistemas elétricos e eletrônicos, inclusive nos casos de incidência indireta das descargas atmosféricas.

Essa descarga elétrica é iniciada na nuvem, a partir da separação de cargas positivas e negativas na mesma, devido a diversos processos físicos, químicos e dinâmicos. Sabe-se, de uma forma ainda não muito precisa, que a eletrificação da nuvem ocorre a partir da interação entre o movimento ascendente de ar quente e úmido e o movimento descendente das frentes frias superiores, além do efeito da gravidade.

Neste processo de eletrificação, as cargas positivas ficam dispersas no interior da nuvem, enquanto a base da nuvem apresenta uma predominância de cargas negativas. Estas, por sua vez, determinam valores muito elevados de campo elétrico entre a base da nuvem e o solo, de forma que a diferença de potencial pode alcançar valores superiores a 200 MV. Com isso, uma grande quantidade de cargas positivas é induzida na superfície do solo. Quando o campo elétrico na base da nuvem atinge valores superiores à rigidez dielétrica do ar, ocorre uma descarga elétrica intensa, que forma um canal ionizado de plasma, de dezenas de metros. Nele, acumula-se uma grande quantidade de cargas negativas provenientes da região vizinha, o que contribui para o aumento do campo elétrico nas extremidades do canal, o que gera novas descargas. Este fenômeno se inicia normalmente no interior da nuvem e se repete, com a tendência de descer em direção ao solo. À medida que o canal ionizado carregado negativamente se aproxima da superfície do solo, a densidade de cargas positivas nela aumenta. O campo elétrico no solo se torna tão intenso que descargas elétricas ascendentes são produzidas por ele. Por um processo semelhante ao que ocorre na base da nuvem, sucessivas rupturas dielétricas ocorrem a partir da base do solo e sobem na direção do canal ionizado que vem da nuvem.

Quando ocorre a conexão entre os canais descendente e ascendente, é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade, chamada de corrente de retorno. Esta onda de corrente propaga a partir do ponto de conexão dos canais, de forma a neutralizar as cargas acumuladas por cada um deles. O aquecimento e o efeito luminoso devido a este fenômeno é chamado de relâmpago e a expansão abrupta do ar circunvizinho ao canal produz um som, que é chamado trovão. Esta descarga é chamada de descarga negativa descendente, pois é iniciada por acúmulo de cargas negativas na nuvem. Ela se propaga a velocidades que variam entre 6% e 90% da velocidade da luz no vácuo  $(3.10^8 m/s)$  (Visacro, 2005).

Na maioria das vezes, pode ocorrer uma sequência no processo elétrico na nuvem, decorrente do acúmulo de cargas negativas em outras regiões, que não participaram da primeira descarga. Caso o canal ainda esteja ionizado, essas regiões podem suprir cargas negativas para este canal, por meio de uma corrente reduzida, chamada de corrente de recarregamento do canal ionizado. Esta corrente possui amplitude limitada a valores em torno de 500 A e flui por tempos da ordem de 2 ms pelo canal. Esta corrente de recarregamento é responsável pelas descargas subsequentes, que transferem a carga negativa para o solo, por meio de uma corrente de retorno, que geralmente é menos intensa, porém mais rápida do que a corrente de retorno da primeira descarga negativa.

Além da descarga negativa descendente, também podem ocorrer descargas negativas ascendentes, que se iniciam no solo, devido a cargas positivas; descargas positivas descendentes, que se iniciam pelo acúmulo de cargas positivas na nuvem; e descargas positivas ascententes, que se iniciam no solo, devido a cargas negativas. Entretanto no Brasil, estima-se que 90% das descargas observadas por medição direta são negativas e descendentes, resultado similar às referências internacionais (Visacro *et. Al*, 2004). As demais formas de descarga são relativamente raras.

#### 2.1.2 - Características da corrente de retorno

Como já mencionado, há uma tendência de que as descargas atmosféricas que ocorrem no Brasil sejam do tipo negativas descendentes. Outra informação importante é quanto à densidade de descargas atmosféricas que incidem no solo de uma determinada região, dada por "descargas/km²/ano". Este índice sofre influência da distribuição de chuvas na região, da latitude e do relevo local. No Brasil, existem regiões em que os índices de densidade de descargas são maiores do que em diversos países do mundo. Em Minas Gerais, por exemplo, o índice médio de descargas é de 4 descargas/km²/ano. No Pará, este índice é superior à 5. Torna-se então importante a caracterização da forma de onda das correntes de retorno referentes às descargas atmosféricas que ocorrem no Brasil. Para tal, é utilizada uma abordagem estatística que traduz a aleatoriedade deste fenômeno em um comportamento característico para cada tipo de descarga observada no país. Trabalhos importantes nesse sentido foram realizados na Estação do Morro do Cachimbo, em Minas Gerais, por Visacro *et al.* (2004) e Guimarães *et al.* (2014).

A amplitude da corrente de descarga é referida como o valor de pico da onda de corrente. Geralmente, a corrente de primeira descarga apresenta uma sequência de picos, sendo usualmente o segundo pico o de maior magnitude. Para efeitos de dimensionamento de proteção de sistemas elétricos, este parâmetro é de grande interesse, pois determina o nível máximo de solicitação dielétrica imposta pela descarga aos equipamentos do sistema. É ela que determina a sobretensão nos isoladores de uma linha de transmissão e na isolação de cabos isolados de seções subterrâneas, por exemplo. Observações realizadas no Morro do Cachimbo mostram que o valor mediano da corrente de pico de primeiras descargas negativas descendentes é da ordem de 45 kA, 50% superior às observadas em outras partes do mundo e admitidas internacionalmente (Visacro *et al.*, 2004; Guimarães *et al.*, 2014; Berger *et al.*, 1975; Anderson e Eriksson, 1980). Já para o pico de corrente de descargas subsequentes, a mediana é de 16 kA, 33 % superior às referências internacionals sugeridas.

A carga transferida para o solo em cada descarga atmosférica pode ser obtida por meio da integral da onda de corrente de retorno no tempo. Este parâmetro permite dimensionar a quantidade de carga elétrica que é transmitida pelo canal de descarga a terra. Em medições realizadas na Estação de San Salvatore, na Suíça, a mediana da carga envolvida em uma primeira descarga negativa é 5,2 C. Já para os casos de descargas negativas plenas, que incluem as descargas subsequentes, a carga total transmitida sobe para 7,5 C. Valores semelhantes foram encontrados na Estação do Morro do Cachimbo (Visacro, 2005).

O tempo de frente de onda é o tempo definido como o intervalo de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva e o alcance do primeiro pico da onda. Este parâmetro é importante nos estudos de proteção, pois a esse tempo de subida da

onda impulsiva está associada a geração de tensão induzida em sistemas elétricos próximos ao ponto onde ocorre a descarga atmosférica. Esse tempo de frente de onda também determina a suportabilidade dos isolamentos do sistema quanto a sobretensões associadas à descarga, seja ela de incidência direta ou indireta no sistema. O tempo de frente de onda pode ser determinado pelo intervalo de tempo referente ao crescimento de 10 a 90 % da amplitude máxima da onda impulsiva, indicado pelo parâmetro  $T_{10}$ , que representa 80 % do tempo de frente de onda. Também pode ser determinado pelo intervalo de tonda. Também pode ser determinado pelo intervalo de tempo de onda e 30 a 90 % de sua amplitude máxima, indicado pelo parâmetro  $T_{30}$ , que representa 60 % do tempo de frente. Estas faixas são determinadas devido à dificuldade de se estabelecer o instante inicial da onda. No Morro do Cachimbo, os valores medianos dos tempos de frente de onda  $T_{10}$  e  $T_{30}$  são 7 µs e 4,8 µs para primeira descarga; 0,88 µs e 0,67 µs para descargas subsequentes, respectivamente.

Já o tempo de meia onda refere-se ao intervalo de tempo entre o início da onda impulsiva e o instante em que a amplitude desta onda chega a 50 % de seu valor máximo após passar pelo seu valor de pico. Neste caso, o tempo decorrido é bastante superior ao tempo de frente de onda. Consequentemente, os erros na determinação do instante inicial exato pouco influenciam na obtenção deste parâmetro. Os valores medianos podem chegar a 53,5 µs para primeira descarga negativa e a 16,4 µs para descargas negativas subsequentes, conforme as medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo.

O tempo de duração total da descarga é o intervalo de tempo entre o início da descarga até a anulação da onda impulsiva. Nas medições realizadas na Estação de San Salvatore, os valores medianos deste parâmetro são da ordem de 85 ms para primeira descarga negativa e de 180 ms para todo o conjunto de descargas negativas subsequentes (Visacro, 2005).

A derivada máxima da onda de corrente em relação ao tempo ocorre próximo ao valor de crista desta onda impulsiva. No Morro do Cachimbo, os valores medianos da derivada máxima chegam a 19,4 kA/µs para primeira descarga e a 30 kA/µs para descargas subsequentes. Isto mostra que apesar do valor de pico de onda da descarga subsequente ser menor que o de primeira descarga, descargas subsequentes podem produzir picos de tensão induzida significativos em sistemas elétricos, por possuírem derivadas máximas geralmente mais elevadas.

Por fim, a energia por unidade de resistência é obtida pela integral do quadrado da corrente durante o intervalo de duração da corrente de retorno. Como a potência dissipada em um corpo é dada por Ri<sup>2</sup>, este parâmetro é dado em A<sup>2</sup>s. Observa-se que

11

ele não depende da resistência da vítima e sim apenas da corrente e representa a capacidade da corrente de retorno de dissipar energia. Para obter a energia total dissipada, basta multiplicar este parâmetro pela resistência do corpo atingido. No Morro do Cachimbo, as medianas obtidas para esse parâmetro, na ocorrência de primeira descarga negativa e descargas subsequentes, são  $10.7 \cdot 10^4 \text{ A}^2 \text{ s}$  e  $6.3 \cdot 10^3 \text{ A}^2 \text{ s}$ , respectivamente.

# 2.1.3 - Efeitos da incidência direta da descarga em uma linha de transmissão

Devido às longas extensões das linhas de transmissão existentes no Brasil, desde os locais de geração até as áreas consumidoras e também devido às elevadas altitudes com que os condutores estão dispostos, além das elevadas densidades de descargas de determinadas regiões, há grande probabilidade de incidência direta de descargas atmosféricas sobre essas linhas. As sobretensões decorrentes destas descargas podem gerar desligamentos indesejados na linha, devido às solicitações dielétricas nos isoladores. Para minimizar o número de desligamentos e aumentar a disponibilidade das linhas de transmissão, é necessário compreender os mecanismos que os determinam. Dessa forma, torna-se possível o desenvolvimento de práticas e de tecnologias que permitam a proteção adequada da linha, de modo a minimizar o número de desligamentos e de preservar os diversos equipamentos do sistema, contribuindo assim para o aumento da qualidade de energia transmitida. Nesse sentido, existem dois casos de incidência: a direta, que pode ocorrer diretamente nos condutores fase da linha, a partir de uma falha da blindagem, ou nos cabos para-raios; ou indireta, que ocorre nas proximidades da linha. Nesse caso, as sobretensões induzidas nos condutores podem ter valores máximos da ordem de algumas centenas de quilovolts, o que pode comprometer o dessempenho apenas de linhas de baixa e média tensão (Silveira, 2006). Portanto, esse trabalho tem como foco as ocorrências diretas da descarga sobre a linha. Os mecanismos que envolvem as duas formas de sua ocorrência são sucintamente descritos a seguir.

No caso de incidência direta da descarga nos condutores fase de uma linha sem blindagem, ou por ocorrência de falha dessa blindagem, a corrente de retorno se divide aproximadamente ao meio e cada parcela resultante viaja para um lado da linha, como ilustra a Figura 2.1.



Figura 2.1: Ruptura de Isolamento por flashover. (Adaptado de: Visacro, 2005.)

Para ondas impulsivas rápidas em linhas aéreas, como é o caso, a impedância de onda se aproxima da impedância de surto da linha, dada por  $Z_s = \sqrt{L/C}$  (Visacro, 2005). Consequentemente, uma sobretensão é gerada em associação à corrente impulsiva na linha. Essa sobretensão equivale à integral do campo elétrico entre o solo e a superfície do cabo. Sua amplitude é dada pelo produto entre a impedância de surto do cabo e a corrente de pico da onda de corrente. Essas duas ondas viajam pelo condutor fase e quando chegam na primeira estrutura aterrada, a cadeia de isoladores fica submetida a esta sobretensão. Caso ela seja maior que o Nível Básico de Isolamento (NBI) do isolador, um arco superficial surge no entorno do isolador. Dessa forma, a corrente de descarga flui em direção ao solo. Porém, esse arco elétrico gera um canal ionizado, com características condutivas. Por consequência, muitas vezes a própria tensão da linha é capaz de sustentar o arco elétrico iniciado pela sobretensão atmosférica, o que caracteriza um curto-circuito. O processo descrito acima é conhecido como *flashover*.

A Figura 2.2 apresenta o esquema de uma linha de transmissão protegida por cabos para-raios, também conhecidos por cabos-guarda ou cabos de blindagem. Esses cabos têm o objetivo de interceptar eventuais descargas atmosféricas e, assim, prevenir os efeitos de ruptura de isolamento da linha, o *flashover* descrito anteriormente. Esses cabos são dispostos convenientemente sobre as torres e são ligados ao solo por meio de cada estrutura, seja por meio de condutores de descida conectados à malha de aterramento de postes de madeira ou de concreto ou pela conexão elétrica dos cabos à estrutura de torres metálicas. A ocorrência da descarga nos cabos para-raios também é considerada uma incidência direta.



Figura 2.2: Ruptura de Isolamento por backflashover. (Fonte: Visacro, 2005).

Eventualmente, é possível que haja uma falha no isolamento da linha, mesmo na presença de cabos para-raios, como descrito no parágrafo anterior. Isso ocorre por meio de um processo diferente do *flashover* e é conhecido como *backflashover*. Para entendimento deste mecanismo, é necessário compreender o processo de reflexão de ondas guiadas em linhas de transmissão. Este fenômeno ocorre na presença de descontinuidades da impedância de surto da linha, verificada quando há uma alteração de condutores no decorrer da linha, por exemplo. As ondas de tensão e corrente submetidas a essa descontinuidade sofrem reflexões segundo um coeficiente que é função das impedâncias de surto envolvidas, como segue:

$$\Gamma_{\rm v} = \frac{Z_{\rm S2} - Z_{\rm S1}}{Z_{\rm S2} + Z_{\rm S1}} \tag{1}$$

$$\Gamma_{\rm i} = -\frac{Z_{\rm S2} - Z_{\rm S1}}{Z_{\rm S2} + Z_{\rm S1}} \tag{2}$$

onde  $\Gamma_v \in \Gamma_i$  são os coeficientes de reflexão da onda de tensão e de corrente, respectivamente. O índice 1 se refere à impedância referente ao ponto da linha onde a onda incidente inicia sua propagação. O índice 2 se refere ao meio de propagação seguinte. Observa-se que caso as impedâncias de surto sejam iguais, o coeficiente de reflexão é nulo, o que significa que não há descontinuidade e, portanto, não há reflexão da onda viajante. Caso a impedância a partir da descontinuidade seja menor que a do primeiro trecho, esse coeficiente será negativo, o que indica um sinal contrário da onda refletida que viaja no sentido oposto à onda incidente. Se o contrário ocorrer, o coeficiente será positivo e a onda refletida viajará no sentido oposto e com mesmo sinal da onda incidente. Os valores instantâneos das ondas de tensão e

corrente resultantes em qualquer ponto da linha serão dados pela sobreposição das ondas incidente e refletida de cada grandeza.

No estudo do backflashover, é conveniente considerar a torre de transmissão como um elemento de linha vertical conectado a uma barra de terra e a onda de corrente de descarga como uma onda triangular (Soares Jr. et al., 2005). Neste caso, a torre é representada por uma impedância de surto. Dessa forma, verifica-se que a onda de corrente se divide quando alcança uma estrutura aterrada. Uma parcela pequena desta corrente continua propagando pelo cabo para-raios, enquanto boa parte desce em direção ao solo (cerca de 70 a 90 % do valor da onda de corrente que chega na estrutura). Caso a impedância do aterramento da torre seja igual à impedância de surto da torre, o coeficiente de reflexão no ponto de conexão de ambas será nulo e não haverá reflexão da onda de tensão. Dessa forma, a onda de tensão resultante no topo da torre será a própria onda incidente. Se a impedância de aterramento for menor, haverá reflexão da onda de tensão com sinal contrário. Em uma situação ideal, ao ser considerada uma impedância nula da malha de aterramento, a onda de tensão é totalmente refletida, com  $\Gamma = -1$ , após um tempo de trânsito da onda pela torre, dado por  $\tau$ . Essa onda de tensão refletida possui mesma amplitude da onda incidente e de sinal inverso. Após um novo período  $\tau$ , a onda refletida chega ao topo da torre. A partir deste momento ( $2\tau$ ), a taxa de crescimento da onda resultante se anula e o valor de pico da sobretensão se mantém constante. Em um determinado instante a onda incidente chegará ao seu valor máximo e posteriormente irá decrescer, enquanto a onda refletida ainda permanecerá crescendo com sinal negativo, também por um período 2τ. Após este tempo a onda refletida irá decrescer com a mesma taxa da onda incidente, e a onda resultante terá valor novamente constante, negativo e próximo de zero, pelo tempo subsequente. O gráfico que representa as ondas de tensão incidente, refletida e resultante segue na Figura 2.3.



Figura 2.3: Determinação da onda resultante no topo da torre.

Essa é a definição ideal do mecanismo de backflashover. Na realidade, uma análise mais detalhada sobre as reflexões sucessivas da onda de tensão no topo e na base da torre poderia ser realizada, porém não são tão significativas na definição da amplitude da onda de tensão para este trabalho. Na prática, a impedância de aterramento das torres também não possui valor nulo, mas um valor geralmente compreendido entre 5 e  $30 \Omega$ , que é ainda inferior à impedância de surto da torre. Dessa forma, a taxa de crescimento da onda de tensão resultante no topo da torre não é nula, como em um caso ideal. Ela possui na verdade uma pequena taxa de variação, resultado da redução da amplitude da onda de tensão refletida, que na prática não é capaz de anular por completo o crescimento da onda incidente. A amplitude da onda de sobretensão resultante no topo da torre estará, portanto, compreendida entre o valor máximo da onda incidente e o da onda refletida negativa total, caso a impedância de aterramento varie entre o valor da impedância de surto da torre e o valor zero ideal. No Brasil, geralmente são adotados valores de até 30 Ω para a resistência de aterramento das torres, no sentido de assegurar valores elevados para o pico de tensão refletida e grande atenuação da onda resultante no topo da torre (Visacro, 2005).

Outros fatores também exercem influência na sobretensão no topo da torre e, consequentemente, na cadeia de isoladores. Um aumento no valor da impedância de surto da torre ou na amplitude da onda de corrente injetada no solo produzem um aumento da sobretensão no topo da torre. É possível deduzir que uma redução do tempo de frente de onda na torre também promove aumento da amplitude na onda de tensão. Variação semelhante ocorre com o aumento da altura da torre. Por fim, também há o acoplamento eletromagnético entre as fases e os cabos de blindagem e também com o topo das torres. Nesse sentido o efeito capacitivo é predominante na maioria dos casos, mesmo para correntes rápidas, como é o caso de descargas atmosféricas. Esse acoplamento faz com que haja uma elevação de potencial nos condutores fase para uma elevação na sobretensão no topo da torre e a tensão na respectiva fase, a tensão no isolador neste caso é diminuída.

Em resumo, verifica-se que a compreensão das etapas de formação de descargas atmosféricas e, principalmente, do mecanismo de *flashover* e *backflashover* é importante para se determinar medidas preventivas para redução da probabilidade de ruptura de isolamento na linha devido à incidência direta de descargas atmosféricas nos condutores fase ou nos cabos para-raios da linha. Uma forma de prevenção

consiste na redução da impedância de aterramento das torres, como já foi discutido. Outra prática usual é o aumento do número de discos das cadeias de isoladores. Porém, quando limites aceitáveis não são alcançados, principamente devido à alta resistividade de determinados tipos de solo, é usual a utilização de para-raios, capazes de assegurar que os valores de sobretensão na linha se mantenham sob limites toleráveis. Uma descrição detalhada sobre esse dispositivo é realizada no decorrer deste trabalho. A seguir, são tratadas as diferentes formas de onda utilizadas para modelagem das ondas de corrente e tensão relativas às descargas atmosféricas.

#### 2.2 - Modelagem da corrente de descarga

#### 2.2.1 - Introdução

As descargas atmosféricas podem ser modeladas por ondas de corrente, cujas formas são definidas em função das características da descarga elétrica em estudo. Na literatura são comumente utilizados alguns modelos que, apesar de não serem representativas da onda de descarga real, possuem papel fundamental na padronização de ensaios experimentais, com o objetivo de avaliar o desempenho de materiais, dispositivos e equipamentos frente a surtos atmosféricos. Para representação de descargas atmosféricas, são tradicionalmente utilizadas ondas de corrente do tipo  $5/20 \,\mu$ s e  $8/20 \,\mu$ s, denominação esta dada pelo tempo de frente de onda e tempo de meia onda, respectivamente. A seguir são descritas as três formas de onda.

#### 2.2.2 - Forma de onda do tipo dupla rampa

Essa é a forma mais simples de modelar a forma de onda de uma descarga atmosférica. No período entre o instante zero até o tempo de frente de onda a tensão ou corrente cresce linearmente com o tempo até o seu valor de pico, o que determina a primeira rampa da curva. A partir daí o valor decresce linearmente até o instante referente ao tempo de meia onda, o que determina a segunda rampa da curva. A forma de onda de corrente do tipo 8/20 µs e 10 kA, aplicada para a estudos de descargas atmosféricas, segue na Figura 2.4.



Figura 2.4: Forma de onda do tipo dupla rampa.

#### 2.2.3 - Forma de onda do tipo dupla exponencial

Essa onda é formada a partir da soma de duas funções exponenciais de sinais contrários e constantes de tempo de magnitudes diferentes, da seguinte forma:

$$f(t) = \eta F_n(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$
<sup>(3)</sup>

onde  $F_p$  é o valor de pico da grandeza em estudo;  $\eta$  é o fator de correção da amplitude da função; a é uma constante cujo inverso está assoaciado ao tempo de cauda de onda;  $\beta$  é uma constante cujo inverso está relacionado ao tempo de frente. É possível verificar que no instante inicial os dois termos se anulam. Além disso, o termo positivo deve ser atenuado lentamente no tempo, enquanto o termo negativo deve ser atenuado rapidamente. Com isso a soma dos termos assume aspecto impulsivo, conforme indicação da Figura 2.5. Essa forma de onda é muito utilizada em ambiente laboratorial, uma vez que pode ser obtida por meio da descarga de um capacitor sobre um circuito RC. É importante ressaltar novamente que essa forma de onda não representa totalmente o comportamente real de uma descarga atmosférica. A natureza côncava da frente de onda real não é presente na onda dupla exponencial. Já a derivada máxima da onda real ocorre próximo ao valor de pico, enquanto a derivada máxima da onda dupla exponencial ocorre nos instantes iniciais. Apesar dessas diferenças, justifica-se a utilização deste modelo pela facilidade de ajuste dos tempos de frente de onda e de meia onda a partir da variação dos parâmetros R e C do circuito de geração da onda dupla exponencial. Para determinação dos parâmetros η,  $\alpha \in \beta$ , é necessário resolver um sistema de equações não lineares, de forma iterativa e deve-se levar em conta a forma em que o tempo de frente de onda é definido (Salari Filho, 2006). Os parâmetros referentes à modelagem de diversos tipos de impulso de corrente, tanto para primeira descarga quanto para descargas subsequentes, foram calculados por Salari Filho (2006) e seguem na Tabela 2.1.



Figura 2.5: Onda dupla exponencial.

Tabela 2.1: Parâmetros para ondas do tipo dupla exponencial (Fonte: Salari Filho, 2006).

Tipo –	ti	t <sub>f</sub> definido por t <sub>f30/90</sub>		t <sub>f</sub> definido por t <sub>máx</sub>		
	η	α	β	η	α	β
0,1x50µs	1,00381	13938,99	32055871,1	1,00155	13893,91	87492445,7
1,2x50µs	1,03709	14591,40	2469720,2	1,02025	14263,86	4876268,8
6x12µs	8,22924	139050,90	158223,06	-	-	-
6x20µs	15,7046	122903,89	146160,07	1,90779	66620,22	319962,76
8x20µs	10,9176	109340,45	135776,43	6,6049	108436,97	164189,21
10x350µs	1,04391	2103,205	292367,30	1,02443	2049,379	563764,68
250x2500µs	1,17062	340,271	9697,851	1,10433	316,9557	16004,376

#### 2.2.4 - Forma de onda do tipo curva de Heidler

Essa onda é obtida a partir de uma função desenvolvida por F. Heidler (1985), a partir de curvas médias e medianas obtidas por dados coletados em torres monitoradas com instrumentação específica. A partir desta função, que recebe o nome de função de Heidler, é possível representar a natureza côncava da frente de onda da curva real e o posicionamento da derivada máxima próximo ao pico, como ocorre nessas curvas. A forma de decaimento da curva após o valor de pico também se assemelha às medianas. A função de Heidler permite o ajuste independente do pico de corrente, da derivada máxima de corrente e da carga transferida, por meio das constantes I<sub>0</sub>,  $\tau_1 \in \tau_2$  (Heidler, 1985). A função é dada a seguir.

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)}$$
<sup>(4)</sup>

onde:

 $\eta = e^{-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{1/n+1}}$  é o fator de correção da amplitude;

I<sub>0</sub>: Amplitude da corrente na base do canal;

 $\tau_1$ : Constante relacionada ao tempo de frente de onda de corrente;

 $\tau_2$ : Constante relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente;

n: Expoente adimensional, que pode variar de 2 a 10.

A Figura 2.6 ilustra uma forma de onda típica obtida por função de Heidler. Alternativamente, podem ser obtidas formas de onda de corrente a partir da soma de duas ou mais funções de Heidler. Para obtenção da curva de corrente conforme as características medianas obtidas na Estação do Morro do Cachimbo, para primeira descarga e descarga subsequente, utilizam-se os parâmetros obtidos por De Conti e Visacro (2007). Uma abordagem mais detalhada da modelagem da corrente de descarga por meio de funções de Heilder é realizada no próximo capítulo.



Figura 2.6: Forma de onda do tipo Heidler.

#### 2.3 - Modelagem de Linhas de Transmissão

#### 2.3.1 - Introdução

O sistema elétrico de potência consiste de centrais geradoras, sistemas de distribuição e linhas de transmissão. Estas, por sua vez, constituem o elo de ligação entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição. Essas interligações são realizadas por meio de subestações, responsáveis pelas transformações de tensão e por realizar funções de chaveamento. Devido às possibilidades de ocorrência de surtos resultantes dessas manobras e também de descargas atmosféricas, além de outras causas, o sistema elétrico deve ser também capaz de realizar funções de monitoramento e de proteção de seus elementos, de modo a garantir a confiabilidades de outras causas quantidades de potência. Nesse sentido, há uma busca constante pelo aperfeiçoamento de projetos de proteção do sistema. Esse é o contexto em que se encontram os estudos referentes às descargas atmosféricas e à prevenção de seus efeitos junto ao sistema elétrico. A seguir são descritas algumas técnicas de modelagem de linhas de transmissão.

#### 2.3.2 - Modelagem de Linhas de Transmissão

A modelagem matemática de linhas de transmissão se faz importante quando o objetivo é calcular tensão, corrente e potência em qualquer ponto de uma linha, quando estes valores são conhecidos em algum ponto da mesma, geralmente em uma de suas extremidades (Stevenson, 1986). De uma maneira geral, modelos matemáticos mais elaborados são necessários à medida que o porte da referente linha se torna maior, de modo a reduzir ou até mesmo anular os erros da solução em uma análise em regime permanente. Linhas curtas (comprimentos de até 80 km) e médias (comprimentos entre 80 e 240 km) podem ser representadas por modelos a parâmetros concentrados. Linhas longas (acima de 240 km) são representadas por meio de modelagem a parâmetros distribuídos. Já a análise do comportamento de linhas submetidas a transitórios eletromagnéticos, por serem fenômenos de alta frequência, deve ser realizada a partir de modelos cujos parâmetros são variantes com a frequência. Esses modelos são tratados a seguir.

#### 2.3.3 - Modelo para linha de transmissão curta

Esse é o modelo mais simplificado de todos e considera a capacitância em derivação tão desprezível que pode ser inteiramente desconsiderada sem que haja perda significativa de precisão dos resultados, para análise de linhas de até 80 km. Torna-se então suficiente a consideração apenas da resistência R série e da indutância L série, concentradas, para todo o comprimento da linha. A Figura 2.7 apresenta o circuito equivalente para uma linha curta. I<sub>f</sub> é a corrente na barra da fonte e I<sub>c</sub> é a corrente na barra da carga. V<sub>f</sub> e V<sub>c</sub> são as tensões entre fase e neutro para as mesmas barras.



Figura 2.7: Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta.

Como não há derivações no circuito, a corrente é a mesma nas duas extremidades do circuito, portanto  $I_f = I_c$ . A tensão na barra da fonte será dada por

$$V_{\rm f} = V_{\rm c} + I_{\rm c} Z \tag{5}$$

onde  $Z = R + j\omega L$  é a impedância da linha.

Esse circuito possui como característica apresentar uma tensão na fonte de módulo superior ao da tensão na carga, quando esta apresenta fator de potência indutivo. O contrário acontece quando seu fator de potência é capacitivo.

#### 2.3.4 - Modelo para linha de transmissão média

Uma linha média, que possui comprimento entre 80 e 240 km, pode ser representada com precisão suficiente por um circuito com os parâmetros R e L série da linha concentrados, com o acréscimo da capacitância em derivação desta linha. A admitância em derivação será dada apenas por esta capacitância C, uma vez que a condutância G em derivação é desprezada. A admitância em derivação é dividida ao

meio e cada metade é localizada em uma das extremidades da linha. O circuito equivalente recebe o nome de circuito  $\pi$  – nominal (Stevenson, 1986) e é apresentado na Figura 2.8.



Figura 2.8: Circuito π-nominal de uma linha de transmissão média.

É possível observar na Figura 2.8 que a corrente na capacitância em derivação do lado da carga é dada por  $V_c \times Y/2$ . Logo, a tensão na barra da fonte será:

$$V_{f} = \left(V_{c}\frac{Y}{2} + I_{c}\right)Z + V_{c} = \left(\frac{ZY}{2} + 1\right)V_{c} + ZI_{c}$$

$$\tag{6}$$

A corrente na barra da fonte é calculada sabendo-se que a corrente na capacitância em derivação do lado da fonte é dada por  $V_f \times Y/2$ . Ao somar essa parcela de corrente com as demais, tem-se:

$$I_{f} = V_{f} \frac{Y}{2} + V_{c} \frac{Y}{2} + I_{c} = \left(\frac{ZY}{4} + 1\right) Y V_{c} + \left(\frac{ZY}{2} + 1\right) I_{c}$$
(7)

Essas duas equações podem ser reescritas da seguinte forma:

$$V_{\rm f} = AV_{\rm c} + BI_{\rm c} \tag{8}$$

$$I_{f} = CV_{c} + DI_{c}$$
(9)

onde:

 $A = D = \frac{ZY}{2} + 1$ B = Z $C = Y = \left(\frac{ZY}{4} + 1\right)Y$ 

As constantes A e D são adimensionais, enquanto B é dada em Ohms e C em Siemens. Todas são aplicáveis a redes lineares, passivas, bilaterais com dois pares de terminais e em regime permanente (Stevenson, 1986).
## 2.3.5 - Modelos a parâmetros distribuídos (Modelo de Bergeron)

Na solução exata de qualquer linha de transmissão e na solução com alto grau de precisão de linhas de 60 Hz com mais de 240 quilômetros de comprimento, onde pretende-se obter tensões e correntes em qualquer ponto desta linha, deve-se considerar que os parâmetros da linha são distribuídos uniformemente ao longo de sua extensão e não concentrados (Stevenson, 1986). Dessa forma, são garantidas soluções com alto grau de exatidão em análises em regime permanente. Essa forma de modelagem também é utilizada na maioria dos estudos transitórios em sistemas elétricos (Amon e Pereira, 1994). A Figura 2.9 apresenta o circuito elétrico referente a esse modelo.



Figura 2.9: Modelo à parâmetros distribuídos.

Ao ser aplicada a lei de Kirchoff das tensões na malha externa da Figura 2.9, obtem-se:

$$V(x,t) = V(x + \Delta x, t) + L\Delta x \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} + R\Delta x I(x,t)$$

Reorganizando os termos da equação acima e tomando o limite da equação quando  $\Delta x \rightarrow 0$ , tem-se:

$$-\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = L\frac{\partial I(x,t)}{\partial t} + RI(x,t)$$
(10)

Ao ser aplicada a lei de Kirchoff das correntes para o nó principal do circuito da Figura 2.9, obtem-se:

$$I(x,t) = I(x + \Delta x) + G\Delta x V(x + \Delta x, t) + C\Delta x \frac{\partial V(x + \Delta x, t)}{\partial t}$$

Reorganizando os termos da equação acima e tomando o limite da equação quando  $\Delta x \rightarrow 0$ , tem-se:

$$-\frac{\partial I(x,t)}{\partial x} = C \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + GV(x,t)$$
(11)

A solução das equações diferenciais obtidas em (10) e (11) determinam a tensão e a corrente a cada instante e em cada ponto da linha. Essa solução pode ser obtida a partir da transformada de Laplace das duas equações. Considerando condições iniciais nulas, obtem-se:

$$-\frac{\partial V(x,s)}{\partial x} = (R + sL) \cdot I(x,s)$$
(12)

$$\frac{\partial I(x,s)}{\partial x} = (G + sC) \cdot V(x,s)$$
(13)

Se ambas as equações forem derivadas novamente, com relação ao espaço, é possível desacoplá-las, como segue:

$$-\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (R + sL) \cdot (G + sC) \cdot V(x, s) = \gamma^2 \cdot V(x, s)$$
(14)

$$-\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = (R + sL) \cdot (G + sC) \cdot I(x, s) = \gamma^2 \cdot I(x, s)$$
(15)

onde  $\gamma = \sqrt{(R + sL) \cdot (G + sC)}$  é a constante de propagação. As soluções das equações (14) e (15) possuem a forma dada abaixo:

$$V(x,s) = A(s)e^{-\gamma x} + B(s)e^{\gamma x}$$
(16)

$$I(x,s) = \frac{A(s)}{Z_0(s)} e^{-\gamma x} - \frac{B(s)}{Z_0(s)} e^{\gamma x}$$
(17)

onde Z<sub>0</sub> é a impedância característica da linha, dada por  $\sqrt{(R + j\omega L)/(G + j\omega C)}$ . A equação da corrente pode ser reescrita como:

$$I(x, s) = Y_0(s)[A(s)e^{-\gamma x} - B(s)e^{\gamma x}]$$
(18)

onde  $Y_0$  é a admitância característica da linha. Somando e subtraindo as equações (16) e (18), obtem-se:

$$V(x,s) + Z_0(s)I(x,s) = 2A(s)e^{-\gamma x}$$
 (19)

$$V(x, s) - Z_0(s)I(x, s) = 2B(s)e^{\gamma x}$$
 (20)

A partir das equações (19) e (20) faz-se as manipulações necessárias para a substituição de A(s) e B(s). Além disso, considera-se a barra da fonte no ponto x = 0 como sendo o ponto k e a barra da carga no ponto x = d como sendo o ponto m. O resultado é dado abaixo.

$$V_{k}(s) - Z_{0}(s)I_{km}(s) = [V_{m}(s) + Z_{0}(s)I_{mk}(s)]e^{-\gamma d}$$
(21)

$$V_{m}(s) - Z_{0}(s)I_{mk}(s) = [V_{k}(s) + Z_{0}(s)I_{km}(s)]e^{-\gamma d}$$
(22)

Para fenômenos de alta frequência, quando são analisados transitórios eletromagnéticos na linha de transmissão, as perdas são quase sempre desprezadas e a impedância de surto é dada por  $Z_0 = Z_s = \sqrt{L/C}$ , onde:

Z<sub>s</sub> é chamada de impedância de surto da linha;

 $\gamma = j\omega\sqrt{LC}$  é a constante de propagação da linha sem perdas;

 $v = \omega/\beta = 1/\sqrt{LC}$  é a velocidade da onda.

A partir das equações (21) e (22), reescritas no domínio do tempo, obtem-se as seguintes equações para as correntes do circuito:

$$I_{km}(t) = Y_0 V_k(t) - [Y_0 V_m(t-\tau) + I_{mk}(t-\tau)]$$
(23)

$$I_{mk}(t) = Y_0 V_m(t) - [Y_0 V_k(t - \tau) + I_{km}(t - \tau)]$$
(24)

onde  $\tau = d\sqrt{LC}$  é o tempo de propagação da onda de tensão e corrente do ponto k ao ponto m. O parâmetro d é a distância entre os dois pontos.

A partir das seguintes considerações:

$$I_{k}(t-\tau) = -[Y_{0}V_{m}(t-\tau) + I_{mk}(t-\tau)]$$
(25)

$$I_{m}(t-\tau) = -[Y_{0}V_{k}(t-\tau) + I_{km}(t-\tau)]$$
(26)

simplificam-se as equações (23) e (24):

$$I_{km}(t) = Y_0 V_k(t) + I_k(t - \tau)$$
(27)

$$I_{mk}(t) = Y_0 V_m(t) + I_m(t - \tau)$$
(28)

A Figura 2.10 apresenta o circuito elétrico equivalente ao modelo matemático obtido acima.



Figura 2.10: Circuito equivalente do modelo a parâmetros distribuídos de uma linha sem perdas.

Esse modelo foi primeiramente desenvolvido por Bergeron (1961) e posteriormente aperfeiçoado por Dommel (1966) e tem como característica a eficiência computacional e a precisão dos resultados. Este modelo é utilizado pelos principais aplicativos para cálculo de linhas de transmissão modeladas por parâmetros distribuídos.

# 2.3.6 - Modelo a parâmetros variantes com a frequência (Modelo de J. Marti)

O método proposto por José R. Marti (1982) propõe utilizar um modelo matemático onde os parâmetros da linha são dependentes da frequência. Portanto, as equações da linha são transformadas para o domínio da frequência. Este método é capaz de evitar problemas numéricos de estabilidade e é útil para estudos em uma ampla faixa de frequências (Marti, 1982). As equações que descrevem o comportamento da linha de transmissão, na forma matricial e no domínio da frequência, são dadas pelas equações (29) e (30).

$$-\frac{\partial}{\partial x}[V(x,\omega)] = [Z(\omega)][I(x,\omega)]$$
(29)

$$-\frac{\partial}{\partial x}[I(x,\omega)] = [Y(\omega)][V(x,\omega)]$$
(30)

A matriz  $[Z(\omega)]$  refere-se à matriz de impedâncias em série, enquanto  $[Y(\omega)]$  representa a matriz de admitâncias em derivação. Os vetores  $V(x, \omega)$  e  $I(x, \omega)$  representam as tensões e correntes variantes com a posição e a frequência angular, respectivamente. Ao desacoplar as duas equações, obtem-se as equações de propagação de tensão e corrente:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [V(x,\omega)] = [Z(\omega)][Y(\omega)][V(x,\omega)]$$
(31)

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} [I(x,\omega)] = [Y(\omega)][Z(\omega)][I(x,\omega)]$$
(32)

A solução geral dessas duas equações, em um ponto x ao longo da linha, possui a seguinte forma:

$$[V(x,\omega)] = e^{-[\Gamma_v(\omega)]x} [V_p(\omega)] + e^{[\Gamma_v(\omega)]x} [V_r(\omega)]$$
(33)

$$[I(x,\omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]x} [I_p(\omega)] + e^{[\Gamma_i(\omega)]x} [I_r(\omega)]$$
(34)

 $[V_p(\omega)] \in [V_r(\omega)]$  são vetores que representam as ondas de tensão progressivas e regressivas.  $[I_p(\omega)] \in [I_r(\omega)]$  são vetores que representam as ondas de corrente progressivas e regressivas, respectivamente, para x = 0. As matrizes de constantes de propagação, para tensão e corrente, são dadas respectivamente por:

$$[\Gamma_{v}(\omega)] = \sqrt{[Z(\omega)][Y(\omega)]} = \sqrt{[P(\omega)]}$$
(35)

$$[\Gamma_{i}(\omega)] = \sqrt{[Y(\omega)][Z(\omega)]} = \sqrt{[P(\omega)]^{t}}$$
(36)

Ao diferenciar a equação (34) em relação a x e substituir na equação (30), obtem-se:

$$[Y_{c}(\omega)][V(x,\omega)] = \left[e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]x}[I_{p}(\omega)] - e^{[\Gamma_{i}(\omega)]x}[I_{r}(\omega)]\right]$$
(37)

onde

$$[Y_{c}(\omega)] = \frac{[Y(\omega)]}{\sqrt{[Y(\omega)][Z(\omega)]}}$$
(38)

é a matriz de admitâncias características.

Por meio da soma de (37) e (34), obtem-se:

$$[Y_{c}(\omega)][V(x,\omega)] + [I(x,\omega)] = 2e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]x}[I_{p}(\omega)]$$
(39)

Com a consideração de que a linha de transmissão está compreendida entre os pontos x = 0 e x = d, a equação (39) torna-se:

Para x = 0:

$$[Y_{c}(\omega)][V(0,\omega)] + [I(0,\omega)] = 2[I_{p}(\omega)]$$
(40)

Para x = d:

$$[Y_{c}(\omega)][V(d,\omega)] + [I(d,\omega)] = 2e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]d} [I_{p}(\omega)]$$
(41)

Agora, com a substituição do termo  $\left[I_p(\omega)\right]$  da equação (40) na equação (41), obtem-se:

$$[Y_{c}(\omega)][V(d,\omega)] + [I(d,\omega)] = e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]d} [[Y_{c}(\omega)][V(0,\omega)] + [I(0,\omega)]]$$
(42)

Com a substituição do termo  $\left[I_p(\omega)\right]$  da equação (41) na equação (40), obtemse:

$$[Y_{c}(\omega)][V(0,\omega)] + [I(0,\omega)] = e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]d} [[Y_{c}(\omega)][V(d,\omega)] + [I(d,\omega)]]$$
(43)

Se o ponto x = 0 for denominado como ponto k e o ponto x = d como ponto m, as equações (42) e (43) são reescritas como segue:

$$[Y_{c}(\omega)][V_{m}(\omega)] - [I_{m}(\omega)] = e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]d} [[Y_{c}(\omega)][V_{k}(\omega)] + [I_{k}(\omega)]]$$
(44)

$$[Y_{c}(\omega)][V_{k}(\omega)] - [I_{k}(\omega)] = e^{-[\Gamma_{i}(\omega)]d} [[Y_{c}(\omega)][V_{m}(\omega)] + [I_{m}(\omega)]]$$
(45)

O termo  $e^{-[\Gamma_i(\omega)]d}$  é definido como função de propagação ou de ponderação (Marti, 1982) e é definido como [A( $\omega$ )]. Se forem feitas as seguintes considerações:

$$[I_{kh}(\omega)] = -[A(\omega)][[Y_c(\omega)][V_m(\omega)] + [I_m(\omega)]]$$
(46)

$$[I_{mh}(\omega)] = -[A(\omega)][[Y_c(\omega)][V_k(\omega)] + [I_k(\omega)]]$$
(47)

finalmente, obtem-se as equações referentes ao modelo matemático de Marti (1982), a partir da substituição de  $[I_{mh}(\omega)]$  na equação (44) e de  $[I_{kh}(\omega)]$  na equação (45):

$$[I_k(\omega)] = [Y_c(\omega)][V_k(\omega)] + [I_{kh}(\omega)]$$
(48)

$$[I_{m}(\omega)] = [Y_{c}(\omega)][V_{m}(\omega)] + [I_{mh}(\omega)]$$
(49)

As equações (47) e (48) sugerem o circuito da Figura 2.11 como circuito equivalente de uma linha polifásica no domínio da frequência (Araújo e Neves, 2005).



Figura 2.11: Circuito equivalente do modelo de J. Marti para uma linha polifásica (domínio da frequência) (Fonte: Araújo e Neves, 2005).

A grande dificuldade deste método está na obtenção de  $[\Gamma_i(\omega)]$  e de  $[A(\omega)]$ , que não ocorre de forma direta, uma vez que envolvem o cálculo, respectivamente, da raiz quadrada e da exponencial de uma matriz. Entretanto, elas podem ser obtidas por meio do cálculo de autovalores e autovetores da matriz  $[P(\omega)]$  ou  $[P(\omega)]^t$ . Para sistemas polifásicos, em que a tensão e a corrente em uma determinada fase dependem das tensões e correntes nas demais, essas matrizes são cheias, com elementos não nulos fora de sua diagonal, que representam essa interação entre as fases. O cálculo de seus respectivos autovalores e autovetores ocorre de forma que

$$[P(\omega)] = [T_{V}(\omega)] \cdot [\lambda(\omega)] \cdot [T_{V}(\omega)]^{-1}$$
(50)

$$[P(\omega)]^{t} = [T_{i}(\omega)] \cdot [\lambda(\omega)] \cdot [T_{i}(\omega)]^{-1}$$
(51)

Em que  $[\lambda(\omega)]$  é uma matriz diagonal, cujos elementos não-nulos são os késimos autovalores de  $[P(\omega)]$  ou de  $[P(\omega)]^t$ . Como os autovalores de ambos são iguais, tem-se que

$$[T_{v}(\omega)] = [[T_{i}(\omega)]^{-1}]^{t}$$

 $[T_v(\omega)]$  é uma matriz cujas colunas são autovetores de  $[P(\omega)]$  e  $[T_i(\omega)]$  é uma matriz cujas colunas são autovetores de  $[P(\omega)]^t$ . Dessa forma,

$$[\Gamma_{i}(\omega)] = \sqrt{[P(\omega)]^{t}} = [T_{i}(\omega)] \cdot [\gamma(\omega)] \cdot [T_{i}(\omega)]^{-1},$$

em que  $[\gamma(\omega)]$  (com  $\gamma_k = \sqrt{\lambda_k(\omega)}$ , k = 1, 2, ..., n) é, também, uma matriz diagonal.

Finalmente, a função de propagação é dada por:

$$[A(\omega)] = e^{-[\Gamma_i(\omega)]d} = [T_i(\omega)] \cdot [e^{-[\gamma(\omega)]d}] \cdot [T_i(\omega)]^{-1}$$

em que  $[e^{-[\gamma(\omega)]d}]$  é uma matriz diagonal cujos termos da diagonal são  $e^{-\gamma_k(\omega)}$  com (k = 1, 2, ..., n).

Assim, se a resistência, a indutância e a capacitância por unidade de comprimento de uma linha de transmissão forem conhecidas como funções da frequência, todos os termos das equações (44) e (45) são determinados. Como essas equações contêm produtos de matrizes no domínio da frequência, no domínio do tempo é necessário o cálculo de convoluções. Esses cálculos podem ser feitos no domínio de autovalores, por meio de decomposição modal, em que é feita uma transformação de coordenadas, nos vetores tensão e corrente do domínio de fases, em um novo sistema de coordenadas, conhecido como sistema modal, em que as equações matriciais resultantes para as tensões e correntes sejam diagonais, de modo que um sistema de n fases possa ser tratado como n sistemas monofásicos (Araújo e Neves, 2005).

Apesar da utilização do modelo de Bergeron em diversos estudos de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, o modelo de J. Marti é capaz de representar essa mesma linha para toda a faixa de frequência, sem desconsiderar as perdas variáveis com a frequência, como ocorre no modelo de Bergeron e em outros métodos desenvolvidos no domínio do tempo para estudos em alta frequência. Este modelo também evita ocorrências de instabilidade dos resultados devido ao aumento indevido dos picos dos harmônicos de maior grau, o que produz distorções na forma de onda dos sinais de tensão e corrente, com picos exagerados de magnitude (Marti, 1982). Portanto, esse é o modelo a ser utilizado nas simulações desse trabalho. Os detalhes de sua implementação são dados no próximo capítulo.

# 2.4 - Modelagem das Torres de Transmissão

#### 2.4.1 - Introdução

De uma forma geral, à medida que o nível de tensão de uma linha de transmissão se eleva, as torres de transmissão se tornam mais altas. Além disso, as distâncias elétricas entre os condutores e também o número de discos das cadeias de isoladores se tornam maiores. Consequentemente, a probabilidade de ocorrência de uma falha na blindagem da linha se torna maior. Também se eleva a probabilidade de ocorrência de *backflashover*, devido ao aumento da altura da torre e o consequente aumento no tempo de trânsito dos surtos na mesma. A seguir são dadas algumas características importantes observadas para modelagem das torres de transmissão nesse trabalho.

#### 2.4.2 - Altura da torre

A altura da torre influencia diretamente a probabilidade de captação de descargas atmosféricas pela linha de transmissão. A. J. Eriksson desenvolveu em 1987 uma relação para cálculo desta probabilidade, a partir de medições reais de descargas atmosféricas que ocorriam em estruturas. Essa fórmula é utilizada para calcular o número de descargas coletadas pela linha em função da altura das torres e outros parâmetros, como segue na equação (52).

$$N_s = N_g \left(\frac{28h^{0.6} + b}{10}\right)$$
(52)

onde:

h é altura da torre, em metros;

b é o espaçamento dos cabos de blindagem, em metros;

 $N_g$  é a densidade de descargas da região considerada, dada em descargas/km<sup>2</sup>/ano;

 $N_s$  é o número de descargas coletadas, dadas em descargas/100 km/ano.

Observa-se que a probabilidade de descargas na linha é proporcional à altura da torre e do espaçamento entre os cabos de blindagem. A probabilidade de ocorrência de descarga na linha está intimamente ligada à probabilidade de desligamento da linha

devido a sua incidência direta. Além disso, a altura da torre também influencia no valor da sua impedância de surto e no tempo de trânsito do surto na estrutura.

#### 2.4.3 - Impedância de surto da torre de transmissão

A impedância de surto da torre, juntamente com a impedância de aterramento, determina o coeficiente de reflexão do surto de tensão na base da torre. Consequentemente, a relação entre essas duas impedâncias define a amplitude do pico de sobretensão resultante na cadeia de isoladores, o que pode resultar no processo de *backflashover*.

A modelagem da torre de transmissão não é trivial, pois depende do tipo de estrutura, onde a impedância de surto varia no decorrer da mesma. Entretanto, é comum modelá-la por meio de uma linha de transmissão monofásica vertical sem perdas. Neste caso, podem-se utilizar modelos mais simplificados, como o de Darveniza e Sargent (1969), que propõe um modelo baseado em uma torre no formato de cone, como segue na equação (53).

$$Z_{\rm T} = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right]$$
(53)

onde: h é a altura da torre e 2r é o diâmetro da torre, ambos em metros. Outro modelo é proposto por Wagner e Hileman (1962) que sugerem um cálculo da impedância de surto da torre por meio de um formato cilíndrico, conforme equação (54).

$$Z_{\rm T} = 60 \ln \sqrt{2} \left(\frac{\rm h}{\rm r}\right) - 60 \tag{54}$$

O valor típico de impedância de surto de uma torre de transmissão normalmente varia entre  $150 \Omega$  e  $250 \Omega$ . Valores nessa faixa são capazes de representá-la com bom grau de aproximação para análises qualitativas de seu desempenho frente a transitórios eletromagnéticos (Soares Jr., 1996).

Além dos modelos simplificados propostos pelas equações (52) e (53), pode-se fazer uso de modelos baseados em equações de campo eletromagnético e na teoria de circuitos, como proposto por De Conti *et. al* (2006). Nesse método, as torres de transmissão são modeladas por meio de seções multicondutoras verticais, cada uma modelada por uma linha de transmissão vertical monofásica sem perdas e com velocidade próxima a 80% da velocidade da luz no vácuo. Essa técnica de modelagem se mostrou capaz de apresentar resultados confiáveis em estudos de transitórios atmosféricos (De Conti *et. al*, 2006), sendo utilizada para representação das torres de transmissão neste trabalho.

# 2.4.4 – Modelagem da impedância de aterramento das torres de transmissão

O aterramento das torres de uma linha de transmissão tem papel importante no desempenho satisfatório de um sistema elétrico, pois é por ele que deve fluir a maior parte da corrente devida a incidência de uma descarga atmosférica. Conforme Visacro (2007), o sistema de aterramento é constituído basicamente por três elementos: os condutores que conectam o sistema aos eletrodos; os eletrodos instalados adequadamente no solo; e o solo propriamente dito. No Brasil, é comum a utilização de cabos contrapeso radiais de aço-cobre de 4 AWG (copperweld), conectados aos pés das torres. A armadura utilizada nas fundações das torres também é considerada parte integrante do sistema de aterramento. A Figura 2.12 apresenta o esquema típico de aterramento de uma torre de transmissão.



Figura 2.12: Esquema típico de aterramento de uma torre de transmissão.

As ondas decorrentes do surto percorrem os cabos de aterramento, que por sua vez se comportam de maneira semelhante a uma linha de transmissão em um meio com perdas. Dessa forma, há uma atenuação referente a cada componente harmônica da onda impulsiva (Visacro, 2007).

O sistema de aterramento pode ser representado eletromagneticamente por uma impedância de aterramento. Entretanto, para análise de fenômenos de baixa frequência, os efeitos reativos podem ser desprezados. Dessa forma, o sistema de aterramento pode ser representado por uma resistência de aterramento (Alípio *et al.*, 2006a; Alípio *et al.*, 2006b). Em outras palavras, essa resistência é o resultado da respectiva impedância quando a frequência é dada idealmente como zero. Todavia, conforme Alípio (2008), para estudos em alta frequência, o sistema de aterramento deve ser representado por uma impedância complexa para cada frequência considerada no estudo transitório, ou seja:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}$$
(55)

onde  $Z(\omega)$  depende da geometria do sistema de aterramento e das características eletromagnéticas do solo.  $V(\omega)$  é a elevação de potencial em relação ao infinito em função da frequência e  $I(\omega)$  é a corrente injetada em função da frequência. A característica de variação de módulo e fase da impedância de aterramento em função da frequência, de um eletrodo horizontal de 30 metros de comprimento, raio de 0,7 centímetros e profundidade de 0,5 metro, inserido em um solo de resistividade 2400  $\Omega$ .m e permissividade elétrica relativa 15 é apresentada na Figura 2.13 (Alípio *et al.*, 2008). Nela é possível observar o valor da impedância em baixas frequências e também seu valor mínimo obtido em alta frequência.



Figura 2.13: Variação do módulo e fase da impedância de aterramento em função da frequência (Fonte: Alípio *et al.*, 2008).

No domínio do tempo, o comportamento do aterramento elétrico frente a correntes impulsivas pode ser representado por uma impedância impulsiva  $Z_p$ . Esse parâmetro é definido como a razão entre os picos de tensão e corrente. Seu uso sob efeitos práticos é interessante, pois permite obter o pico de sobretensão devido à corrente impulsiva a partir apenas do produto entre a impedância impulsiva e o pico de corrente. Conforme Alípio (2008), sua magnitude está relacionada à forma de onda injetada no aterramento. Outro parâmetro de interesse no domínio do tempo refere-se à "impedância no tempo", correspondendo à relação entre os valores instantâneos de tensão e corrente. Para frente de ondas mais rápidas esta "impedância" é mais rápida. Já ao longo da cauda dessas ondas, a razão entre os valores instantâneos de tensão

e corrente é praticamente constante, assumindo valor próximo ao valor da resistência de aterramento.

A partir do cálculo da impedância impulsiva é possível quantificar o comprimento efetivo de um eletrodo de aterramento. O comprimento efetivo de um eletrodo é definido como o comprimento a partir do qual não há mais reduções significativas na impedância impulsiva de aterramento. A Figura 2.14 apresenta o comportamento da impedância impulsiva em função do comprimento de um eletrodo horizontal de raio 1,0 cm em uma profundidade de 0,5 metro, em solos de diferentes resistividades e permissividade relativa igual a 15, submetido a uma corrente impulsiva de 1,2/20  $\mu$ s.



Figura 2.14: Curvas de impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo para diferentes solos e corrente impulsiva de 1,2/20 µs (Fonte: Alípio, 2008).

É possível observar na Figura 2.14 que para um eletrodo de 30 metros de comprimento e solo de resistividade de 1000  $\Omega$ .m, valor este típico do solo brasileiro, a impedância impulsiva é de aproximadamente 65 $\Omega$ . Entretanto na prática, constuma-se representar o aterramento por meio de uma resistência  $R_g$ , devido à maior facilidade de medição deste parâmetro (Visacro, 2007). Nesse sentido, é comum a utilização de um valor máximo de 30  $\Omega$  para a resistência de aterramento pelas concessionárias de energia, como critério de qualidade, uma vez que o mesmo busca assegurar uma amplitude elevada da onda negativa de reflexão no aterramento e, portanto, uma vigorosa redução na tensão resultante no topo da torre e na cadeia de isoladores (Visacro, 2005). Ainda segundo o autor, há uma correlação forte entre impedância e resistência de aterramento. Assim, a partir deste valor e da configuração da malha de

aterramento, pode-se estimar o valor da impedância impulsiva desta malha, pela relação proposta por Soares Jr. (1996) e Rosado (2008), dada pela equação (56).

$$Z_{\rm p} = 0.7 \times R_{\rm g} \tag{56}$$

Vale mencionar que a relação entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento dada pela Equação (56) é conservadora quando se consideram solos de resistividade mais elevada (valores acima de 1000  $\Omega$ .m). Nesses casos, a relação  $Z_p/R_g$ , definida na literatura como coeficiente de impulso, pode ser inferior a 0,7. Também, de acordo com Alípio e Visacro (2014), os valores de coeficientes de impulso inferiores à unidade são decorrentes do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo. Adicionalmente, tal coeficiente é tão menor quanto maior for a resistividade do solo.

# 2.5 - Modelagem dos Para-Raios

### 2.5.1 - Introdução

Para-raios são utilizados para proteger geradores, transformadores, cabos e outros equipamentos contra sobretensões transitórias, mantendo a tensão sobre esses equipamentos limitada a valores inferiores aos seus níveis básicos de isolação (Amon Filho e Pereira, 1994). Para tal, os para-raios devem ser instalados o mais próximo possível dos equipamentos a serem protegidos, mesmo no caso de linhas de transmissão curtas (Meyer e Liu, 1992). Isso permite evitar que a reflexão da onda nos pontos de descontinuidade da linha resulte em amplificação indesejada de sua magnitude. Na ocorrência de sobretensões, o para-raios apresenta uma baixa impedância e, de forma simplificada, se comporta como um curto circuito. Após a supressão da sobretensão, o para-raios volta a se comportar como circuito aberto e reestabelece as condições normais de operação da linha. Para que o para-raios apresente esse comportamento, ele deve possuir uma resistência não linear, como é apresentado posteriormente.

Os principais tipos de para-raios utilizados atualmente são os do tipo válvula. Recebem essa denominação, pois se comportam como válvula na presença de determinado valor de tensão. Pertencem a esse grupo os para-raios de carboneto de silício (SiC) e os de óxido de zinco (ZnO).

Os para-raios de carboneto de silício possuem um centelhador que representa uma alta impedância para condições normais de operação. Discos de carboneto de silício evitam a ocorrência de fluxo de corrente de arcos elétricos subsequentes que possam vir a ocorrer no centelhador. A característica V - I desse para-raios é definida pelo centelhador e pelos discos de carboneto de silício.

Já os para-raios de óxido de zinco são dispositivos mais modernos e funcionam sem a necessidade da presença de centelhadores. Seu comportamento altamente não linear é proporcionado por cápsulas de cerâmica que contém pó de óxido de zinco, além de traços de outros metais. A Figura 2.15 apresenta as características V – I dos dois tipos de para-raios. Verifica-se a diferença entre os valores de corrente escoada por cada um.



Figura 2.15 : Característica V-I não linear de para-raios de óxido de zinco (ZnO) e de carboneto de silício (SiC) (Fonte: Martinez-Velasco e Castro-Aranda, 2010).

Apesar da existência desses dois tipos de para-raios, os de óxido de zinco são de uso mais comum. Por isso têm despertado maior interesse de engenheiros em estudos para melhoria de coordenação de isolamento. Dessa forma, os para-raios de óxido de zinco são utilizados nesse trabalho, com o objetivo de avaliar seu comportamento em estudos de proteção do isolamento de cabos subterrâneos.

Nesse capítulo, são apresentadas algumas técnicas de modelagem de pararaios ZnO para estudos de transitórios de alta frequências presentes no atual estado da arte. Também são definidas as formas de cálculo dos parâmetros referentes a cada circuito equivalente e destacadas as suas aplicações e peculiaridades.

### 2.5.2 - Modelo IEEE

Esse modelo foi idealizado por Durbak em 1985 e desenvolvido pelo IEEE Working Group 3.4.11 em 1992 e é adotado pelo IEEE em seus comitês e padrões. A Figura 2.16 apresenta seu circuito equivalente. Ele incorpora duas resistências não lineares  $A_0 e A_1$ , duas resistências lineares  $R_0 e R_1$ , cada uma em paralelo com um indutor linear  $L_0 e L_1$ . Em paralelo com  $A_0$  também existe um capacitor  $C_0$ . É possível observar na Figura 2.16 que a característica V - I da resistência  $A_0$  é de 20% a 30% superior à característica de  $A_1$  (Martinez-Velasco e Castro-Aranda, 2010). O ramo formado por  $R_1 e L_1$  constitui um filtro passa-baixa sensível a quedas de tensão, de forma que a impedância equivalente para baixas frequências se torna muito pequena a ponto de  $A_0 e A_1$  estarem em paralelo. Já para altas frequências, o filtro apresenta grande impedância e a corrente de descarga é distribuída pelos dois ramos não lineares (Martinez-Velasco e Castro-Aranda, 2010).



Figura 2.16: Circuito equivalente do modelo dependente da frequência do IEEE (Fonte: IEEE Working Group 3.4.11, 1992).

Os parâmetros do circuito equivalente da Figura 2.16 são calculados a partir de fórmulas que levam em consideração a altura do para-raios, o número de colunas dos discos do para-raios e as curvas da Figura 2.17 (IEEE Working Group 3.4.11, 1992).



Figura 2.17: Característica não linear das resistências A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub> (Fonte: IEEE Working Group 3.4.11, 1992).

A Tabela 2.2 apresenta os valores em p.u. de  $A_0$  e  $A_1$  em termos da tensão de descarga devida à uma corrente de 10 kA e 8/20 µs. Esses valores são apresentados por D.W.Durbak (1985).

Corrente	Tensão (por ur	nidade de V <sub>10</sub> )
(kA)	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>
0,01	0,875	0,681
1	1,056	0,856
5	1,131	
10	1,188	
15	1,244	
20	1,313	1,000

Tabela 2.2: Valores de A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub>, referentes a Figura 2.17. (Fonte: IEEE Working Group 3.4.11, 1992).

As informações necessárias para cálculo dos parâmetros do circuito equivalente são:

d: Altura do para-raios, em metros;

n: Número de colunas paralelas dos discos do ZnO;

 $V_{10}$ : Tensão residual devida a uma corrente de 10 kA e 8/20  $\mu$ s, em kV;

 $V_{ss}$ : Tensão de surto de manobra, em kV.

O cálculo dos parâmetros é realizado por meio das fórmulas seguintes (IEEE Working Group 3.4.11, 1992):

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} [\mu H]$$
  $R_0 = 100 \frac{d}{n} [\Omega]$  (57)

$$L_1 = 015 \frac{d}{n} [\mu H]$$
  $R_1 = 65 \frac{d}{n} [\Omega]$  (58)

$$C_0 = 100 \frac{n}{d} [pF]$$
(59)

Após o cálculo inicial dos parâmetros do circuito equivalente a partir das equações (57) a (59), é necessário fazer ajustes em  $A_0$  e  $A_1$  para corrigir a tensão de surto de manobra. Também, é necessário ajustar o valor de  $L_0$  para corrigir o valor da tensão residual, que deve ser o mais próximo possível do valor de  $V_{10}$ . Por fim, verifica-se que o modelo IEEE pode ser obtido a partir de dados construtivos do pararaios. A partir dele, é possível obter resultados satisfatórios para correntes de descarga com tempos de frente de onda entre 0,5 e 45 µs (IEEE Working Group 3.4.11, 1992).

## 2.5.3 - Modelo de Pinceti e Giannettoni (Modelo Simplificado)

Em 1999, Pinceti e Giannettoni desenvolveram uma simplificação para o modelo IEEE. O circuito equivalente referente a este modelo, também conhecido como modelo simplificado, segue na Figura 2.18.



Figura 2.18: Circuito equivalente do modelo simplificado (Fonte: Pinceti e Giannettoni, 1999).

Em uma comparação entre os circuitos equivalentes da Figura 2.16 e Figura 2.18, nota-se que neste modelo a capacitância é eliminada, uma vez que sua contribuição para o comportamento do modelo é desprezível. Além disso, as resistências  $R_0$  e  $R_1$  são substituídas por uma resistência R entre os terminais de entrada, apenas com o objetivo de eliminar eventuais erros numéricos. Apesar destas alterações, o princípio de operação deste modelo é bastante semelhante ao do modelo IEEE (Pinceti e Giannettoni, 1999).

Os parâmetros deste modelo são obtidos por meio das seguintes regras:

- i. Os valores de  $A_0$  e  $A_1$  são obtidos a partir de suas curvas características. Essas curvas são baseadas nas curvas utilizadas no modelo IEEE e têm como referência o pico de tensão residual medido durante uma corrente de descarga do tipo corrente de 10 kA e 8/20 µs;
- ii. Recomenda-se  $R = 1 M\Omega$  para garantia de convergência dos cálculos;
- iii. As indutâncias L<sub>0</sub> e L<sub>1</sub> são calculadas a partir das seguintes equações:

$$L_0 = \frac{1}{12} \frac{V_{r(1/T_2)} - V_{r(8/20)}}{V_{r(8/20)}} V_n$$
(60)

$$L_{1} = \frac{1}{4} \frac{V_{r(1/T_{2})} - V_{r(8/20)}}{V_{r(8/20)}} V_{n}$$
(61)

onde:

V<sub>n</sub> é a tensão nominal do para-raios;

 $V_{r(1/T_2)}$  é a tensão residual para surtos de corrente de frente rápida de 10 kA. O tempo de descida T<sub>2</sub> é fornecido pelo fabricante;

 $V_{r(8/20)}$  é a tensão residual para surtos de corrente do tipo 8/20 µs de 10 kA.

A Tabela 2.3 apresenta a característica V – I de  $A_0$  e  $A_1$  ajustada para o modelo de Pinceti.

Tabela 2.3: Valores de A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub>, referentes a Figura 2.18. (Fonte: Pinceti e Giannettoni, 1999).

Corrente (kA)	A <sub>0</sub> (p.u.)	A <sub>1</sub> (p.u.)
2.10-6	0,810	0,623
0,1	0,974	0,788
1	1,052	0,866
3	1,108	0,922
10	1,195	1,009
20	1,277	1,091

É possível observar que a principal característica deste modelo é que ele não leva em conta as características físicas do para-raios, apenas seus dados elétricos. Com esse modelo é possível calcular tensões residuais com erros menores que 4,5 % em relação a tensões residuais medidas em ensaios de para-raios de diferentes fabricantes, a partir de correntes de descargas com tempos de frente de onda de 1 a  $30 \ \mu s$  (Pinceti e Giannettoni, 1999). Esse erro decresce para ondas com tempo de frente de onda de até 8  $\mu s$ .

## 2.5.4 - Modelo de Fernández e Díaz

É possível notar, a partir da descrição do modelo IEEE, que seus resultados precisam passar por uma série de iterações para alcançar um bom nível de exatidão. Essas iterações são necessárias, pois os parâmetros não são perfeitamente obtidos a partir dos dados construtivos do para-raios. Dessa forma, faz-se necessário realizar ajustes nos parâmetros de seu circuito equivalente, por meio de realização de tentativas e testes na tensão residual resultantes de surtos de chaveamento e de descargas atmosféricas, o que torna o processo de modelagem trabalhoso.

O modelo simplificado, por sua vez, conta com o inconveniente de necessitar de dados elétricos do catálogo do para-raios, que nem sempre estão disponíveis. Dessa forma, mesmo com a praticidade do modelo, seu uso se torna inviável caso falte alguma informação na ficha de dados do equipamento. Nesse sentido, Fernández e Díaz em 2001 desenvolveram um novo modelo, cujos parâmetros são também definidos pelas características elétricas informadas no catálogo do para-raios. Seu circuito equivalente está representado na Figura 2.19.



Figura 2.19: Circuito equivalente do modelo de Fernandez e Diaz.

Assim como o modelo simplificado, há apenas um indutor entre as resistências não lineares. A resistência entre os terminais do circuito também possui a mesma finalidade do modelo simplificado, ou seja, evitar erros numéricos. Além disso, é considerada uma capacitância em paralelo com essa resistência.  $L_0 = R_0$  são novamente desprezados, porém o princípio de funcionamento ainda se assemelha ao do modelo IEEE (Fernandez e Diaz, 2001).

Nesse modelo, as curvas características de  $A_0$  e  $A_1$  são obtidas a partir da característica  $V_{(8/20)} - I_{(8/20)}$  do para-raios, informada pelo fabricante. Para tal, observa-se a condição de que a corrente que flui por  $A_0$  deve ser uma taxa de 0,02 da corrente que flui por  $A_1$ , denominada  $\gamma$ . Deve-se observar que a soma das duas

parcelas da corrente deve sempre resultar em  $I_{(8/20)}$ . Essa taxa deve se manter constante para toda faixa de valores de tensão da característica de proteção do pararaios. Esta condição garante que acréscimos percentuais na tensão entre os terminais do modelo dependem apenas da indutância  $L_1$  (Fernandez e Diaz, 2001).

Após obtenção da característica de  $A_0$  e  $A_1$ , o próximo passo é calcular o acréscimo percentual de tensão residual, denominado  $\Delta V_{res}$ %, a partir das tensões residuais constantes na característica  $V_{(8/20)} - I_{(8/20)}$  do para-raios e da tensão residual para descarga de corrente com tempo de frente de onda de valor  $T_1$ , a partir da corrente nominal do equipamento. A fórmula é dada em (62).

$$\Delta V_{\rm res}\% = \frac{V_{\rm In(T_1)} - V_{\rm In(8/20)}}{V_{\rm In(8/20)}} \cdot 100$$
(62)

As curvas da Figura 2.20 apresentam os incrementos percentuais da tensão residual, obtidas em função de diferentes valores de  $L_1$  e de  $T_1$ , para uma corrente nominal de 10 kA, a partir de simulações realizadas no ATP. Por meio destas curvas é possível obter diretamente o valor de  $L_1$ , a partir de  $T_1$  e de  $\Delta V_{res}$ %.



Figura 2.20: Curvas de seleção de  $L_1$ , para elementos de corrente nominal de 10 kA. (Fonte: Fernandez e Diaz, 2001).

O que se obtém por meio da Figura 2.20 é a indutância de apenas um bloco do para-raios, a partir de sua tensão nominal. O próximo passo é estender esse cálculo para o equipamento completo. Para tal, é calculado um fator dado pela razão entre a tensão residual do para-raios completo e a tensão residual de um bloco elementar do equipamento em sua tensão nominal, como segue em (63).

$$n = \frac{V_{In(8/20)} \text{ (Para-raios completo)}}{V_{In(8/20)} \text{ (Bloco elementar)}}$$
(63)

onde n é basicamente o número de blocos elementares a serem dispostos em série. A Figura 2.21 ilustra o método. Como os blocos são idênticos, a queda de tensão sobre cada um é igual e, por isso, não há fluxo de corrente entre os ramos de  $A'_0 e A'_1$ , ou seja, nos pontos  $P_1, P_2, ... P_{n-1}$  na Figura 2.21 (a), em que as indutâncias dos blocos são identificadas por L'<sub>1</sub>. A Figura 2.21 (b) apresenta o circuito equivalente, em que a indutância L<sub>1</sub> é o equivalente série das indutâncias L'<sub>1</sub> de cada bloco. Este circuito reproduz a característica V - I dada no catálogo do fabricante do para-raios. A capacitância entre os terminais é calculada por:

$$C_0 = \frac{100}{d} \tag{64}$$

onde d é a altura total do para-raios, em metros.  $C_0$  está em pF. Finalmente, a resistência R deverá ser de 1 M $\Omega$  para para-raios de média tensão e de 10 M $\Omega$  para para-raios de alta tensão, para que sejam evitadas oscilações numéricas durante as simulações. Um exemplo de aplicação deste modelo pode ser verificado em Fernández e Diaz (2001).



Figura 2.21: Dedução do circuito equivalente de um para raios ZnO completo. (Adaptado de Fernandez e Diaz, 2001).

Como é possível observar, o diferencial deste modelo é que ele utiliza apenas dados constantes no catálogo do fabricante do para-raios. Entretanto, caso as informações não estejam disponíveis, elas podem ser obtidas por meio de medidas experimentais. Dessa forma o modelo se mostra mais versátil, sem que haja complicações no método de obtenção de seus parâmetros, se forem comparados com os métodos referentes aos modelos IEEE e o simplificado. Nesse método também não há necessidade de realização de iterações, como é o caso do modelo IEEE. Por fim, este modelo apresenta erros máximos de apenas 1,7 % no cálculo da tensão residual de para-raios de média e alta tensões nominais, e para frentes de onda de 1 µs a 8 µs. Portanto, esse modelo se mostra apropriado para estudos de coordenação de sobretensões, assim como os modelos descritos anteriormente.

Para finalizar a descrição dos modelos IEEE, de Pinceti e de Fernández, a Tabela 2.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos em simulações realizadas por Christodoulou *et al.* (2008).

		Tensão Residual (kV)						
I(kA)	Catálogo do Fabricante	Modelo IEEE	e (%)	Modelo de Pinceti-giannettoni	e (%)	Modelo de Fernandez-Diaz	e (%)	
5	60,80	61,73	1,53	61,17	0,61	61,94	1,88	
10	65,20	66,41	1,86	65,98	0,78	66,57	2,10	
20	71,20	72,18	1,38	71,82	0,87	72,65	2,04	

Tabela 2.4: Tensão residual e erro relativo para cada modelo. (Fonte: Christodoulou *et al.* 2008).

# 2.6 - Subestações

## 2.6.1 - Introdução

Os transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão podem possuir frequências que variam entre alguns kHz até dezenas de MHz e são causados principalmente por descargas atmosféricas. Seu estudo é fundamental para o correto dimensionamento de linhas de transmissão e de subestações, além das proteções do sistema elétrico. A partir deste estudo é que pode ser caracterizada a magnitude das sobretensões decorrentes das descargas atmosféricas, para posterior definição dos requisitos de isolação e os valores críticos da corrente de descarga que causam sua ruptura.

No âmbito deste estudo é fundamental que todos os elementos do sistema em questão estejam devidamente modelados. Esses elementos compreendem as linhas aéreas, cabos subterrâneos, torres, postes, isoladores e equipamentos da subestação (SE).

A seguir são descritos os modelos de alta frequência utilizados para reprentação dos principais equipamentos de uma subestação elétrica.

#### 2.6.2 - Barramentos, condutores e cabos

Os barramentos e condutores com comprimento superir a 3,0 metros, que se encontram no interior da subestação, são modelados por parâmetros distribuídos sem transposição e são representados por meio de suas impedâncias de surto. Para comprimentos inferiores, o segmento deve ser modelado a parâmetro concentrado, por meio de uma indutância de 1  $\mu$ H/m. É importante observar que o ajuste do passo de tempo utilizado nas simulações deve estar de acordo com condutor de menor comprimento (Imece *et al.*, 1996).

Já no caso dos cabos, a modelagem é realizada sempre por parâmetros distribuídos. Valores típicos de impedância de surto variam de 30 a  $60 \Omega$ , com velocidade de propagação de 1/3 a 1/2 da velocidade da luz (Imece *et al.*, 1996).

# 2.6.3 - Disjuntores, transformadores de potência e transformadores de instrumentação e demais equipamentos

Para os demais equipamentos da subestação, a modelagem para altas frequências é realizada por meio de suas capacitâncias parasitas com relação a terra. A Figura 2.22 apresenta circuitos equivalentes de disjuntores a tanque morto (em que a unidade de comutação está localizada dentro de um recipiente metálico que é mantido ao potencial de terra) e a tanque vivo (em que a unidade de comutação está localizada dentro de linha). Valores mínimos de capacitância que devem ser utilizados para estudos de descargas atmosféricas para diferentes equipamentos de uma subestação, caso essa informação não seja fornecida pelo fabricante, seguem na Tabela 2.5. Para distâncias de até 5 metros entre equipamentos da subestação, as suas respectivas capacitâncias podem ser agrupadas, para simplificação. Para chaves seccionadoras e disjuntores, devem ser convenientemente adicionadas novas capacitâncias ao modelo, caso o equipamento possua mais de um suporte. Seus estados de aberto e fechado são modelados pela adição de chaves ideais aos seus circuitos equivalentes.



Figura 2.22: Representação de disjuntores. (a) Tanque morto; (b) Tanque vivo. (Adaptado de: Imece *et al.*, 1996).

No caso de transformadores, uma modelagem mais conservadora pode ser realizada por meio de um circuito aberto. Para aumentar o nível de exatidão do modelo de um transformador, podem ser consideradas as capacitâncias dos enrolamentos e das buchas as quais estão ligados esses enrolamentos. Valores utilizados para essas capacitâncias são fornecidos pelo IEEE e podem ser encontrados em Greenwood (1991). Uma resistência com valor igual à impedância de surto do enrolamento pode ser colocada em paralelo com a capacitância.

	Capacitância ao solo (pF)			
Equipamento	115 kV	400 kV	765 kV	
Chave seccionadora	100	200	160	
Disjuntores (Tanque Morto)	100	150	600	
Isoladores de sustentação de barramentos	80	120	150	
Transformadores de potencial capacitivos	8000	5000	4000	
Transformadores de potencial magnéticos	500	550	600	
Transformadores de corrente	250	680	800	
Autotransformadores*	3500	2700	5000	

Tabela 2.5: Valores mínimos de capacitância a serem utilizados para estudos de descargas atmosféricas. (Adaptado de: Imece *et al.*, 1996).

\* Capacitância também depende da potência ativa.

Os modelos de transformadores descritos por Morched *et al.* (1993) podem determinar com maior exatidão os níveis de tensão em um grupo de terminais para uma dada tensão em outro grupo de terminais. Entretanto, seu uso é mais recomendado para estudos 'referentes a barramentos de geração.

#### 2.6.4 - Isoladores e suportes de barramentos

As estruturas de suporte de barramentos podem ser modeladas por parâmetros distribuídos, com suas impedâncias de surto calculadas a partir de suas características geométricas. A velocidade de propagação a ser considerada é a velocidade da luz. Resistências de aterramento no interior da subestação podem atingir valores próximos de 10  $\Omega$ . Simulações comparativas mostram que os suportes dos barramentos não causam impactos nos resultados e podem ser desprezados (Imece *et al.*, 1996). Entretanto, a capacitância dos isoladores deve ser representada, uma vez que as capacitâncias presentes em uma subestação contribuiem significativamente na alteração da forma de onda das sobretensões atmosféricas.

# 2.7 - Requisitos para coordenação de isolamento

A suportabilidade dos isolamentos de uma linha de transmissão deve ser definida em função das diversas formas de perturbações a que os elementos do sistema estão sujeitos. Normalmente, consideram-se os seguintes tipos de solicitações (Almeida, 2013):

- Tensões em regime permanente à frequência industrial: Os isolamentos do sistema devem ser garantidos para operação normal do sistema, em condições ambientais normais;
- Sobretensões temporárias: Os isolamentos devem ser garantidos na ocorrência de defeitos ou manobras em disjuntores. Essas sobretensões podem durar de 20 ms a 1 hora;
- Sobretensões transitórias de frente lenta: Os isolamentos devem ser garantidos na ocorrência de manobras de ligação, que podem apresentar tempos de subida de 20 a 5000 µs;
- Sobretensões transitórias de frente rápida: Os isolamentos devem ser garantidos na ocorrência de descargas atmosféricas. Os tempos de subida estão compreendidos entre 0,1 e 20 µs.

Entretanto, quando os níveis de tensão no sistema superam os valores máximos de suportabilidade, pode ocorrer uma ruptura de isolamento. Ocorrências de *flashover* e *backflashover*, cujos mecanismos estão descritos na seção 2.1.3, determinam uma das principais causas de ruptura de isolamento em linhas de transmissão. Conforme o padrão IEEE nº 1243 (1997b), a ocorrência da ruptura dielétrica devido à ocorrência de descargas atmosféricas depende basicamente de três fatores:

- 1. Características da onda de tensão decorrente da descarga atmosférica;
- 2. Tensão instantânea na linha no momento da descarga;
- Suportabilidade das isolações presentes na linha, como cadeia de isoladores e cabos isolados.

O número de isoladores, por exemplo, influencia diretamente a definição do Nível Básico de Isolamento do sistema. O mesmo ocorre com a máxima solicitação dielétrica permitida em cabos isolados, definida no catálogo do fabricante, cabos estes utilizados em seções subterrâneas de linhas de transmissão. O nível de isolamento desses elementos impacta diretamente na taxa de *flashover* e *backflashover* da linha. Tal fato justifica a intenção deste trabalho em investigar as máximas sobretensões atmosféricas sobre cabos subterrâneos e os meios para coordenação de seu isolamento.

Segundo o IEEE, em seu padrão C62.82.1 (2010), o Nível Básico de Isolamento, ou NBI, refere-se à capacidade dielétrica da isolação, expressa em termos do valor de crista de um impulso atmosférico padrão. Normalmente, as isolações do sistema são dimensionadas de forma a garantir uma margem, definida como suficiente, entre a sobretensão máxima prevista e o NBI adotado para o sistema. Nesse sentido, o Operador Nacional do Sistema (ONS), em suas *Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão* (2013), determina em suas diretrizes para estudo de coordenação de isolamento, que a avaliação dos níveis de tensão no sistema elétrico decorrentes da incidência direta de descargas atmosféricas, tanto nos condutores fase quanto nos cabos para-raios, deve considerar uma margem de segurança de 15% para os isolamentos de equipamentos e elementos do sistema elétrico, conforme recomendado pela norma de coordenação de isolamento. Esse critério tem como objetivo compensar os aspectos de envelhecimento do isolamento durante sua vida útil, as características de proteção dos para-raios e as aproximações consideradas nos cálculos e simulações (ONS, 2013).

O critério adotado acima é recomendado pelo International Electrotechnical Commission (IEC), em sua norma internacional de coordenação de isolamento, IEC-60071-2 (1996). A IEC, em outra norma, a IEC-60071-1 (2006), define os princípios gerais, definições e regras que a comissão considera relevante, para realização da coordenação de isolamento. Esta norma posteriormente sofreu alterações, realizadas pela Amendement 1 (2010). Este documento apresenta, entre outras informações, uma lista de valores normalizados para tensões suportáveis nominais de impulso. Esta lista segue na Tabela 2.6. O valor a ser selecionado deve ser maior ou igual à tensão suportável requerida, que é obtida a partir das sobretensões mais representivas que ameaçam o isolamento, inclusive sobretensões de frente rápida, que têm origem em descargas atmosféricas (IEC, 2006).

Tabela 2.6: Valores de pico, em kV, normalizados para as tensões suportáveis nominais de impulso (Adaptado de IEC, 2010).

2	20	75	145	250	450	750	1050	1425	1800	2250	2700
4	40	95	170	325	550	850	1175	1550	1950	2400	2900
6	60	125	200	380	650	950	1300	1675	2100	2550	3100

A norma IEC-60071-1 também propõe níveis de isolamento para equipamentos, cadeia de isoladores e cabos isolados, em função das tensões máximas de sistemas

de alta e extra-alta tensão. A Tabela 2.7 apresenta as tensões normalizadas suportáveis a impulso atmosférico, propostas para sistemas de alta tensão, com tensões que variam entre 3,8 kV e 245 kV, adaptada de norma IEC-60071-1.

Tensão máxima do equipamento kV (valor em r.m.s)	Tensão nominal suportável a impulso atmosférico kV (Valor de pico)	Tensão máxima do equipamento kV (valor em r.m.s)	Tensão nominal suportável a impulso atmosférico kV (Valor de pico)
2.0	20	100	380
3,0	40	100	450
7.2	40	122	450
7,2	60	125	550
	60		450
12	75	145	550
	95		650
175	75		550
17,5	95	170	650
	95		750
24	125		650
	145		750
26	145	245	850
	170		950
52	250		1050
72,5	325		

Tabela 2.7: Nível de isolamento padrão para sistemas de alta tensão (Adaptado de IEC, 2006).

Outra norma reconhecida internacionalmente acerca da padronização para estudos de coordenação de isolamento é a IEEE C62.82.1 (2010). De forma semelhante à norma anterior, os níveis de isolamento nominal são selecionados em listas de tensões suportáveis de isolamento normalizadas. Os níveis escolhidos deverão ser aqueles que garantam as margens de segurança adotadas, acima dos esforços dielétricos do sistema, resultantes das sobretensões. No caso de descargas atmosféricas, o NBI dos equipamentos, bem como da cadeia de isoladores e dos cabos isolados, deve ser selecionado de forma a garantir a margem de 15%, acima das solicitações dielétricas decorrentes de sobretensões atmosféricas. A Tabela 2.8 apresenta a relação de níveis básicos de isolação em face de impulsos atmosféricos, adaptado da norma IEEE C62.82.1 (2010).

10	60	125	350	750	950	1300	1800	2300	2800
20	75	150	450	825	975	1425	1925	2425	2925
30	95	200	550	850	1050	1550	2050	2550	3050
45	110	250	650	900	1175	1675	2175	2625	

Tabela 2.8: Valores de pico, em kV, normalizados para as tensões suportáveis nominais de impulso (Adaptado de IEEE, 2010).

A norma IEEE C62.82.1, assim como a norma IEC-60071-1, também organiza níveis básicos de isolamento em função das tensões máximas de sistemas de alta e extra-alta tensão. A Tabela 2.9 apresenta as tensões normalizadas suportáveis a impulso atmosférico, propostas para sistemas de alta tensão, com tensões que variam entre 15 kV e 242 kV, adaptada de norma IEEE C62.82.1.

Tabela 2.9: Tensão nominal suportável a impulso atmosférico para sistemas de alta tensão (Adaptado IEEE, 2010).

Tensão máxima do sistema (Tensão de Linha) (kV, rms)	Tensão nominal suportável a impulso atmosférico kV (KV, valor de pico)	Tensão máxima do sistema (Tensão de Linha) (kV, rms)	Tensão nominal suportável a impulso atmosférico kV (KV, valor de pico)
15	95		450
15	110	145	550
26.2	125		650
20,2	150		550
26.2	150	169	650
30,2	200		750
48,3	250		650
72 5	250		750
/ 2,5	350	242	825
	350	242	900
121	450		975
	550		1050

De uma forma geral, as duas normas são muito similares (Almeida, 2013). Entretanto, para determinação das tensões suportáveis de isolamento, inclusive do nível básico de isolação frente a descargas atmosféricas, a norma IEC-60071-1 propõe obter as tensões suportáveis de coordenação e, a partir destas tensões, determinar as tensões suportáveis requeridas, mediante utilização de fatores de compensação. Já a norma IEEE C62.82.1 estabelece um método mais simplificado, em que é proposta uma comparação entre as ameaças e a suportabilidade dielétrica, adotando uma margem de segurança. A determinação das ameaças, seleção do nível de isolamento padrão e imposição de margem de segurança procedem de forma semelhante nas duas normas. Entretanto, a norma da IEC apresenta uma metodologia mais estruturada. Desta forma, as normas e diretrizes brasileiras acerca de estudos de coordenação de isolamento no país são baseadas nos trabalhos da IEC.

Por fim, observa-se na Tabela 2.7 e Tabela 2.9 que, para sistemas que operam em 138 kV, como o sistema investigado nesse trabalho, o nível básico de isolação máximo a ser adotado para cadeia de isoladores, cabos isolados e equipamentos é de 650 kV. Portanto, para implementação da seção subterrânea, devem ser adotados cabos isolados com NBI o mais próximo possível desse valor. O mesmo vale para as cadeias de isoladores e equipamentos do sistema. Por consequência da margem de segurança de 15 % determinada pelas diretrizes da ONS, a sobretensão máxima admitida para os cabos subterrâneos é de 552,5 kV. Dessa forma, qualquer sobretensão atmosférica superior a esse valor sobre os cabos, deve se mitigada por meio da utilização de para-raios e demais formas de proteção. Este é o foco do presente trabalho.

# 2.8 - Programa de transitórios eletromagnéticos ATP/EMTP

O estudo referente a transitórios eletromagnéticos envolve a investigação de diversos fenômenos responsáveis por causar variações abruptas de tensão e corrente em sistemas elétricos, que antes se encontravam em regime permanente. Nesse sentido, alguns dos principais fenômenos correspondem a operação de disjuntores, faltas do sistema e ocorrência de descargas atmosféricas. As investigações dessa área têm como objetivo detectar as causas para ocorrência de falhas no sistema elétrico e de especificar os dispositivos e as técnicas de proteção do sistema.

Os estudos mencionados acima podem ser realizados por meio de diversas técnicas. Modelos em escala reduzida, por exemplo, foram utilizados no passado para estudo de transitórios em linhas de transmissão decorrentes de descargas atmosféricas ocorridas no topo de uma torre. Simuladores analógicos, cujos componentes são baseados em equivalentes elétricos, permitem realizar o acoplamento de controladores reais e passou por grande evolução quanto a sua automatização e aquisição de dados (Amon Filho e Pereira, 1996). Essas ferramentas são capazes de produzir resultados satisfatórios e, por isso, tiveram papel importante na área de estudos de transitórios eletromagnéticos. Porém, os altos custos envolvidos e as dificuldades em se construir modelos reduzidos, além da baixa capacidade de processamento dos simuladores analógicos, fizeram que essas

técnicas fossem substituídas por simuladores digitais. Pode-se afirmar que simuladores digitais são capazes de modelar qualquer componente do sistema elétrico. Estes são representados por um conjunto de instruções responsáveis pelo cálculo do transitório, que ocorre com grande velocidade de processamento. Ainda, pode se utilizar simuladores híbridos, que empregam modelos digitais e analógicos simultaneamente, por meio da utilização de acoplamentos apropriados (Amon Filho e Pereira, 1996). Esta combinação pode ser proveitosa e, portanto, as duas técnicas são vistas hoje como complementares.

No âmbito do desenvolvimento de simuladores digitais, um trabalho que desempenhou papel fundamental foi o desenvolvido por H. W. Dommel (1969). Neste trabalho, o autor desenvolveu de forma inteligente e eficiente uma estratégia para solução de sistemas elétricos por meio da representação de cada elemento do circuito por um circuito equivalente do tipo Norton, com impedância em paralelo com a fonte de corrente. Nesse método, as soluções são acumuladas no tempo e as soluções futuras dependem desses dados históricos. Essa estratégia foi desenvolvida com base no Método das Características, elaborado por L. Bergeron, em 1961 (Bergeron, 1961), método este específico para simulação de linhas de transmissão. O desenvolvimento dessa técnica trouxe como resultado a criação de um programa de transitórios eletromagnéticos denominado EMTP (do inglês, Electromagnetic Transients Program) que além de conter o modelo de Bergeron, também incorpora inúmeros outros modelos baseados em equivalente de Norton. Inicialmente, o programa era capaz de modelar circuitos monofásicos por meio de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências, linhas sem perdas, uma chave e uma fonte de excitação. O método de cálculo numérico dos elementos concentrados era a regra de integração trapezoidal. Para cálculo das linhas de transmissão, utilizava-se o método de Bergeron (Amon Filho e Pereira, 1996).

Dommel por alguns anos trabalhou no desenvolvimento de diversos modelos que foram incorporados ao EMTP, com ajuda de outros colaboradores. Usuários em diversas partes do mundo também tiveram papel fundamental no desenvolvimento conjunto do programa, o que o tornou uma ferramenta poderosa no estudo de transitórios eletromagnéticos. Na década de 80 uma nova versão do EMTP foi desenvolvida com nome de ATP (do inglês, *Alternative Transients Program*). Atualmente, o ATP dispõe de diversas versões em todo o mundo. Permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por meio da utilização da matriz admitância de barra (Amon Filho e Pereira, 1996). São disponibilizados modelos de elementos concentrados, R-L acoplados, pi-

equivalentes polifásicos, transformadores, elementos não lineares, chaves, fontes, compensadores estáticos, válvulas conversoras, para-raios e linhas de transmissão. No caso de cálculos de linhas de transmissão, diversos modelos foram incorporados ao ATP, desde os mais simples, baseados em ondas trafegantes sem perdas, até modelos mais elaborados, onde são consideradas, por exemplo, variações dos parâmetros da linha com a frequência, como é o caso do modelo de J. Marti (1982). Também há modelos que incorporam o efeito corona nos cabos (Azevedo, 1993), modelos no domínio fasorial (Noda *et al.*, 1996), dentre outros. Além desses modelos, é possível também implementar modelagens específicas por parte do usuário, por meio da linguagem própria de programação do ATP. Também já é possível fazer sua integração com o programa *Matlab*<sup>1</sup>. Além disso, atualmente é disponibilizada uma interface gráfica junto ao ATP, denominada *ATPDraw*, que torna a interação com o programa mais direta e amigável.

O programa ATP é uma ferramenta fundamental na realização de estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência. Este fato é comprovado por anos de utilização no Brasil e pela sua ampla aceitação no âmbito mundial (Amon Filho e Pereira, 1996), inclusive citada pela ONS como ferramenta computacional a ser utilizada em estudos de coordenação de isolamento (ONS, 2013). Sendo assim, esta é a ferramenta computacional utilizada para o desenvolvimento da investigação proposta no presente trabalho.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> MATLAB<sup>®</sup>, The MathWorks (www.mathworks.com), Incorporation, USA.

# **CAPÍTULO 3 - RESULTADOS**

# 3.1 - Introdução

Nos capítulos anteriores são descritos os conceitos preliminares e realizada revisão de literatura necessária à compreensão e ao desenvolvimento deste trabalho. Neste capítulo, são descritos o problema investigado e as características físicas e elétricas de seus elementos. Também, são descritas as premissas adotadas e a metodologia utilizada para estudo das sobretensões atmosféricas na seção subterrânea da linha sob investigação, bem como para determinação das possíveis formas de proteção do isolamento destes cabos, a partir da utilização apropriada de para-raios no sistema.

# 3.2 - Definição do Problema

A Figura 3.1 apresenta o diagrama esquemático de uma linha de transmissão trifásica de 138 kV aérea que possui uma seção subterrânea, consituída de cabos isolados. Neste estudo de caso é investigado o trecho final da linha de alta tensão, que alimenta uma determinada subestação elétrica. Considera-se que essa subestação se encontra em uma região de elevada densidade de descargas atmosféricas. Consideram-se também condições normais de temperatura e pressão.



Figura 3.1: Diagrama do sistema de 138 kV em estudo.

Quanto à ocorrência das descargas atmosféricas, são investigadas a incidência no condutor referente à fase A (o condutor mais elevado em relação ao solo) e no cabo para-raios, no meio do penúltimo vão da linha aérea, entre as torres 1 e 2, como indicado na Figura 3.1, com ocorrência de primeira descarga de retorno e uma descarga subsequente. As respectivas formas de onda de corrente são modeladas por meio de curvas de Heidler, a partir das características das descargas negativas descendentes medidas na Estação do Morro do Cachimbo (Guimarães *et al.*, 2014; Visacro *et al.*, 2004). Os parâmetros necessários à implementação das curvas de Heidler que representam as características principais da mediana dessas correntes de descarga são dadas por De Conti e Visacro (2007) e seguem na Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

k	Primeira descarga de retorno descendente negativa			
	$I_{0k}(kA)$	$n_k$	$\tau_{1k}(\mu s)$	$\tau_{2k}(\mu s)$
1	6	2	3	76
2	5	3	3,5	10
3	5	5	4,8	30
4	8	9	6	26
5	16,5	30	7	23,2
6	17	2	70	200
7	12	14	12	26

Tabela 3.1: Parâmetros referentes à forma de onda de corrente de retorno de primeira descarga.

Tabela 3.2: Parâmetros referentes à forma de onda de corrente de retorno de primeira descarga subsequente.

]r	Primeira descarga subsequente				
K	$I_{0k}(kA)$	$n_k$	$\tau_{1k}(\mu s)$	$\tau_{2k}(\mu s)$	
1	15,8	3,4	0,6	4,0	
7	7,2	2,0	4,0	120,0	

A Figura 3.2 apresenta a silhueta de uma torre metálica autoportante típica utilizada em sistemas de transmissão trifásicos de 138 kV entre fases, circuito simples, adotada nesse trabalho. É considerada uma altura total entre os pés e o topo da torre de 32 metros. Consideram-se vãos de 300 metros entre as torres. Já a seção subterrânea possui 200 metros de comprimento.





A Tabela 3.3 apresenta o posicionamento dos condutores fase e cabo para-raios no alto da torre, tendo o seu centro como referência. Esses dados são utilizados na modelagem da linha no ATP.

Fase	Distância dos condutores para o centro da torre (metros)	Altura dos condutores na torre (metros)	Altura dos condutores no meio do vão (metros)
А	-2,9	28	16
В	2,9	26	14
С	-2,9	24	12
Cabo P.R.	0	32	22

Tabela 3.3: Configuração dos condutores fase e para-raios.

A Tabela 3.4 apresenta a definição dos condutores utilizados nesse trabalho, para linha aérea e subterrânea em 138 kV. A impedância de surto, a velocidade de propagação e a constante de atenuação de cada condutor são obtidas por meio das rotinas de modelagem para linhas de transmissão do ATP. O efeito indutivo dos condutores de descida para aterramento dos para-raios localizados no pátio da subestação é modelado como indutâncias concentradas, de valores iguais a 1,0 μH/m, conforme proposto por Imece *et al.* (1996). Já os para-raios localizados nas torres são aterrados por meio da conexão de seus terminais de saída junto à estrutura metálica da torre de transmissão.

Tabela 3.4: Dados referentes aos condutores utilizados no sistema em estudo.

Linha	Condutor
Linha de Transmissão aérea	1 x CAA Linnet
Cabo para-raios	3/8" HS
Linha de Transmissão subterrânea	1 x 1600 mm <sup>2</sup> XLPE

A Tabela 3.5 apresenta as principais características necessárias à modelagem dos condutores aéreos no ATP.

Tabela 3.5: Dados construtivos do condutor utilizado para implementação da linha aérea.

Cabo AWG/MCM de aço (mm) Exterior do Elétrica c.c. a d	e Corrente
de aço (mm) Cabo (mm) 20°C (Ω/km)	(A)
Linnet 336,4 6,73 18,29 0,2077	510

A Tabela 3.6 apresenta as principais características necessárias à modelagem dos cabos isolados no ATP.

Tabela 3.6: Dados construtivos do cabo isolado utilizado na seção subterrânea.

Seção transversal	Diâmetro	Isolação		Capa Metálica		Diâmetro
	do condutor	Espessura nominal	Diâmetro da isolação	Seção transversal	Diâmetro da capa	exterior do cabo
1600 mm <sup>2</sup>	49,6 mm	22,0 mm	98,8 mm	150 mm <sup>2</sup>	105,4 mm	116,6 mm

A Figura 3.3 apresenta o perfil da seção subterrânea, sem escala, considerado nesse trabalho. As medidas estão em milímetros.



Figura 3.3: Perfil da seção subterrânea do sistema em estudo (medidas em milímetros).

A Figura 3.4 apresenta o desenho de construção do cabo isolado 138 kV, com a descrição de cada uma de suas camadas.



Figura 3.4: Descrição das camadas que constituem o cabo isolado 138 kV.

Conforme a seção 2.4.3, as torres de transmissão são modeladas como linhas de transmissão monofásicas verticais sem perdas. Para tal, a mesma é dividida em seções condutoras verticais, cuja velocidade de propagação considerada é de 80 % da velocidade da luz no vácuo, conforme o diagrama esquemático apresentado na Figura 3.5.


Figura 3.5: Representação esquemática da torre de transmissão, conforme De conti *et al.* (2006), onde Zeq1 > Zeq2 > Zeq3 > Zeq4 e v =  $2, 4 \times 10^8$  m/s.

As suas respectivas impedâncias verticais são calculadas conforme a proposta de De Conti *et al.* (2006) e seguem na Tabela 3.7.

Segmento da torre	Comprimento do segmento (metros)	Impedância do Segmento (Zeq) [Ω]	
1	4,0	289,75	
2	2,0	235,24	
3	2,0	182,2	
4	24,0	130,64	

Tabela 3.7: Comprimento e impedância de surto de cada segmento da torre, conforme De Conti *et al*., (2006).

A modelagem do aterramento elétrico das torres de transmissão é realizada por meio de uma resistência de aterramento, para resistividade do solo de  $1000 \Omega$ .m e cabos contrapeso de 20 metros de comprimento. Dessa forma, o valor previsto e adotado para resistência de aterramento das torres de transmissão é de  $30 \Omega$ , por ser esse um critério de qualidade adotado por diversas concessionárias de energia. Esse critério busca assegurar uma amplitude elevada da onda negativa de reflexão no aterramento e, portanto, uma vigorosa redução na tensão resultante no topo da torre e na cadeia de isoladores (Visacro, 2005).

Com relação aos dispositivos de proteção, a Tabela 3.8 apresenta as características principais do para-raios selecionado para este estudo. Os dados foram retirados do catálogo Siemens (2015).

Característica	Valor
Tensão máxima do equipamento (U <sub>m</sub> )	145 kV
Tensão nominal (U <sub>r</sub> )	132 kV
Tensão de operação contínua (U <sub>c</sub> )	106 kV
Tensão residual máxima (para descargas de 10kA, 8/20 μs)	297 kV
Tensão suportável a impulso atmosférico (1,2/50 μs)	676 kV
Corrente nominal de descarga	10 kA
Capacidade de absorção de energia	1716 kJ
Classe de descarga*	3
Altura do para-raios	1.240 mm
Número de colunas paralelas de discos de óxido de zinco	1

Tabela 3.8: Especificação do para-raios de óxido de zinco utilizado no sistema.

\*: Classe de descarga se refere à capacidade de absorção de energia pelo para-raios de alta tensão. A classe 3 se refere a uma tensão nominal de sistema menor que 420kV, corrente de descarga nominal de 10 kA e capacidade de absorção de energia de 8 kJ/kV da tensão nominal.

Como critério para a avaliação dos resultados das sobretensões nos cabos isolados, é estabelecida uma margem de segurança de 15% com relação à tensão suportável normalizada de impulso atmosférico (ou Nível Básico de Isolação - NBI) definida para esse sistema, de acordo com a orientação das Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão (ONS, 2013) e normas para coordenação de isolamento, conforme seção 2.4.4. Para este estudo é considerado Nível Básico de Isolação de 650 kV. Portanto, é considerada satisfatória uma solicitação dielétrica máxima de 552,5 kV.

## 3.3 - Casos Estudados

Como descrito anteriormente, são analisados nesse trabalho o comportamento do sistema a partir de descargas atmosféricas diretas sobre condutores fase e cabos para-raios, no meio do vão entre as torres 1 e 2. São consideradas as seguintes situações:

- Sistema sem para-raios para proteção da subestação e dos cabos subterrâneos;
- Sistema com para-raios apenas na terminação dos cabos no interior da subestação;
- Sistema com para-raios na terminação dos cabos no interior da subestação e também na sua junção com a linha aérea.

Para tal, as correntes de primeira descarga e descarga subsequente são modeladas por meio de funções de Heidler, como descrito anteriormente. Para modelagem da linha de transmissão e da seção subterrânea, faz-se uso do modelo de J. Marti, por ser o modelo presente no ATP indicado para estudo em altas frequências. Com relação à modelagem dos para-raios, de características elétricas dadas na Tabela 3.8, são utilizados os modelos IEEE e de Pinceti na análise do comportamento do sistema em estudo. Já a subestação é representada a partir dos modelos matemáticos para altas frequências dos disjuntores e do transformador de potência. A Tabela 3.9 apresenta a relação de todos os casos investigados nesse trabalho. Para cada um, são avaliadas as máximas sobretensões sobre os cabos subterrâneos, decorrentes da primeira descarga de retorno e uma descarga subsequente. Apesar da baixa probabilidade de incidência de descargas de parâmetros medianos em condutores fase de uma linha blindada, esta hipótese também é considerada nessa investigação, como estratégia de um estudo conservador acerca das máximas solicitações dielétricas possíveis sobre o sistema. Para os casos de incidência direta sobre o condutor da fase A, considerou-se a presença ou não das cadeias de isoladores em todas as três torres de transmissão.

Caso	Incidência da Descarga	Modelo do ZnO	ZnO Pátio SE	ZnO Torre 3	Caso	Incidência da Descarga	Modelo do ZnO	ZnO Pátio SE	ZnO Torre 3
1.1	_	-	Não	Não	2.1		-	Não	Não
1.2		IEEE	Sim	Não	2.2	Cabo	IEEE	Sim	Não
1.3	faco	IEEE	Sim	Sim	2.3	para-	IEEE	Sim	Sim
1.4	1450	Dincoti	Sim	Sim	2.4	raios	Dincoti	Sim	Sim
1.5	-	Pinceu	Não	Não	2.5		Pinceu	Não	Não

Tabela 3.9: Relação dos casos investigados.

## 3.4 - Implementação no ATP

### 3.4.1 - Modelagem da Descarga Atmosférica

A implementação da descarga atmosférica no ATP é realizada por meio do uso de fontes do tipo Heidler, denomidadas no ATP de Heidler Type 15. Os parâmetros utilizados para modelar as curvas de Heidler de modo a reproduzir as ondas de corrente de primeira descarga e descarga subsequente são apresentadas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2. Em um primeiro momento, esses parâmetros são utilizados para implementação das curvas de Heidler no Matlab. Posteriormente, são extraídos de

cada curva obtida, o pico de corrente real e o respectivo instante de ocorrência. Estes são os valores que devem ser inseridos nos campos "Amplitude" e "T\_f" das fontes do tipo Heidler no ATP, respectivamente. Os demais parâmetros são os mesmos que constam na Tabela 3.1 e Tabela 3.2. A Figura 3.6 apresenta a forma de onda de corrente de retorno de primeira descarga, semelhante à curva mediana obtida nas medições realizadas no Morro do Cachimbo. A Figura 3.7 apresenta a forma de onda de corrente da descarga subsequente.







Figura 3.7: Forma de onda de corrente de retorno de descargas subsequentes, obtida no ATP.

### 3.4.2 - Modelagem da Linha Aérea

A implementação dos condutores da linha aérea no ATP, cujas características são dadas na Tabela 3.5, é realizada por meio da utilização do bloco LCC, na função *Overhead Line.* Os dados de entrada considerados para modelagem da linha por meio do modelo de J. Marti seguem na Tabela 3.10.

Dados	Valor
Resistividade do solo (Ω.m)	1000
Frequencia inicial (Hz)	1,0
Comprimento do vão entre as torres (km)	0,3
Raio interno do condutor fase (cm)	0,673
Raio externo do condutor fase (cm)	1,829
Raio externo do cabo para-raios (cm)	0,914
Resistência "DC" do condutor (Ω/Km)	0,2077
Distância entre o centro dos condutores fase e o solo a partir da torre (m)	28/26/24
Distância entre o centro dos condutores fase e o solo no meio do vão (m)	16/14/12
Distância entre o centro do cabo para-raios e o solo a partir da torre (m)	32
Distância entre o centro do cabo para-raios e o solo no meio do vão (m)	22
Distância do centro dos condutores fase ao eixo da torre (m)	-2,9/2,9/-2,9
Distância do centro do cabo para-raios ao eixo da torre (m)	0

Tabela 3.10: Parâmetros utilizados para modelagem da linha aérea.

Para implementação da linha no modelo proposto também são considerados o efeito pelicular dos condutores e utilização de matriz de transformação real. Adotou-se uma variação da frequência em 7 décadas, com apresentação de 10 pontos por década. A matriz de transformação é calculada para uma frequência de 500 kHz; frequência de regime permanente de 60 Hz.

### 3.4.3 - Modelagem dos Cabos Subterrâneos

A implementação dos condutores da seção subterrânea no ATP, descritos na Tabela 3.6, é realizada por meio da utilização do bloco LCC, na função *Single Core Cable.* Os dados de entrada considerados para modelagem da linha por meio do modelo de J. Marti seguem na Tabela 3.11.

Dados	Valor
Resistividade do solo (Ω.m)	1000
Frequencia inicial (Hz)	1,0
Comprimento (km)	0,2
Raio interno (m)	0
Raio externo (m)	0,0248
Raio total (m)	0,0494
Resistividade do condutor (Ω.m)	1.724x10 <sup>-8</sup>
Permeabilidade magnética relativa do material condutor	0,9999
Permeabilidade magnética relativa do material isolante (Polietileno)	2,3
Permissividade elétrica relativa do material isolante (Polietileno)	2,3
Profundidade dos condutores a partir do topo do reaterro (m)	1,0
Distância entre o centro dos condutores e o centro do envelopamento (m)	-0,8/0/0,8
Posição vertical (m)	0,85

Tabela 3.11: Parâmetros utilizados para modelagem da rede subterrânea.

Da mesma forma que para a linha aérea, adota-se uma variação da frequência em 7 décadas com 10 pontos por década. A matriz de transformação é calculada para uma frequência de 500 kHz e a frequência de regime permanente de 60 Hz.

### 3.4.4 - Modelagem da Subestação

A modelagem da subestação é realizada por meio da inserção no ATP do circuito equivalente para altas frequências dos disjuntores de potência e de um transformador trifásico de potência. Para tal, é utilizado o modelo a parâmetros concentrados do capacitor constante no ATP, com os parâmetros ajustados para estudos em altas frequências, conforme Imece *et al.* (1996). A Figura 3.8 apresenta o circuito equivalente de cada elemento utilizado. É considerada nas simulações a operação normal da subestação no momento de ocorrência da descarga atmosférica; portanto, os disjuntores são considerados fechados.



Figura 3.8: Circuitos equivalentes do: (a) transformador de potência e; (b) do disjuntor de potência, para sistema 138 kV.

### 3.4.5 - Modelagem das Torres de Transmissão e Aterramentos

Como descrito anteriormente, cada torre de transmissão é modelada a partir da sua divisão em seções condutoras verticais cuja velocidade de propagação considerada é de 80% da velocidade da luz no vácuo. Essa velocidade e a impedância de surto de cada elemento conforme a Tabela 3.7 são implementadas no ATP a partir do bloco *LINEZT\_1*.

Quanto às impedâncias de aterramento, é utilizado o bloco *RESISTOR* do ATP para modelá-las em termos de uma resistência a parâmetros concentrados no valor de  $30 \Omega$ , de acordo com a seção 3.2, para resistividade do solo de  $1000 \Omega$ .m e cabos contra-peso de 20 metros. Essa modelagem é adotada para o aterramento das torres. O aterramento dos para-raios de linha é realizado mediante a conexão de suas saídas junto à estrutura metálica da torre de transmissão, por meio de suas mísulas de sustentação. Já os para-raios localizados no interior da subestação, são aterrados por meio de sua conexão junto à malha de aterramento da mesma. Esta, por sua vez, possui resistência de menor valor, devido principalmente a sua maior área de ocupação, além do maior comprimento dos condutores. Dessa forma, adota-se um valor de  $10 \Omega$  para o aterramento dos para-raios no interior da subestação. Este valor está de acordo com valores típicos de malhas de aterramentos apresentados pela norma internacional IEEE Std 80 (2000), referente à segurança em aterramento de subestações elétricas.

#### 3.4.6 - Modelagem dos Para-raios ZnO

#### 1. Modelo IEEE:

Para construção do circuito equivalente referente ao modelo IEEE no ATP, são utilizados, além dos seus blocos de indutância e resistência concentrados, o componente referente à resistência não linear *MOV Type 92*, específico para modelagem de para-raios. Neste componente, é possível carregar os pontos referentes à caracteristica não linear das resistências A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub>, tomando como base os dados constantes na Tabela 2.2. Entretanto, é necessário ajustar estes pontos em função da tensão residual especificada, de 297 kV. Esses pontos seguem na Tabela 3.12. A Tabela 3.13 apresenta os valores calculados para os demais parâmetros do circuito equivalente do modelo IEEE, de forma a representar numericamente no ATP o comportamento do para-raios especificado na Tabela 3.8.

	A0		ŀ	1
I(A)	V(pu)	V(V)	V(pu)	V(V)
10	1,40	259.875	-	-
100	1,54	285.863	1,28	228.319
1.000	1,68	311.850	1,41	252.450
2.000	1,74	322.988	1,48	265.444
4.000	1,80	334.125	1,53	274.725
6.000	1,82	337.838	1,56	278.438
8.000	1,87	347.119	1,59	284.006
10.000	1,90	352.688	1,61	287.719
12.000	1,93	358.256	1,62	289.575
14.000	1,97	365.681	1,64	293.288
16.000	2,00	371.250	1,65	295.144
18.000	2,05	380.531	1,66	297.000
20.000	2,10	389.813	1,67	298.856

Tabela 3.12: Característica V-I de A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub> utilizada para implementação das resistências não lineares do circuito equivalente IEEE.

Tabela 3.13: Valores utilizados para ajuste dos parâmetros do circuito equivalente do modelo IEEE.

Dados	Valor
Indutância L <sub>0</sub> (mH)	0,000248
Indutância L <sub>1</sub> (mH)	0,00186
Resistência $R_0$ ( $\Omega$ )	124
Resistência $R_1$ ( $\Omega$ )	80,6
Capacitância (µF)	8,0645×10 <sup>-5</sup>
Tensão de referência das resistências não lineares (MV)	1,0

A Figura 3.9 apresenta o circuito implementado no ATP para validação do modelo IEEE.



Figura 3.9: Circuito implementado no ATP para validação do modelo IEEE.

A Figura 3.10 apresenta a tensão residual sobre o para-raios conforme modelo IEEE, ajustado conforme parâmetros da Tabela 3.12 e Tabela 3.13, para uma descarga de corrente do tipo 10 kA, 8/20 µs. Verifica-se que a tensão residual máxima obtida é de 296,93 kV, valor bem próximo do especificado pelo fabricante.



Figura 3.10: Tensão residual sobre o para-raios conforme modelo IEEE.

### 2. Modelo simplificado de Pinceti:

Para construção do circuito equivalente referente ao modelo de Pinceti no ATP são utilizados, assim como no modelo IEEE, os seus blocos de indutância e resistência concentrados e o componente referente à resistência não linear MOV Type 92. Neste componente, é possível implementar os pontos referentes à caracteristica não linear das resistências A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub>, tomando como referência os valores que constam na Tabela 2.3. Entretanto, faz-se necessário ajustar estes pontos em função da tensão residual especificada, de 297 kV. Esses pontos seguem na Tabela 3.14. A Tabela 3.15 apresenta os valores calculados e ajustados para cada parâmetro do circuito equivalente do modelo de Pinceti, de forma a representar numericamente no ATP o comportamento do para-raios especificado na Tabela 3.8.

		A0	A1		
I(A)	V(pu)	V(V)	V(pu)	V(V)	
0,002	0,81	240.570	0,623	183.824	
100	0,974	289.278	0,788	232.509	
1.000	1,052	312.444	0,866	255.524	
3.000	1,108	329.076	0,922	272.048	
10.000	1,195	354.915	1,009	297.718	
20.000	1,277	379.269	1,091	321.913	

Tabela 3.14: Característica V-I de A<sub>0</sub> e A<sub>1</sub> utilizada para implementação das resistências não lineares do circuito equivalente de Pinceti.

Tabela 3.15: Valores utilizados para ajuste dos parâmetros do circuito equivalente do modelo de Pinceti.

Dados	Valor
Resistência Linear R (MΩ)	1,0
Indutância $L_0$ (mH)	0,000955752
Indutância $L_1$ (mH)	0,002867257
Tensão de referência das resistências não lineares (MV)	2,5

A Figura 3.11 apresenta o circuito implementado no ATP para validação do modelo de Pinceti.



Figura 3.11: Circuito implementado no ATP para validação do modelo de Pinceti.

A Figura 3.12 apresenta a tensão residual sobre o para-raios conforme modelo de Pinceti ajustado em função dos parâmetros da Tabela 3.15, para uma descarga de corrente do tipo 10 kA, 8/20 µs. Verifica-se uma tensão residual máxima aproximada de 297,13 kV sobre o para-raios, valor bem próximo do especificado pelo fabricante.



Figura 3.12: Tensão residual sobre o para-raios conforme modelo de Pinceti.

### 3.4.7 - Aspectos finais referentes às simulações no ATP

Algumas observações devem ser feitas com relação à viabilização das simulações no ATP. Primeiramente, com relação à eliminação do processo de reflexão das ondas de tensão e corrente na origem da linha, ou seja, antes da torre número 1 (Ver Figura 3.1). Para isso, foi adicionado um bloco LCC anterior ao bloco que representa o vão aéreo entre as torres 1 e 2. Esse bloco representa a continuidade da linha aérea, com comprimento bastante superior ao dos vãos analisados no problema em estudo, de forma que as ondas viajantes nessa direção são refletidas, chegando ao ponto de medição apenas após o tempo considerado na investigação. Todavia, essas ondas são fortemente atenuadas e, assim, a magnitude das ondas refletidas é tão pequena que não exerce inflluência sobre as tensões nos cabos subterrâneos. Nesse sentido, é considerada uma linha aérea de 60 quilômetros antes da torre 1.

Outra consideração é com relação à modelagem da corrente de descarga. Como o canal de descarga não é ideal, por ocorrerem dispersões da corrente de descarga no decorrer do canal para a atmosfera, a corrente de retorno é modelada a partir de uma fonte de corrente não ideal. Para tal, uma resistência de  $1500 \Omega$  é colocada em paralelo com as fontes de corrente que implementam as funções de Heidler.

Para implementação das cadeias de isoladores e representação do mecanismo de ruptura dielétrica sobre os mesmos, é utilizado o bloco *SWITCHVC* do. Para tal, considera-se que a partir do instante inicial da descarga, as chaves deverão fechar seus contatos, que estão posicionados entre as torres de transmissão 1, 2 e 3 e as

Fases A, B e C, desde que as sobretensões nas cadeias de isoladores das torres superem a margem de segurança admitida para o NBI do sistema, ou seja, o valor de 552,5 kV. Essa condição permanece até o final do fenômeno.

Todas as simulações do sistema em estudo são realizadas no ATP em sua versão 6.0, disponibilizada em 2015. O tempo máximo de simulação adotado é de  $200 \,\mu s$ , com passo incremental de  $8,0 \,ns$ .

Por fim, o ponto de medição foi considerado como sendo a terminação trifásica da rede subterrânea no interior da subestação, por ser considerado que a magnitude das sobretensões nesse ponto ser superior a que ocorre na outra extremidade da seção, devido à grande descontinuidade decorrente do efeito capacitivo dos elementos modelados para representação da SE.

# 3.5 – Investigação das solicitações dielétricas sobre o sistema

3.5.1 - Investigação da solicitação dielétrica sobre os cabos subterrâneos devido à ocorrência de falha de blindagem e consequente descarga direta sobre o condutor da fase A

#### Caso 1.1: Sistema sem para-raios:

A Figura 3.13 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos devido à incidência direta da descarga sobre o condutor da fase A (devido à falha de blindagem) e ocorrência de *flashover*, sem a presença das cadeias de isoladores.



Figura 3.13: Circuito implementado no ATP para investigação da incidência da descarga em condutor fase e ocorrência de *flashover*.

A Figura 3.14 apresenta a sobretensão atmosférica nas terminações dos cabos subterrâneos no interior da subestação, sem a utilização de para-raios, para primeira descarga de retorno. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de 10,8 MV na fase A; 2,9 MV na fase B e 2,3 MV na fase C, valores esses bastante superiores à margem mínima de segurança do NBI adotado. Já a Figura 3.15 apresenta a sobretensão atmosférica nas terminações dos cabos subterrâneos, sem a utilização de para-raios, para uma descarga subsequente. Nesta hipótese, ocorre subretensão

máxima, em módulo, de 2,6 MV na fase A; 0,6 MV na fase B e 0,7 MV na fase C, valores esses também superiores às solicitações dielétricas máximas permitidas, apesar de serem bastante inferiores às sobretensões resultantes da primeira descarga.



Figura 3.14: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A.



Figura 3.15: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A.

Caso a presença das cadeias de isoladores seja considerada, bem como a possibilidade de ruptura dielétrica sobre eles devido ao surto atmosférico, as tensões máximas são bastante inferiores. A Figura 3.16 apresenta as sobretensões para primeira descarga, cujos valores máximos são de 672,5 kV para a fase A, 112,6 kV para a fase B e 143,2 kV para a fase C. Já a Figura 3.17 apresenta as sobretensões para descarga subsequente, cujos valores máximos são 255,3 kV para a fase A, 51,4 kV para a fase B e 79,4 kV para a fase C. Verifica-se também o comportamento mais oscilatório dessas ondas.



Figura 3.16: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores.



Figura 3.17: Sobretensões atmosféricas para o caso 1.1, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores.

# Caso 1.2: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação, conforme modelo IEEE:

A Figura 3.18 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos, sem a presença das cadeias de isoladores e na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação, conforme modelo IEEE. Os condutores de descida dos para-raios do pátio da subestação são modelados como indutâncias concentradas de  $1 \,\mu$ H/m. As respectivas resistências de aterramento possuem valor de  $10 \,\Omega$ , por estarem instaladas no interior da subestação.



Figura 3.18: Circuito referente implementação do caso 1.2, conforme modelo IEEE.

A Figura 3.19 apresenta a tensão residual na terminação dos cabos na entrada da subestação, obtidas para essa configuração, no caso de ocorrência de primeira descarga de retorno. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 1.108,0 kV na fase A, 523,8 kV na fase B e 482,5 kV na fase C. Os picos de sobretensão são fortemente atenuados devido à presença dos para-raios, porém a máxima sobretensão na fase A ainda é superior à margem de segurança do NBI adotado.

A Figura 3.20 apresenta a tensão residual na terminação dos cabos na entrada da subestação, obtidas para essa configuração, no caso de ocorrência de uma descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 650,7 kV na fase A, 419,2 kV na fase B e 414,7 kV na fase C. Os picos de sobretensão são atenuados devido à presença dos para-raios, porém a máxima sobretensão na fase A ainda é superior à margem de segurança do NBI adotado.



Figura 3.19: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.



Figura 3.20: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.

Caso a presença das cadeias de isoladores seja considerada, as tensões máximas são bastante inferiores. A Figura 3.21 apresenta as sobretensões para primeira descarga, cujos valores máximos são de 364,2 kV para a fase A, 97,0 kV para a fase B e 145,5 kV para a fase C. Já a Figura 3.22 apresenta as sobretensões para descarga subsequente, cujos valores máximos são 247,0 kV para a fase A, 94,8 kV para a fase B e 102,2 kV para a fase C. Verifica-se também o comportamento mais

oscilatório dessas ondas. Contudo, as tensões obtidas são inferiores ao valor máximo admitido, para utilização de para-raios apenas no pátio da subestação. Portanto, para essa consideração, não há a necessidade de utilização de para-raios na outra extremidade da seção subterrânea.



Figura 3.21: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência de primeira descarga de retorno na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores.



Figura 3.22: Tensões residuais para o caso 1.2, devido a incidência de descarga subsequente na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores.

# Caso 1.3: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação e na junção com a linha aérea, conforme modelo IEEE:

A Figura 3.23 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação e também na sua junção com a linha aérea, conforme modelo IEEE. Verifica-se que o aterramento destes últimos é realizado por meio de sua conexão elétrica junto à torre metálica que os suportam. Novamente são desconsideradas as cadeias de isoladores.



Figura 3.23: Circuito referente implementação do caso 1.3, conforme modelo IEEE.

A Figura 3.24 apresenta as sobretensões nas terminações dos cabos na entrada da subestação, obtidas para essa configuração, na ocorrência de primeira descarga de retorno. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de 464,7 kV na fase A, 186,1 kV na fase B e 219,4 kV na fase C. Os picos de sobretensão são novamente atenuados devido à presença dos para-raios nas duas extremidades da rede subterrânea. Nesta hipótese, a máxima sobretensão em todas as fases atende à margem mínima de segurança do NBI adotado.

A Figura 3.25 apresenta a tensão residual para o caso 1.3, na ocorrência de uma descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 399,8 kV na fase A, 254,5 kV na fase B e 270,4 kV na fase C. Os picos de sobretensão são novamente atenuados devido à presença dos para-raios nas

duas extremidades da rede subterrânea. Assim como para a primeira descarga, a máxima sobretensão em todas as fases também atende à margem mínima de segurança.



Figura 3.24: Tensões residuais para o caso 1.3, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.



Figura 3.25: Tensões residuais para o caso 1.3, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.

# Caso 1.4: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação, conforme modelo de Pinceti:

A Figura 3.26 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação, conforme modelo de Pinceti. Novamente, os condutores de descida dos para-raios do pátio da subestação são modelados como indutâncias concentradas de  $1 \,\mu$ H/m. As respectivas resistências de aterramento possuem valor de  $10 \,\Omega$ .



Figura 3.26: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação, conforme modelo de Pinceti.

A Figura 3.27 apresenta a tensão residual na terminação dos cabos na entrada da subestação, obtidas para essa configuração, no caso de ocorrência de primeira descarga de retorno. A influência das cadeias de isoladores é desconsiderada. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 1.097,3 MV na fase A, 505,7 kV na fase B e 466,1 kV na fase C. Os picos de sobretensão são fortemente atenuados devido à presença dos para-raios, porém a máxima sobretensão na fase A ainda é superior à margem mínima de segurança, assim como ocorre com a utilização do modelo IEEE.

A Figura 3.28 apresenta a tensão residual na terminação dos cabos na entrada da subestação, obtidas para essa configuração, no caso de ocorrência de uma descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 645,3 kV na fase A, 407,2 kV na fase B e 402,4 kV na fase C. Também a partir do modelo de Pinceti, os picos de sobretensão são atenuados devido à presença dos para-raios, porém a máxima sobretensão na fase A ainda é superior à margem mínima de segurança do NBI adotado.



Figura 3.27: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.



Figura 3.28: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência de uma descarga subsequente na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.

Caso a presença das cadeias de isoladores seja considerada, as tensões máximas são bastante inferiores, assim como no caso 1.2. A Figura 3.29 apresenta as sobretensões para primeira descarga, cujos valores máximos são de 349,8 kV para a fase A, 97,6 kV para a fase B e 148,8 kV para a fase C. Já a Figura 3.30 apresenta as sobretensões para descarga subsequente, cujos valores máximos são 251,5 kV para a fase A, 98,9 kV para a fase B e 105,2 kV para a fase C. Verifica-se também o

comportamento mais oscilatório dessas ondas. As tensões obtidas são inferiores ao valor máximo admitido, para utilização de para-raios apenas no pátio da subestação. Portanto, para essa consideração, também não há a necessidade de utilização de para-raios na outra extremidade da seção subterrânea.



Figura 3.29: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência de primeira descarga de retorno na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores.



Figura 3.30: Tensões residuais para o caso 1.4, devido a incidência de descarga subsequente na fase A, com inclusão das cadeias de isoladores.

# Caso 1.5: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação e na junção com a linha aérea, conforme modelo de Pinceti:

A Figura 3.31 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação e também na sua junção com a linha aérea, conforme modelo de Pinceti, desconsiderando a influência das cadeias de isoladores. Novamente, verifica-se que o aterramento destes últimos é realizado por meio de sua conexão elétrica junto à torre metálica que os suportam.



Figura 3.31: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação e na junção com a linha aérea, conforme modelo de Pinceti.

A Figura 3.32 apresenta as tensões residuais obtidas para essa configuração. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 467,1 kV na fase A, 181,8 kV na fase B e 211,5 kV na fase C. Neste caso, assim como no caso de utilização do modelo IEEE, a máxima sobretensão em todas as fases atendem à margem de segurança do NBI adotado.

A Figura 3.33 apresenta a tensão residual na terminação dos cabos na entrada da subestação, obtidas para essa configuração, no caso de ocorrência de uma descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de aproximadamente 414,3 kV na Fase A, 263,7 kV na Fase B 343,3 281,5 kV na Fase C. Nesta hipótese, assim como para o modelo IEEE, a máxima sobretensão em todas as fases também atende à margem mínima de segurança.



Figura 3.32: Tensões residuais para o caso 1.5, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.



Figura 3.33: Tensões residuais para o caso 1.5, devido a incidência de uma descarga subsequente na Fase A, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.

# 3.5.2 - Investigação da solicitação dielétrica sobre os cabos subterrâneos devido à descarga direta sobre o cabo para-raios e ocorrência de *backflashover*

#### Caso 2.1: Sistema sem para-raios:

A Figura 3.34 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos devido à incidência direta da primeira descarga de retorno sobre o cabo para-raios e ocorrência de *backflashover*.



Figura 3.34: Circuito implementado no ATP para investigação da incidência de descarga no cabo para-raios e da ocorrência de *backflashover*, nas torres 1, 2 e 3.

A curva de sobretensão sobre as cadeias de isoladores da torre 1, para ocorrência de primeira descarga de retorno sobre o cabo para-raios, segue na Figura 3.35. Observa-se um pico de aproximadamente 762,9 kV na sobretensão sobre a cadeia de isoladores da fase A. Sobre a cadeia de isoladores da fase B, ocorre um pico de 742,3 kV e sobre a cadeia de isoladores da fase C, 727,1 kV. Todos esses valores são superiores ao limite considerado. Ocorre então o processo de *backflashover* em todas as cadeias de isoladores da torre 1. Valores semelhantes são encontrados para a torre 2, também ocorrendo *backflashover*. Entretanto, não há ruptura de isolalmento nas cadeias de isoladores da torre 3, uma vez que as sobretensões máximas sobre as suas cadeias de isoladores fase da linha mediante a ocorrência de ruptura dielétrica nas cadeias de isoladores das torres 1 e 2.



Figura 3.35: Sobretensão atmosférica sobre as cadeias de isoladores da torre 1, devido à primeira descarga.

A Figura 3.36 apresenta as sobretensões, nos condutores das fases A, B e C, sobre as terminações dos cabos subterrâneos no interior da subestação. Observa-se um pico de sobretensão de 145,1 kV na fase A, 122,2 kV na fase B e 709,2 kV na fase C. Verifica-se que na fase C, a sobretensão atmosférica supera a margem de segurança, cujo valor é 552,50 kV. Faz-se necessário então a inserção de para-raios para proteção da isolação dos cabos subterrâneos também frente à incidência da primeira descarga de retorno sobre o cabo para-raios e ocorrência de *backflashover*.



Figura 3.36: Sobretensões nos condutores das fases A, B e C, para o caso 2.1, devido à primeira descarga de retorno.

A Figura 3.37 apresenta as sobretensões sobre as cadeias de isoladores da torre 1, devidas à incidência de descarga subsequente sobre o cabo para-raios, no meio do vão entre as torres 1 e 2. Obteve-se uma sobretensão de 541,6 kV na cadeia de isoladores da fase A, 505,2 kV para a fase B 477,2 kV para a fase C. Todos os valores atendem à margem mínima de segurança. Portanto, não ocorre processo de *backflashover*. Entretanto, é observada uma pequena sobretensão nos condutores fase, provavelmente devida ao processo de indução eletromagnética promovida pela corrente de descarga que trafega pelo cabo para-raios e pelas torres. A Figura 3.38 apresenta as sobretensões na terminação dos cabos subterrâneos no interior da subestação. As máximas sobretensões observadas são 23,7 kV na fase A, 29,6 kV na fase B e 33,6 kV na fase C. Verifica-se que esses valores não superam a margem de segurança adotada, não exigindo presença de para-raios para proteção dos cabos subterrâneos, nesta hipótese.



Figura 3.37: Sobretensão atmosférica sobre as cadeias de isoladores da torre 1, devido à descarga subsequente.



Figura 3.38: Sobretensões nos condutores das fases A, B e C, para o caso 2.1, devido à descarga subsequente.

# *Caso 2.2: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação, conforme modelo IEEE:*

A Figura 3.39 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação, na ocorrência de *backflashover* nas cadeias de isoladores, devido à primeira descarga de retorno. Os condutores de descida dos para-raios da subestação são modelados como indutâncias concentradas de 1  $\mu$ H/m. As respectivas resistências de aterramento possuem valor de 10  $\Omega$ .



Figura 3.39: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação, conforme modelo IEEE.

A Figura 3.40 apresenta as sobretensões obtidas para essa configuração, para primeira descarga de retorno. Observa-se um pico de 103,9 kV na Fase A, 105,5 kV na Fase B e 349,3 kV na Fase C. Neste caso, a margem mínima de segurança foi alcançada. Portanto, a utilização de para-raios apenas na terminação dos cabos subterrâneos no interior da subestação se mostra eficiente.



Figura 3.40: Tensões residuais para o caso 2.2, devido a incidência da primeira descarga de retorno na fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.

A Figura 3.41 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração, na ocorrência de descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima de 23,6 kV na fase A, na 29,5 kV fase B e 33,6 kV na fase C. Como era de se esperar, os picos de sobretensão são ainda mais atenuados.



Figura 3.41: Tensões residuais para o caso 2.2, devido a incidência de descarga subsequente na Fase A, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.

# Caso 2.3: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação e na junção com a linha aérea, conforme modelo IEEE:

A Figura 3.42 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação e na junção com a linha aérea, na ocorrência de *backflashover* nas cadeias de isoladores, devido à ocorrência de primeira descarga de retorno.



Figura 3.42: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação e na junção com linha aérea, conforme modelo IEEE.

A Figura 3.43 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração. Observa-se uma sobretensão máxima de aproximadamente 131,6 kV na fase A, 118,4 kV na fase B e 348,9 kV na fase C. Os picos de sobretensão são novamente atenuados devido à presença dos para-raios nas duas extremidades da seção subterrânea. Todos os valores atendem à margem mínima de segurança adotada.



Figura 3.43: Tensões residuais para o caso 2.3, devido a incidência da primeira descarga de retorno no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.

A Figura 3.44 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração, na ocorrência de descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de 23,6 kV na fase A, na 29,2 kV fase B e 32,9 kV na fase C. Como era de se esperar, os picos de sobretensão, que no caso anterior já satisfaziam a margem de segurança do NBI adotado, são ainda mais atenuados.



Figura 3.44: Tensões residuais para o caso 2.3, devido a incidência de descarga subsequente no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo IEEE.

# Caso 2.4: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação, conforme modelo de Pinceti:

A Figura 3.45 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação conforme modelo de Pinceti, na ocorrência de *backflashover* nas cadeias de isoladores das torres 1 e 2, para primeira descarga de retorno.





A Figura 3.46 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração. Observa-se uma sobretensão máxima de aproximadamente 131,1 kV na fase A, 118,7 kV na fase B e 334,5 kV na fase C. Neste caso, assim como na utilização do modelo IEEE, verifica-se que esses valores não superam a margem de segurança adotada. Portanto, também para o modelo de Pinceti, a utilização de para-raios apenas na terminação dos cabos subterrâneo no interior da subestação se mostra eficiente, no caso de ocorrência de *backflashover*.



Figura 3.46: Tensões residuais para o caso 2.4, devido a incidência da primeira descarga de retorno no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.

A Figura 3.47 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração, na ocorrência de descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima de 23,7 kV na fase A, na 29,6 kV fase B e 33,6 kV na fase C. Como era de se esperar novamente, os picos de sobretensão, que no caso anterior já satisfaziam a margem de segurança do NBI adotado, são ainda mais atenuados, assim como no caso 2.2.





# Caso 2.5: Seção subterrânea com para-raios nos terminais de entrada na subestação e na junção com a linha aérea, conforme modelo de Pinceti:

A Figura 3.48 apresenta o circuito desenvolvido no ATP para investigação das sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos na presença de para-raios nos terminais de entrada na subestação e na junção com a linha aérea, na ocorrência de *backflashover* nas cadeias de isoladores.



Figura 3.48: Circuito referente implementação dos para-raios nos terminais dos cabos subterrâneos na entrada da subestação e na junção com linha aérea, conforme modelo de Pinceti.

A Figura 3.49 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração. Observa-se uma sobretensão máxima de aproximadamente 131,1 kV na fase A, 118,9 kV na fase B e 334,8 kV na fase C. Os picos de sobretensão são novamente atenuados devido à presença dos para-raios nas duas extremidades da seção subterrânea. Todos os valores estão em atendimento à margem de segurança adotada, assim como no caso 2.3.


Figura 3.49: Tensões residuais para o caso 2.5, devido a incidência da primeira descarga de retorno no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.

A Figura 3.50 apresenta as sobretensões atmosféricas obtidas para essa configuração, na ocorrência de descarga subsequente. Observa-se uma sobretensão máxima, em módulo, de 23,8 kV na fase A, na 29,6 kV fase B e 33,7 kV na fase C. Como era de se esperar, os picos de sobretensão, que no caso anterior já satisfaziam a margem de segurança do NBI adotado, são ainda mais atenuados.



Figura 3.50: Tensões residuais para o caso 2.5, devido a incidência de descarga subsequente no cabo para-raios, com utilização de para-raios conforme modelo de Pinceti.

### 3.6 - Discussão dos resultados

# Análise da influência das cadeias de isoladores na investigação da falha de blindagem:

Primeiramente, é necessário fazer uma análise quanto às diferenças nas sobretensões obtidas sobre as junções dos cabos subterrâneos no interior da subestação, considerando ou não a ocorrência de ruptura dielétrica nas cadeias de isoladores. A Tabela 3.16 apresenta esse comparativo para ocorrência de primeira descarga mediana. Nota-se uma redução significativa nos picos de sobretensão em todas as fases, quando a possibilidade de ocorrência de flashover nas cadeias de isoladores das torres 1, 2 e 3 é considerada. De fato, verifica-se a ocorrência de ruptura dielétrica sobre os isoladores das torres 1 e 2, fazendo com que parte da corrente de surto seja drenada ao solo. Apesar do comportamento das sobretensões atmosféricas ser mais oscilatório, é possível verificar na Tabela 3.16 que foi possível obter uma margem de segurança de 43,97% para o modelo IEEE e 46,18% para o modelo de Pinceti, valores esses significativamente superiores ao valor mínimo de 15%, com inclusão de para-raios apenas no interior da subestação, não havendo necessidade de investigação das sobretensões para inclusão de novos para-raios, conforme os casos 1.3 e 1.5. Entretanto, caso o processo de ruptura dielétrica nas cadeias de isoladores seja desconsiderado, em uma análise mais conservadora, as sobretensões obtidas são bastante superiores. Nessa hipótese, o pico de sobretensão na fase A para primeira descarga no sistema sem presença de para-raios chega a 10,8MV, o que exige um esforco dos para-raios muito superior ao que ocorre quando o mecanismo de flashover é considerado. Com isso, há a necessidade de presença de para-raios nas duas extremidades dos cabos subterrâneos, para obtenção de uma margem de segurança de 28,51% para o modelo IEEE e de 28,14% para o modelo de Pinceti.

Com relação à descarga subsequente, ocorre processo semelhante. Se o mecanismo de *flashover* é considerado, a presença de para-raios apenas no interior da subestação resulta em uma margem de segurança de 62,0% para o modelo IEEE e de 61,31% para o modelo de Pinceti, margens essas superiores às obtidas para a primeira descarga, como pode ser verificado na Tabela 3.17. Entretanto, verifica-se que a sobretensão máxima na fase A é de 2,6MV, caso a presença das cadeias de isoladores seja desconsiderada. Essa sobretensão elevada exige a instalação cadeias de isoladores nas duas extremidades dos cabos subterrâneos, também considerando

a ocorrência da descarga subsequente direta na fase A. Tendo em vista a possibilidade de ocorrência de *flashover* no sistema em estudo, as análises a seguir levam em consideração a presença das cadeias de isoladores, bem como os seus processo de ruptura dielétrica, na ocorrência de falha de blindagem.

	Primeira descarga de retorno										
	Caso	Modelo para-raios <sup>–</sup>	Sobretensõ cabos	Margem de segurança							
			Fase A	Fase B	Fase C	obtida (%)*					
Sem presença das cadeias de isoladores	1.1	-	10.800,00	2.900,00	2.300,00	-1561,54%					
	1.2	IFFE	1.108,00	523,80	482,50	-70,46%					
	1.3	IEEE	464,70	186,10	219,40	28,51%					
	1.4	Dimenthi	1.097,30	505,70	466,10	-68,82%					
	1.5	Pincetti	467,10	181,80	211,50	28,14%					
Com presença das cadeias de isoladores	1.1	-	672,50	112,60	143,20	-3,46%					
	1.2	IFFF	364,20	97,00	145,50	43,97%					
	1.3	IEEE	-	-	-	-					
	1.4	Pincetti	349,80	97,60	148,80	46,18%					
	1.5	i mcetti	-	-	-	-					

Tabela 3.16: Comparativo das sobretensões atmosféricas referente à falha de blindagem e ocorrência de primeira descarga na fase A, com e sem a presença das cadeias de isoladores.

\*: Valores calculados para NBI de 650 kV. A margem é considerada satisfatória para valores acima de 15 %.

Tabela 3.17: Comparativo das sobretensões atmosféricas referente à falha de blindagem e ocorrência de primeira descarga na fase A, com e sem a presença das cadeias de isoladores.

			Descarga subsequente							
	Caso	Modelo para raios	Sobretensõe cabos	Margem de segurança obtida						
			Fase A	Fase B	Fase C	(%)*				
Sem presença das cadeias de isoladores	1.1	-	2.600,00	600,00	700,00	-300,00%				
	1.2	IPPP	650,70	419,20	414,70	-0,11%				
	1.3	IEEE	399,80	254,50	270,40	38,49%				
	1.4	D'	645,30	407,20	402,40	0,72%				
	1.5	Pincetti	414,30	263,70	281,50	36,26%				
Com presença das cadeias de isoladores	1.1	-	255,30	51,40	79,40	60,72%				
	1.2	IEEE	247,00	94,80	102,20	62,00%				
	1.3	IEEE	-	-	-	-				
	1.4	Dincetti	251,50	98,90	105,20	61,31%				
	1.5	PINCetti	-	-	-	-				

\*: Valores calculados para NBI de 650 kV. A margem é considerada satisfatória para valores acima de 15 %.

# *Análise das sobretensões atmosféricas devido a descargas no condutor da fase A e no cabo para-raios :*

A Tabela 3.18 apresenta um resumo dos resultados obtidos acerca das máximas sobretensões atmosféricas referentes à primeira descarga de retorno, para cada caso estudado, conforme modelos IEEE e de Pinceti. Para todos os casos, são consideradas as presenças das cadeias de isoladores em todas as torres do sistema. Entretanto, a tabela apresenta apenas os casos em que são utilizados para-raios somente no pátio da SE, uma vez que essa medida se mostrou eficiente para atenuação das sobretensões em valores inferiores à margem mínima de segurança estabelecida.

	Primeira descarga de retorno							
	Caso	Modelo para- – raios	Sobretensõe cabos	Margem de segurança				
			Fase A	Fase B	Fase C	obtida (%)*		
Descarga	1.1	-	672,50	112,60	143,20	-3,46%		
direta	1.2	IEEE	364,20	97,00	145,50	43,97%		
condutor fase	1.4	Pincetti	349,80	97,60	148,80	46,18%		
Descarga	2.1	-	145,10	122,20	709,20	-9,11%		
direta cabo para-	2.2	IEEE	103,90	105,50	349,30	46,26%		
raios	2.4	Pincetti	131,10	118,70	334,50	48,54%		

Tabela 3.18: Resumo das sobretensões obtidas para primeira descarga de retorno.

\*: Valores calculados para NBI de 650 kV. A margem é considerada satisfatória para valores acima de 15 %.

Observa-se primeiramente que, para cada ocorrência da primeira descarga no condutor da fase A, uma vigorosa atenuação dos níveis máximos de solicitação dielétrica é verificada sobre a isolação dos cabos subterrâneos, a partir da utilização de para-raios no pátio da SE, como era de se esperar. De fato, a redução da sobretensão atmosférica na fase A chega a 45,85% do valor inicial para o modelo IEEE e a 47,99% para o modelo de Pinceti. Com tais reduções, a máxima sobretensão na fase A, devido à primeira descarga direta no condutor, atende à margem mínima de segurança de 15% para o NBI dos cabos subterrâneos, por estar abaixo do valor de 552,5 kV, como pode ser visto na Tabela 3.18.

Com relação à incidência direta da primeira descarga de retorno sobre o cabo para-raios e a ocorrência de *backflashover*, como é verificado no caso 2.1, essa atenuação é um pouco maior. Para o modelo IEEE, a redução é de 50,75%. Para o modelo de Pinceti, a redução máxima é de 52,83% do valor original da sobretensão

atmosférica. Essas reduções são mais pronunciadas na fase A, para os casos de incidência direta sobre esta fase, e na fase C, para os casos de incidência no cabo para-raios. Isso ocorre provavelmente devido aos valores máximos das sobretensões atmosféricas nas demais fases estarem abaixo da tensão residual do para-raios. Dessa forma, o valor instantâneo das resistências não lineares que modelam os para-raios são mais elevados e, com isso, menor é a capacidade de drenagem de corrente de surto por eles. Verifica-se que a utillização de apenas 1 para-raios, nos casos 2.2 e 2.4, é suficiente para que as sobretensões atmosféricas em todas as fases da seção subterrânea sejam atenuadas, a ponto de atenderem à máxima solicitação dielétrica permitida. Portanto, a proposta de coordenação do isolamento dos cabos subterrâneos, com para-raios apenas no pátio da SE, tanto para incidência direta sobre a fase A, quanto para incidência no cabo para-raios, se mostra bastante satisfatória.

Outro fato que se observa é que a máxima solicitação dielétrica sobre a fase C é superior à observada na fase B, para os casos referentes à descarga direta sobre a fase A. Como a distância vertical da Fase C até a Fase A é inferior à distância efetiva entre a Fase B e a Fase A, o tempo de propagação da onda eletromagnética devido ao impulso de corrente é também inferior. Dessa forma, o processo de indução eletromagnética sobre a Fase C ocorre de forma mais intensa, se comparada com a Fase B. Já para primeira descarga sobre o cabo para-raios, verifica-se que a máxima solicitação dielétrica está sobre a Fase C. Dessa forma, o para-raios da Fase C demonstra maior capacidade em atenuar essa sobretensão.

A Tabela 3.19 apresenta um resumo das máximas sobretensões atmosféricas referentes à descarga subsequente, para cada caso estudado, conforme modelos IEEE e de Pinceti. Para todos os casos, são consideradas as presenças das cadeias de isoladores em todas as torres do sistema. Entretanto, a tabela apresenta apenas os casos em que são utilizados para-raios somente no pátio da SE, devido ao fato de que as máximas sobretensões nos cabos subterrâneos, sem a proteção de para-raios, não superarem os valores máximos definidos, e também ao fato de que as atenuações obtidas com o acréscimo de para-raios na torre 3 não apresentarem atenuações significativas. Verifica-se que as sobretensões para o caso 1.1 resultam em uma margem de segurança de 60,72%, o que é satisfatório. Já para o caso 2.1, essa margem é ainda maior: 94,83%. Como as sobretensões observadas nesses dois casos são inferiores à tensão residual dos para-raios, a presença desse equipamento no sistema não se faz importante para ocorrência de descargas subsequentes na linha.

Na verdade, para descargas subsequentes na fase A, a presença de para-raios produz uma elevação nas sobretensões máximas sobre os cabos das fases B e C.

	Caso	Modelo	Sobretensões cabos si	Margem de segurança		
	duso	raios	Fase A	Fase B	Fase C	obtida (%)*
	1.1	-	255,30	51,40	79,40	60,72%
Descarga direta condutor fase	1.2	IEEE	247,00	94,80	102,20	62,00%
	1.4	Pincetti	251,50	98,90	105,20	61,31%
	2.1	-	23,70	29,60	33,60	94,83%
Descarga direta	2.2	IEEE	23,60	29,50	33,60	94,83%
case para raios	2.4	Pincetti	23,70	29,60	33,60	94,83%

Tabela 3.19: Resumo das sobretensões obtidas para descarga subsequente.

\*: Valores calculados para NBI de 650 kV. A margem é considerada satisfatória para valores acima de 15 %.

Com relação à incidência direta da descarga subsequente sobre o cabo pararaios, como é verificado anteriormente no caso 2.1, as sobretensões atmosféricas sobre as cadeias de isoladores não resultam no processo de *backflashover* em nenhuma das fases. Com isso, as solicitações dielétricas sobre os cabos subterrâneos são bastante inferiores aos observados para primeira descarga de retorno, por serem resultado apenas do processo de indução promovida pela corrente impulsiva no cabo para-raios e pelas torres.

Outro fato importante que pode ser destacado a partir dos dados da Tabela 3.18 e Tabela 3.19, é que para descargas sobre o cabo para-raios, a máxima sobretensão não ocorre na fase A. Isso se processa para ambos os modelos de para-raios. Tal fato está relacionado às tensões induzidas nos condutores fase devido à sobretensão no cabo para-raios. O acoplamento eletromagnético é mais intenso para condutores fase mais próximos dele. Isso faz com que haja uma diferença de potencial de maior intensidade entre ambos, que atua no sentido de atenuar de forma mais aguda a sobretensão (decorrente do processo de *backflashover*) no condutor fase mais próximo. Maiores detalhes acerca do fenômeno de acoplamento eletromagnético devido a descargas diretas sobre cabo para-raios podem ser verificados em Zanetta Júnior (2003).

Em síntese, como pode ser observado na Tabela 3.18, para primeira descarga de retorno, a margem mínima de segurança não é atendida no caso 1.1, devido à

sobretensão máxima obtida na fase A. Da mesma forma, a sobretensão máxima obtida na fase C também não atende a margem mínima de segurança, para o caso 2.1. Tal fato aponta a necessidade de que sejam instalados para-raios no pátio da SE, afim de garantir a atenuação das sobretensões que podem vir a solicitar a isolação dos cabos subterrâneos. Entretanto, outras estratégias de proteção desses cabos, podem ser verificadas, de forma a tentar reduzir essas sobretensões a valores inferiores a 552,5 kV. Nesse sentido, propõe-se a implementação de medidas alternativas, com o objetivo de reduzir a sobretensão sobre a fase A no caso 1.1; e sobre a fase C, no caso 2.1, para um valor que atenda à margem mínima de 15%, para segurança do NBI dos cabos isolados. Uma investigação que pode ser realizada é o aumento do comprimento da seção subterrânea, a fim de aumentar o tempo de transito da onda de tensão entre suas terminações e, consequentemente, favorecer a atenuação desta onda e reduzir a solicitação dielétrica dos cabos. Outra opção é a redução da resistência do aterramento das torres de transmissão, afim de tentar aumentar o pico das ondas refletidas e, dessa forma, elevar a intensidade da atenuação da sobretensão nos condutores.

#### Investigação da influência do aumento do comprimento da rede subterrânea:

Em termos do aumento do comprimento da seção subterrânea, é realizada uma investigação acerca do comportamento da sobretensão na fase A para o caso 1.1 e na fase C para o caso 2.1, situações essas em que a máxima sobretensão nos respectivos cabos supera o valor máximo estabelecido. Essa investigação tem o intuito de se determinar um comprimento mínimo para que a margem mínima de segurança seja alcançada em cada um dos casos. As respectivas curvas de variação do pico de sobretensão na terminação dos cabos subterrâneos, em função do comprimento da seção subterrânea, seguem na Figura 3.51. Observa-se uma baixa sensibilidade do comportamento da subretensão máxima para os dois casos, para uma grande variação no comprimento da seção subterrânea. Verifica-se que para o caso 1.1, é possível atender à margem de segurança na fase A a partir de uma seção subterrânea de 1.400 metros. Já para o caso 2.1, é possível atender à margem de segurança na fase C a partir de uma seção subterrânea de 1.700 metros. Ou seja, como as sobretensões apresentam uma baixa sensibilidade a essa variação, exigindo comprimentos muito superiores aos 200 metros estabelecidos no problema original sob investigação, essa solução não é viável economicamente. Essa baixa sensibilidade vem a salientar o comportamento altamente oscilatório do sistema sob



estudo, devido às características altamente transitórias da descarga atmosférica e à presença das diversas descontinuidades.

Comprimento da seção subterrânea (metros)

Figura 3.51: Variação da sobretensão na fase A (caso 1.1) e na fase C (caso 2.1), em função do comprimento da seção subterrânea, para incidência de primeira descarga de retorno.

## Investigação da influência da redução do valor da resistência de aterramento das torres de transmissão:

Ainda no âmbito da investigação acerca do comportamento da sobretensão na fase A para o caso 1.1 e na fase C para o caso 2.1, porém mediante o decréscimo do valor da resistência de aterramento das torres de transmissão, o resultado segue na Figura 3.52. Verifica-se que a sobretensão na fase C (caso 2.1), a partir de uma resistência no valor de  $28\Omega$ , sofre uma redução brusca, decorrente da não ocorrência do processo de backflashover sobre a cadeia de isoladores da fase C, para uma resistência de aterramento menor ou igual a esse valor. Dessa forma, a sobretensão sobre essa fase passa a atender à margem mínima de segurança adotada, não havendo necessidade de consideração de para-raios. Entretanto para o caso 1.1, a sobretensão na fase A sofre atenuações significativas com a redução unitária do valor da resistência do aterramento, mas o processo de backflashover permanece. Com isso, a margem mínima de segurança para esse caso é obtida a partir de um valor de resistência de 23 $\Omega$ . Portanto, é possível dizer que há uma sensibilidade significativa das sobretensões máximas verificadas nos cabos subterrâneos, em função dessa variação na resistência de aterramento. Contudo, é necessário ressaltar novamente que qualquer redução no valor desse parâmetro é difícil ou até mesmo improvável, do ponto de vista prático, tendo em vista a alta resistividade característica dos solos brasileiros, o que provavelmente torna essa alternativa tecnicamente inviável.



Figura 3.52: Variação da sobretensão na fase A (caso 1.1) e na fase C (caso 2.1), em função do valor da resistência de aterramento, para incidência de primeira descarga de retorno.

#### Análise acerca do comportamento dos modelos IEEE e Pinceti:

O percentual de variação entre os resultados produzidos pelos dois modelos de para-raios é apresentada na Tabela 3.20. Nota-se que as sobretensões obtidas por meio do modelo de Pinceti (casos 1.4 e 2.4) são superiores aos obtidos pelo modelo IEEE (casos 1.2 e 2.2) em quase todas as hipóteses analisadas. Excessões ocorrem apenas para a sobretensão obtida na fase A devido à primeira descarga de retorno na fase A e para a sobretensão obtida na fase C devido à primeira descarga no cabo para-raios, situações essas em que os valores produzidos pelo modelo de Pinceti apresentam valores inferiores, justamente nas hipóteses onde ocorrem os maiores picos de tensão. Verifica-se também que para ocorrência de primeira descarga, essa variação é maior em amplitude, chegando a 20,75% na fase A, para primeira descarga no cabo para-raios. Já para descargas subsequentes, essa variação é inferior, chegando a 4,15% na fase B, para descarga subsequente na fase A. Como praticamente todas as sobretensões obtidas a partir do modelo de Pinceti se mostram superiores às sobretensões obtidas pelo modelo IEEE, poderia-se dizer que apenas o primeiro modelo poderia ser utilizado, afim de se obter valores conservadores dentro de um estudo de coordenação de isolamento. Entretanto, os valores produzidos por pelo modelo IEEE se mostraram superiores aos de Pinceti justamente nas hipóteses em que os picos de sobretensão são superiores, se comparadas com as demais hipóteses. Devido a isso, sugere-se que os dois modelos devem ser utilizados em concomitância, adotando-se sempre os valores mais elevados, no âmbito de um estudo conservador.

			Sobretensões atmosféricas sobre os cabos subterrâneos (kV)						
		Caso	Fase A	Variação percentual	Fase B	Variação percentual	Fase C	Variação percentual	
Primeira descarga	Descarga no	1.2	1.2 364,20		97,00	0.610/	145,50	2 2 2 0/	
	condutor fase	1.4	349,80	-4,12%	97,60	0,01%	148,80	2,22%	
	Descarga no cabo 2.2 103,90 20,75% 105,50   para-raios 2.4 131,10 20,75% 118,70	2.2	103,90	20.750/	105,50	11 1 20/	349,30	4 4 2 0/	
		118,70	11,12%	334,50	-4,42%				
escarga sequente	Descarga no	1.2	247,00	1 70%	94,80	4 15%	102,20	2 85%	
	condutor fase	1.4 251,50	1,7 7 /0	98,90	<b> </b>	105,20	- 2,0370		
	Descarga no cabo	2.2	23,60	0 4 2 0 /	29,50	0 2 4 0 /2	33,60	0,00%	
I sul	para-raios	2.4	23,70	<b>3</b> ,70 <b>0,42%</b>	29,60	0,34%	33,60		

Tabela 3.20: Comparação percentual entre os resultados produzidos pelos modelos IEEE e de Pinceti.

#### Considerações finais acerca das sobretensões obtidas:

Contudo, é importante lembrar que os picos de sobretensão são devidos, além das características agressivas das descargas atmosféricas na região de Minas Gerais e do Brasil, à característica de elevada resistividade do solo dessa região e à respectiva resistência do aterramento. O processo de reflexão das ondas de tensão e corrente na descontinuidade que há entre a impedância de surto das torres de transmissão e suas respectivas resistências de aterramento, e entre os condutores de descida dos para-raios da subestação e suas resistências de aterramento, fazem com que as solicitações dielétricas sobre os cabos subterrâneos não sejam facilmente atenuadas, devido ao elevado valor da resistência de aterramento e ao comportamento transitório das sobretensões resultantes. Um exemplo pode ser verificado no gráfico da Figura 3.51, que evidencia a dificuldade na redução da sobretensão máxima sobre as fases A e C. A tensão máxima sofre oscilações até que, para um aumento significativo do comprimento da seção subterrânea de 200 até 1.700 metros, essas sobretensões são finalmente contidas no limite estabelecido pelo NBI adotado nesse estudo. Essas oscilações, em uma primeira análise, não seriam esperadas.

Outra consideração que pode ser feita é com relação ao comportamento das sobretensões para variações da resistência de aterramento. Verifica-se que esse parâmetro gera variações importantes na magnitude das solicitações dielétricas sobre os cabos subterrâneos, podendo inclusive determinar ou não ocorrência de ruptura dielétrica sobre as cadeias de isoladores, ou seja, determinando a ocorrência de *backflashover*. Portanto, o seu dimensionamento e modelagem devem ser realizados

de forma consistente, se possível com uso de técnicas mais apropriadas para estudo à transitórios da resposta do aterramento frente eletromagnéticos, em complementação aos critérios utilizados pelas concessionárias brasileiras e adotados nesse trabalho. Também nesse sentido, é necessário dar atenção especial à modelagem apropriada do comportamento das cadeias de isoladores, para que os processos de ruptura dielétrica sobre eles sejam corretamente implementados, afim de se garantir resultados consistentes em um estudo de coordenação de isolamento desse tipo. Contudo, indica-se a partir desses resultados que critérios adotados no Brasil, referentes ao dimensionamento do aterramento elétrico para linhas de transmissão, bem como o processo de representação da disrupção elétrica nas cadeias de isoladores, dentre outros, merecem reflexões adicionais, quando se trata de seus comportamentos frente a fenômenos de alta frequência, como é o caso de descargas atmosféricas e, consequentemente, da coordenação de isolamento de cabos subterrâneos. Entretanto, pode-se avaliar, no âmbito da modelagem de aterramentos por meio da resistência de aterramento, a modificação desse critério, no sentido de serem atendidos valores máximos inferiores, com limites de 10 ou 20 ohms, de forma a tentar assegurar amplitudes mais elevadas da onda negativa de reflexão no aterramento e, consequentemente, uma redução mais aguda na tensão resultante no topo da torre, na cadeia de isoladores e nos cabos subterrêneos, caso ocorra o processo de backflashover. Porém, essa redução não é fácil do ponto de vista prático, devido às características elétricas do solo brasileiro.

#### Energia absorvida pelos para-raios:

É necessário também avaliar a energia absorvida pelos para-raios em função da capacidade máxima de absorção definida em catálogo e em função das soluções propostas, cujas tensões residuais resultantes são dadas na Tabela 3.18 e Tabela 3.19. A Tabela 3.21 apresenta a energia absorvida pelos para-raios utilizados nas soluções propostas, conforme modelo IEEE e de Pinceti, respectivamente. Verifica-se que a energia absorvida pelos para-raios é bastante inferior à máxima capacidade de absorção de energia definida em catálogo. Nota-se também que para os casos onde as sobretensões são muito próximas ou inferiores à tensão residual dos para-raios, a energia absorvida por eles pode chegar a valores muito baixos de sobretensão, as resistências não lineares assumem valores elevados, o que faz com que a corrente drenada por elas seja bastante reduzida e, portanto, a energia total absorvida também seja muito baixa. Tal fato é verificado principalmente nos casos de incidência de

descarga subsequente sobre o cabo para-raios. Já com relação ao desempenho geral dos dois modelos de para-raios, é possível notar que a energia total absorvida pelos para-raios modelados por Pinceti apresenta valores superiores aos obtidos pelo modelo IEEE, o que era de se esperar, uma vez que as sobretensões produzidas pelo modelo de Pinceti também são superiores, na maioria dos casos.

		Caso	Modelo para-raios	Energi para-ra	a absorvid ios no pát (kJ)	Energia total absorvida - (kJ)	
				Fase A	Fase B	Fase C	
	Descarga direta	1.2	IEEE	19,89	0,00	0,00	19,89
Primeira Descarga	condutor fase	1.4	Pinceti	21,68	0,00	0,00	21,68
	Descarga direta cabo para-raios	2.2	IEEE	0,00	0,00	20,05	20,05
		2.4	Pinceti	0,00	0,00	21,66	21,66
te	Descarga direta	1.2	IEEE	0,017	0,00	0,00	0,017
Descarga bsequen	condutor fase	1.4	Pinceti	0,016	0,00	0,00	0,016
	Descarga direta	2.2	IEEE	0,00	0,00	0,00	0,00
Su	cabo para-raios	2.4	Pinceti	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 3.21: Energia absorvida pelos para-raios.

# CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

### 4.1 - Discussões finais

Para concluir as discussões deste trabalho, primeiramente é necessário comentar a influência das cadeias de isoladores no comportamento do sistema. É possível verificar que a presença desse elemento, tanto para estudos de falha de blindagem quanto para estudos de *backflashover*, faz com que boa parte da corrente de surto seja drenada pelas torres de transmissão, o que tende a reduzir a magnitude das sobretensões sobre os cabos isolados. De uma forma geral, verifica-se que a inserção do efeito das cadeias de isoladores reduz essas sobretensões, de alguns milhares de quilovolts, para algumas poucas centenas de quilovolts, como é observado na fase A, para incidência de primeira descarga sobre esta fase. Portanto, conclui-se que a sua consideração no sistema a ser investigado, bem como sua adequada representação, no que diz respeito à ocorrências de ruptura dielétrica, se faz importante para a obtenção de sobretensões atmosféricas representativas.

No caso de incidência direta da primeira descarga de retorno sobre o condutor da fase A (Caso 1.1) e também no caso de incidência direta da primeira descarga de retorno no cabo para-raios (Caso 2.1), observa-se a condição mais severa de ocorrência do fenômeno, em que os valores superam o NBI adotado para o sistema. Isso ocorre na fase A, para o caso 1.1, uma vez que seu condutor recebe a descarga no caso da falha de blindagem. Já os demais condutores, referentes às fases B e C, cujas tensões são produzidas por indução eletromagnética, não superam à margem mínima de segurança. No caso 2.1, o condutor mais solicitado é o da fase C, uma vez que este condutor está mais distante do cabo para-raios e, assim, está menos acoplado eletromagneticamente a esse cabo, se comparado com os condutores das fases A e B, que estão mais próximos e sofrem uma maior atenuação das suas sobretensões devido a isso. Verifica-se então, pelas modelagens propostas, que as sobretensões nesses condutores podem eventualmente superar o NBI do sistema, o que pode levar à destruição do isolamento dos cabos subterrâneos, caso esses transitórios não sejam tratados de forma adequada durante os estudos de coordenação de isolamento. Por outro lado, o efeito da descarga subsequente, tanto sobre o condutor da fase A, quanto sobre o cabo para-raios, não superam o nível básico de isolamento dos cabos subterrâneos. O fato é que não há sobretensões de magnitude suficiente para que ocorra o *backflashover* e, com isso, as sobretensões sobre os cabos subterrâneos são bastante reduzidas, não exigindo necessidade de para-raios ou de outra medida de mitigação para proteção da rede subterrânea. Contudo, verifica-se o mérito do estudo de coordenação de isolamento de seções subterrâneas de linhas de transmissão de 138 kV típicas, tendo em vista as características possivelmente agressivas das descargas atmosféricas de Minas Gerais e do Brasil.

Entretanto, verifica-se no presente trabalho que a realização deste estudo não é tarefa trivial. Diferentemente dos estudos incipientes realizados por Gomes et Al. (2015), nota-se uma intensa influência dos pontos de descontinuidade do sistema no processo de reflexão das ondas de tensão e corrente, o que majora as solicitações dielétricas sobre as isolações do sistema, inclusive sobre os cabos subterrâneos. Tal fato pode dificultar a atenuação efetiva das sobretensões atmosféricas sobre esses cabos. Nesse sentido, constata-se que a adoção de um critério de investigação de transitórios atmosféricos a partir do uso de resistências concentradas com valor de 30 ohms, pode não ser uma escolha adequada para proteção de redes subterrâneas contra descargas atmosféricas. Deve-se avaliar, portanto, a modificação desse critério, no sentido de serem adotados valores máximos inferiores, com limites de 10 ou 20 ohms, por exemplo, de forma a tentar assegurar amplitudes mais elevadas da onda negativa de reflexão no aterramento e, consequentemente, uma redução mais aguda na tensão resultante no topo da torre, na cadeia de isoladores e nos cabos subterrêneos, caso ocorra o processo de backflashover. Entretanto, a eventual impossibilidade de redução deste parâmetro, devido às características desfavoráveis do solo brasileiro, conduz à necessidade de implementção de para-raios no sistema para mitigação das solicitações dielétricas sobre a seção subterrânea. Conquanto, os resultados aqui apresentados são importantes para tornar clara a realidade brasileira no tocante às dificuldades de realização assertiva do estudo de coordenação de isolamentos frente a descargas atmosféricas.

Com relação aos modelos de para-raios adotados, conclui-se que ambos são capazes de produzir resultados representativos sobre as tensões residuais máximas sobre os cabos subterrêneos. No entanto, é necessário salientar que, sob determinadas condições, um ou outro gera resultados mais conservadores, sendo de responsabilidade do projetista a decisão de utilizar o modelo mais adequado para realização de um estudo mais prudente, ou até mesmo a utilização de ambos, de

forma a realizar uma comparação dos resultados obtidos por ambos os modelos e a considerar os valores mais elevados das tensões residuais obtidas.

### 4.2 - Propostas de continuidade

A principal proposta de continuidade deste trabalho está relacionada à utilização de um modelo matemático mais realista, baseado em teoria de campo, que reproduza o comportamento transitório de aterramentos elétricos de linhas de transmissão e que considere, também, a variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência. A modelagem por meio de resistências de aterramento é mais apropriada para estudos em regime permanente, sendo considerada uma técnica primária para estudos de transitórios, apesar de ainda ser largamente utilizada pelas concessionárias de energia no mundo inteiro para estudos de coordenação de isolamento. Portanto, esta modelagem mais apurada do comportamento do aterramento permitiria produzir como resultado, sobretensões atmosféricas de valores mais confiáveis, podendo estes ser confrontados com os resultados obtidos no presente trabalho. Mesma comparação poderia ser realizada com as medidas de coordenação de isolamento a serem definidas para proteção dos cabos subterrêneos.

No âmbito da proposta de modelagem de aterramentos para estudos das sobretensões atmoféricas em linhas de transmissão, propõe-se a realização do estudo da resposta de aterramentos elétricos frente a correntes impulsivas e seu comportamento frente a descargas atmosféricas. Inclui-se aí a variação da impedância de aterramento em função da faixa de frequência da descarga, a característica da corrente dispersa no solo, a propagação da onda eletromagnética resultante no solo e variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo. Para tal, é necessário estudar as principais técnicas utilizadas para implementação numérica dos modelos de aterramentos baseados em teoria de campo no domínio da frequência.

A partir da resposta em frequência do sistema de aterramento, propõe-se a utilização de uma metodologia para ajuste de funções racionais a partir do cálculo da resposta em frequência do aterramento elétrico dos elementos do sistema. A partir da aproximação dessas funções racionais, torna-se possível ajustar valores de resistência, indutância e capacitância concentrados, que por sua vez definem um circuito equivalente, capaz de reproduzir com aproximação suficiente a resposta em frequência do aterramento elétrico submetido à descarga atmosférica. Por fim, seria possível realizar uma modelagem do aterramento própria para estudos referentes a

descargas atmosféricas, que poderia ser implementado no ATP, juntamente com o sistema já construído.

Ademais, julga-se, também, importante os seguintes estudos adicionais, dentre outros:

- Modelagem mais fisicamente consistente para o processo de disrupção elétrica na cadeia de isoladores;
- Estudo incluindo relação custo X benefício de práticas complementares de proteção;
- Estudo do impacto temporal de sobretensões atmosféricas (com níveis menores que a margem de segurança indicada) sobre a vida útil dos para-raios;
- Inclusão da representação do efeito corona nas linhas de transmissão;
- Utilização do método de Monte Carlo para investigar as solicitações dielétricas na rede subterrânea, frente a diversos tipos de onda de corrente, que podem incidir aleatoriamente no sistema;
- Modelagem mais apurada do canal de descarga atmosférica e de sua interação com a linha de transmissão, tanto para as primeiras quanto para as descargas subsequentes;

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Técnica Brasileira NBR-8186: Guia de aplicação de coordenação de Isolamento., Rio de Janeiro, Brasil.

Alípio, R.S., Bernardes Neto F., Schroeder, M.A.O., Oliveira, T.A.S., *Cálculo de resistência de aterramento de malhas de aterramento em baixas freqüências*, Anais da I Jornada Nacional de Iniciação Científica, Brasília, Brasil, 2006a.

Alípio, R.S., Bernardes Neto F., Schroeder, M.A.O., Oliveira, T.A.S., *Modelagem computacional para cálculo da resistência de aterramento de sistemas elétricos de potência submetidos a fenômenos de baixa freqüência*, Anais do Simpósio de Mecânica Computacional (SIMMEC 2006), Araxá, Brasil, 2006b.

Alípio, R.S., *Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência*, Dissertação de Mestrado, Orientador: Schroeder, M.A.O., UFMG, Minas Gerais, Brasil, 2008.

Alípio, R.S., Oliveira, M.L.F., Schroeder, M.A.O., Afonso, M.M., Oliveira, T.A.S., *Aplicação do Método dos Momentos para avaliação do acoplamento eletromagnético entre eletrodos de aterramento: análise no domínio da freqüência*, Anais 8º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, Natal, Brasil, novembro 2008.

Alipio, R.S., Visacro, S., *Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency dependent soil parameters*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 29, no. 2, p. 716–723, 2014.

Almeida, V.D.S., *Coordenação de Isolamentos em Linhas Aéreas de AT e MAT*, Dissertação de Mestrado, Orientador: Machado e Moura, A.C.S., Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.

Ametani, A., *A general formulation of impedance and admittance of cables*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 99(3), p. 902–909, 1980.

Amon Filho, J., Pereira, M. P., *ATP – Alternative Transients Program; Curso Básico sobre a Utilização do ATP*. CLAUE – Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Brasil, 1996.

Amon Filho, J., Pereira, M.P., *Alternative Transients Power: Basic course on the use of ATP*, São Paulo, 1994.

Anderson, R.B., Eriksson, A.J., *Lightning Parameters for Engineering Application*, Electra, nº 69, p. 65-101, 1980.

Azevedo, R.M., Implementação de Modelos do Efeito Corona para Simulação de Linhas de Transmissão com Parâmetros Dependentes da Freqüência. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1993.

Bergeron, L., *Du Coup de Belier en Hydraulique au Coup de Foudre en Electricité*. Paris, 1949. Transl., *Water Hammer in Hydraulics and Wave Surges in Electricity* (Translating Committee sponsored by ASME). NewYork, 1961.

Berger, K., Anderson, R.B., Kröninger, H., *Parameters of Lightning Flashes*, Electra, n<sup>o</sup> 41, p. 23-37, 1975.

Bewley, L.V., *Traveling waves due to lightning*, Transactions of the A.I.E.E., vol. 48, p. 1050-1064, 1929.

Carvalho, A.M., Abreu, M.S., Carvalho, A.C., et al., *Tecnologias para Análise e Melhoria do Desempenho de Instalações de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas*. In: Proceedings of the IV International Seminar on Lightning Protection, São Paulo, Brazil, 1997.

Catálogo de Para-raios 3EL2. *Siemens AG Power Transmission and Distribution*. Disponível em: <www.siemens.com/arrester-download>. Acesso em: 16 nov. 2015.

Christodoulou, C.A., Assimakopoulou, F.A., Gonos, I.F., Stathopolus, I.A., *Simulation of Metal Oxide Surge Arresters Behavior*, IEEE Transactions on Power Delivery, p. 1862-1866, 2008.

Dang, C., Parnell, T. M., Price, P. J., *The response of metal oxide surge arresters to steep fronted current impulses*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-1, no. 1, p. 157–163, 1986.

Darveniza, M., Sargent, M.A, *The calculation of double circuit outage rate of transmission lines*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 5, p. 680–687, 1969.

De Conti, A., Visacro S., *Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, nº 2, p. 448-451, May, 2007.

De Conti, A., Visacro S., Soares, A., Schroeder M.A.O., *Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors*, IEEE Trans. EMC, Vol. 48, n. 3, p. 530-536, Aug. 2006.

Dommel, H. W., *Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-Phase Networks*, IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems, v. 88, n. 4 (April), p. 388-399, 1969.

Dommel, H.W., A method for Solving Transients Phenomena in Multiphase Systems, Proceedings Power Systems Computation Conference, 1966.

Durbak, D.W., *Zinc-oxide arrester model for fast surges*, EMTP Newsletter, 5(1), p.1–9, 1985.

Eriksson, A.J., *An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding,* IEEE Transactions on Power Delivery, vol. PWRD-2, nº 3, Julho, 1987.

Fernandez, F., Diaz, R., *Metal Oxide Surge Arrester Model for fast transient simulations*, The International Conference on Power System Transients IPAT'01, Paper 14, p. 20-24, Rio De Janeiro, 2001.

Gomes, T.V., Schroeder, M.A.O., Alípio, R.S., Moura, R.A.R., *Modeling of Lightning Strikes at Overhead Lines: A Method to Determine Insulated Cable Joints Protection*, XIII SIPDA, Balneário Camboriú, Brasil, 2015.

Greenwood A., *Electrial Transients in Power Systems*, Second Edition, John Wiley and Sons, 1991.

Guimarães, M., Ramos, P., Sobreiro, R., Visacro, S., *Lightning Measurements at Morro do Cachimbo Sation: New Results*, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014.

Gustavsen, B., Martinez, J.A., Durbak, D., *Parameter determination for modeling systems transients. Part II: Insulated cables*, IEEE Transactions on Power Delivery, 20(3), p. 2045–2050, 2005.

Heidler, F., *Analytische blitzstromfunktion zur LEMP-berechnung*, in Proc. 18th Int. Conf. Lightn. Protec., p. 63–66, Munich, Germany, Sep. 1985.

IEC, Amendment 1, Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules, IEC 60071-1, 8<sup>a</sup> Edição, 2010.

IEC, Insulation Coordination – Part 1: Definitions, principles and rules, IEC-60071-1, 8<sup>a</sup> Edição, 2006.

IEC, Insulation Coordination – Part 2: Application Guide, IEC-60071-2, 3ª Edição, 1996.

IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.

IEEE Std C62.22-1997, IEEE guide for the application of metal-oxide surge arresters for alternating current systems, 1997a.

IEEE Std C62.82.1, IEEE Standard for Insulation Coordination: Definitions, Principles and Rules, 2010.

IEEE Working Group 3.4.11, *Modeling of metal oxide surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, n° 1, p. 302-309, 1992.

IEEE, Guide for Improving Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Standard 1243, 1997b.

Imece, A.F., Durbak, D.W., Elahi, H., Kolluri, S., Lux, A., Mader, D., McDermott, T.E., Morched, A., Moussa, A.M., Natarajan, R., Rugeles, L., Tarasiewics, E., *Modeling Guidelines for Fast Front Transients*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, n° 1, 1996.

Marti, J.R., Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, nº 1, p.147-157, 1982.

Martinez, J. A., Durbak, D. W., *Parameter determination for modeling systems transients - part V: surge arresters*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, NO. 3, July 2005.

Martinez-Velasco, J. A., Castro-Aranda F., *Surge Arresters*. "In": Martinez-Velasco, J. A. *Power System Transients: Parameter Determination*, CRC Press, Boca Raton, p. 351-446, 2010.

Meyer, W.S., Liu, T., *Alternative Transients Program (ATP), Rule Book*, Canadian/American EMTP user group, 1992.

Morched, A., Gustavsen, B., Tartibi, M., *A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables*, IEEE Transactions on Power Delivery, 14(3), p. 1032-1038, 1999.

Morched, A., Marti, L., Ottevangers, J., *A High Frequency Transformer Model for the EMTP*, IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. PD-8, n° 3, 1993.

Noda, T., Nagaoka, N., Ametani, A., *Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an Arma Model*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 11, n. 1 (January), p. 401-411, 1996.

ONS – Operador Nacional do Sistema, Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimantos de Transmissão - Estudos elétricos, Especificação das Instalações, de Equipamentos e de Linhas de Transmissão, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

Pinceti, P., Giannettoni, M., *A simplified model for zinc oxide surge arresters*, IEEE Transactions On Power Delivery, vol.14, n° 2, p. 393-398, 1999.

Portela, C.M.J.C.M., *Determinação das Conseqüências de Descargas Atmosféricas Próximas de LT's*, In: Anais do V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Recife, Brasil, 1979.

Portela, C.M.J.C.M., Sobretensões e Coordenação de Isolamento, vol. 1, 2 e 3, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.

Puffer, R., Wenzlaff, K., Riedl, M., Huth, R., *Investigation on the transient electrical behaviour of overhead line circuits with power cable sections,* International Colloquium of Lightning and Power systems, Lyon, França, 2014.

Rosado, G.C., Investigação teórico-experimental sobre a resposta de Aterramentos Elétricos frente a correntes de Descargas Atmosféricas, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro, S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2008.

Rousseau, A., Gruet, P.P., *Practical high frequency measurement of a lightning earthing system*, Proceedings of International Conference on Lightning Protection (ICPL), Saint Malo, França, setembro de 2004.

Salari Filho, J.C., *Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens no Domínio do Tempo e da Frequência*, Tese de Doutorado, Orientador: Portela, C.M.J.C.M., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

Silveira, F. H., *Modelagem para Cálculo de Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas*, Tese de Doutorado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 2006.

Soares Jr, A., *Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas*, Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro S., LRC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, Belo Horizonte, 1996.

Soares Jr., A., Schroeder, M.A.O., Visacro, S., *Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strikes*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, nº 2, 2005.

Stevenson, W.D., *Elementos de análise de sistemas de potência*, McGraw-Hill, São Paulo, 1986.

Visacro, S., A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, p. 381-386, 2007.

Visacro, S., Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia, Artliber, São Paulo, 2005.

Visacro, S, Schroeder, M.A.O., Soares, Jr., A., Cherchiglia, L.C.L., Sousa, V.J., *Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Mesurements at Morro do Cachimbo Station*, Journal on Geophysical Research, v. 109, N. D01105, 2004.

Visacro, S., Soares Jr A., Schroeder M. A. O. et al., *Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station*, J. Geophys. Res. (109), D01105, doi: IO10291, 2003JOO03662, 2004.

Visacro, S., Soares Jr., A. *HEM: A model for simulation of lightning related engineering problems*, IEEE Transactions on Power Delivery, USA, v. 20, n. 2, p. 1206 -1208, 2005.

Wagner, C.F., Hileman, A.R., *Surge impedance and its application to the Lightning Stroke*, Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Volume: 80, Issue: 3, February, 1962.

Wedepohl, L.M., Wilcox, D.J., *Transient analysis of underground power-transmission systems. System-model and wave-propagation characteristics*, Proceedings of the IEEE, 120(2), p. 253–260, 1973.

Zanetta Júnior, L.C., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, Edusp, São Paulo, 2003.