

Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Daiane Conceição Rafael

**UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA
DAS TORRES E DA DISTRIBUIÇÃO DE
CORRENTE DE DESCARGA NA ESTIMATIVA DO
DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Belo Horizonte

2024

Daiane Conceição Rafael

**UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA
DAS TORRES E DA DISTRIBUIÇÃO DE
CORRENTE DE DESCARGA NA ESTIMATIVA DO
DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO
FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Tese submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Departamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Orientador: Ivan J. S. Lopes

Coorientador: Rafael Alípio

Belo Horizonte

2024

R136e	<p>Rafael, Daiane Conceição. Um estudo da influência da geometria das torres e da distribuição de corrente de descarga na estimativa do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas [recuso eletrônico] / Daiane Conceição Rafael. - 2024.</p> <p>1 recurso online (145 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ivan José da Silva Lopes. Coorientador: Rafael Silva Alípio.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 135-145.</p> <p>1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Raio - Teses 3. Linha de transmissão - Teses. 4. Linhas elétricas - Postes e torres - Teses. 5. Engenharia - Métodos estatísticos - 6. Desempenho - Teses. I. Lopes, Ivan José da Silva. II. Alípio, Rafael Silva. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"UM ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DAS TORRES E DA DISTRIBUIÇÃO DE CORRENTE DE DESCARGA NA ESTIMATIVA DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS"

DAIANE CONCEIÇÃO RAFAEL

Tese de Doutorado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 01 de março de 2024. Por:

Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG) - Orientador

Prof. Dr. Rafael Silva Alípio
Depto. Engenharia Elétrica (CEFET/MG) - Coorientador

Prof. Dr. Alexandre Piantini
Instituto de Energia e Ambiente (USP)

Prof. Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder
Depto. Engenharia Elétrica (UFSJ)

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
DEE (UFMG)

Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
DEE (UFMG)



Documento assinado eletronicamente por Ivan Jose da Silva Lopes, Professor do Magistério Superior, em 01/03/2024, às 18:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Fernando Henrique Silveira, Professor do Magistério Superior, em 04/03/2024, às 08:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Alexandre Piantini, Usuário Externo, em 04/03/2024, às 10:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Marco Aurélio de Oliveira Schroeder, Usuário Externo, em 04/03/2024, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Jose Osvaldo Saldanha Paulino, Professor Magistério Superior - Voluntário, em 04/03/2024, às 12:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Rafael Silva Alípio, Usuário Externo, em 08/03/2024, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 3066166 e o código CRC 1C7BCD91.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter permitido realizar este trabalho, com saúde, com resiliência e com força para vencer todos os desafios que foram vencidos ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço aos meus pais por terem sido tão pacientes, apoiadores e motivadores incondicionais, conselheiros. Aos puxões de orelha que foram dados e aos abraços e carinho dados ao longo desse percurso. Por compreenderem minha ausência em momentos importantes em função das demandas do doutorado. E por nunca duvidarem que daria certo.

Ao meu namorado, parceiro de vida e grande presente que a vida me deu, Filipe. Obrigada por todo apoio incondicional, motivação, luta conjunta, incentivo, colo nos momentos mais desafiadores, carinho, parceria, conselhos e puxões de orelha necessários. Por me ouvir incansavelmente e nunca duvidar, nem por um instante, que seria possível. Obrigada por ser esse exemplo de pessoa, profissional e sobretudo ser humano e de companheiro. Por sempre me incentivar a buscar o melhor, o crescimento e o conhecimento. Obrigada por ser meu parceiro incondicional. Obrigada por acreditar até mesmo quando eu não acreditava. A conclusão desse trabalho não seria possível sem você e esta conquista é nossa.

Aos meus amigos que o CEFET e a vida me proporcionaram, que sempre tiveram escuta atenta e colo sempre disponível. Que foram alento em momentos de tensão, que trouxeram risadas em momentos de tristeza, apoio nos momentos difíceis. Vocês tornaram essa jornada definitivamente mais leve. Erika, Audine, Deishi, Novack, Livia, Dih, Ramon (meu amigo e companheiro de trabalho), Isabel, Matheus e Ariane. Vocês todos são presentes aos quais sou grata e para sempre agradecerei.

Aos meus orientadores Professores Rafael Alípio e Ivan pelos inúmeros conhecimentos adquiridos, pela orientação ao longo do desenvolvimento de todo o trabalho. Sempre prontos a tirar dúvidas, aconselhar academicamente e profissionalmente. Pela compreensão frente aos inúmeros desafios enfrentados ao longo do desenvolvimento do doutorado, que não foram poucos.

Um agradecimento especial ao Professor Rafael Alípio pela amizade, escuta atenta, conselhos, oportunidades profissionais e puxões de orelha. Serei sempre eternamente grata por

toda ajuda e por todo crescimento pessoal, acadêmico e profissional que você proporcionou. Certamente sou uma profissional muito mais completa hoje depois de todo o aprendizado.

Ao LabTEM – CEFET MG (Laboratório de Transitórios Eletromagnéticos do CEFET MG), laboratório coordenado pelo Professor Rafael Alípio, e a todos os professores, alunos de Iniciação Científica, de TCC e de mestrado que compõe o grupo de pesquisa. Obrigada por toda estrutura para o desenvolvimento do trabalho ao longo desses anos, pela amizade, pelas boas risadas e excelentes ideias trocadas. Foi maravilhoso fazer parte desse laboratório.

Ao CEFET por me propiciar o conhecimento não somente técnico e profissional, mas também me ensinar muito como pessoa. Obrigada pela oportunidade de poder durante dois anos ser também parte do corpo docente do Departamento de Engenharia Elétrica.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica obrigada por todo apoio, ajuda, auxílio e aprendizado que pude ter com todos os professores. Obrigada por todo conhecimento compartilhado, todas as orientações. Foi uma honra poder dividir sala e departamento com vocês, muitos dos quais, foram também meus professores durante a graduação em Engenharia Elétrica.

A todos os meus alunos que tive o prazer de lecionar ao longo de dois anos no CEFET MG. Estar em sala de aula com vocês foi uma das experiências mais maravilhosas e engrandecedoras que pude ter na vida, vocês não imaginam o quanto me ajudaram nos momentos difíceis e o quanto fui feliz com vocês. Orgulhosa dos profissionais que se formaram e irão se formar em breve.

Aos alunos que tive o imenso prazer e honra de orientar no TCC meu muito obrigada pelo aprendizado, paciência, disposição, entrega ao desenvolvimento dos trabalhos e pesquisas. Foi uma honra poder participar da trajetória de vocês e contribuir de alguma forma pessoalmente e profissionalmente. Muito orgulho de todos vocês!

A UFMG e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento.

Resumo

O objetivo do trabalho consiste em avaliar a influência da consideração de diferentes de tipos de estrutura ao longo da linha, da variação da altura de torres distintas ao longo do percurso da LT e da distribuição cumulativa de valores de pico de corrente de descarga sobre o cálculo do desempenho da linha frente a descargas atmosféricas. São apresentadas, analisadas e implementadas as principais modelagens dos componentes de uma linha de transmissão (LT) a fim de avaliar o efeito desses sobre o desempenho da LT frente a descargas atmosféricas. É explicitada a metodologia proposta em normas e brochuras para cálculo do desempenho da linha e são propostas metodologias e modelagens a fim de tornar a estimativa dos desligamentos da linha mais assertivas e condizentes com valores e comportamentos observados em campo. São apresentadas, analisadas e implementadas as principais modelagens dos componentes de uma linha de transmissão (LT) a fim de avaliar o efeito desses sobre o desempenho da LT frente a descargas atmosféricas.

O trabalho avalia o impacto da representação de uma distribuição detalhada de torres sobre a estimativa de desligamentos da linha em decorrência do *backflashover*. Avalia-se uma linha composta por estruturas de suspensão, ancoragem e estaiada e ondas de corrente representativas do Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo. São apresentadas as taxas de desligamentos associadas a linha de transmissão considerando-se cada uma das três estruturas como sendo representativa do comportamento da linha como um todo e o desempenho da LT considerando-se no cálculo não somente um tipo de estrutura representativa, mas uma distribuição considerando o efeito da geometria de cada uma das torres sobre o desempenho da linha de transmissão como um todo.

A estimativa da taxa de desligamento obtida utilizando-se a distribuição de estruturas é 11,3% e 10,8% menor do que a estimada considerando uma estrutura dominante, considerando-se as distribuições estatísticas das correntes de descarga do Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo, respectivamente.

Avalia-se também o efeito da variação da altura das torres da linha sobre o desempenho da mesma frente a descargas. Em função das diferentes condições de relevo e percurso da LT, a altura das estruturas que a compõem varia. É considerada uma linha

com estruturas do tipo autoportantes de suspensão e estaiadas e diferentes valores de altura para cada tipo de geometria.

Um outro fator importante avaliado é o impacto da distribuição do valor de pico das correntes de descarga atmosférica sobre a taxa de *backflashover* da linha. Avalia-se o desempenho de uma linha composta por estruturas autoportantes de suspensão utilizando as distribuições relacionadas a medições realizadas nas estações de Monte San Salvatore, Morro do Cachimbo, em linhas de transmissão no Japão obtidas por Takami e Okabe e as distribuições recomendadas pelo IEEE e pelo CIGRÉ. As simulações são realizadas no ATP e as correntes críticas são obtidas por meio do Método do Efeito Disruptivo. Avalia-se também o impacto da consideração ou não dessas distribuições sobre o cálculo da área de atração de uma linha de transmissão e conseqüentemente para o número de descargas que incidem sobre a linha.

A partir dos resultados obtidos, pretende-se propor metodologias de modelagem e cálculo de desempenho de linhas de transmissão a fim de se obter resultados mais condizentes com a realidade e facilitar a identificação de trechos críticos da linha para uma atuação mais assertiva na proteção da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Palavras-chave: desempenho de linhas de transmissão; descarga atmosférica; tipos de torre; *backflashover*; distribuição de valor de pico; parâmetros estatísticos

Abstract

The objective of the work is to evaluate the influence of considering different types of structures along the line, the variation in the height of different towers along the LT route and the cumulative distribution of discharge current peak values on the calculation lightning line performance. The main models of the components of a transmission line (TL) are presented, analyzed and implemented in order to evaluate the effect of these on the lightning performance of the TL. The proposed methodology is explained in standards and brochures for calculating line performance and methodologies and modeling are proposed in order to make the estimation of line outages more assertive and consistent with values and behaviors observed in the field. The main modeling of the components of a transmission line (LT) are presented, analyzed and implemented in order to evaluate their effect on the lightning performance of the LT.

The work evaluates the impact of representing a detailed distribution of towers on the estimation of line shutdowns due to backflashover. A line composed of suspension, anchoring and guyed structures and current waves representative of Monte San Salvatore and Morro do Cachimbo is evaluated. The shutdown rates associated with the transmission line are presented, considering each of the three structures as being representative of the behavior of the line as a whole and the performance of the LT considering in the calculation not only a type of representative structure, but a distribution considering the effect of the geometry of each tower on the performance of the entire transmission line.

The outage rate obtained using the distribution of structures is 11.3% and 10.8% lower than that estimated considering a dominant structure, considering the statistical distributions of the discharge currents of Monte San Salvatore and Morro of Cachimbo, respectively.

The work also evaluates the effect of varying the height of the line's towers on its performance against discharges. Depending on the different relief conditions and route of the TL, the height of the structures that make it up varies. A line is considered with self-supporting suspension and guyed structures and different height values for each type of geometry.

Another important factor evaluated is the impact of the distribution of the peak value of lightning currents on the line backflashover rate. The performance of a line composed of self-supporting suspension structures is evaluated using the distributions related to measurements carried out at the stations of Monte San Salvatore, Morro do Cachimbo, on transmission lines in Japan obtained by Takami and Okabe and the distributions recommended by the IEEE and by CIGRÉ. The impact of considering or not considering these distributions on the calculation of the attraction area of a transmission line and consequently on the number of discharges that affect the line is also evaluated. The simulations are carried out in ATP and the critical currents are obtained using the Disruptive Effect Method.

Based on the results obtained, the aim is to propose methodologies for modeling and calculating the performance of transmission lines in order to obtain results that are more in line with reality and facilitate the identification of critical sections of the line for more assertive action in protecting the line. transmission in the face of lightning.

Keywords: transmission line performance; lightning; tower types; backflashover; peak value distribution; statistical parameters

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Comprimento da sombra D_k na superfície do solo atingida pela descarga atmosférica na ausência do condutor k.....	12
Figura 2.2 – Exemplo de aplicação do MEG considerando uma linha de transmissão multicondutora	14
Figura 2.3 – Definição de raio de atração e distância de atração no tempo e nas condições para o salto final ser completado	17
Figura 2.4– Área de exposição da linha considerando o raio de atração equivalente.....	19
Figura 2.5 – Parâmetros utilizados para caracterizar ondas de descarga atmosférica	21
Figura 2.6 – Formas de onda obtida pela soma de funções de Heidler e que reproduzem os principais parâmetros medianos de primeiras descargas (a) e descargas subsequentes (b) medidas na Estação do Morro do Cachimbo.....	25
Figura 2.7 – Representação da torre de transmissão por um conjunto de condutores verticais.....	32
Figura 2.8 – Representação das impedâncias de surto de uma estrutura de suspensão (a) e de uma estrutura estaiada (b).....	35
Figura 2.9 – (a) Geometria da torre de suspensão autoportante e (b) modelo da torre no ATP.....	37
Figura 2.10 – Arranjo de aterramento de torres de transmissão.....	38
Figura 2.11 – Curvas $V \times t$ para diferentes comprimentos de isoladores.....	45
Figura 2.12 – Caracterização do Método do Efeito Disruptivo.....	46
Figura 3.1 – Distribuições de valor de pico para ondas de primeira descarga descendentes negativas.....	63
Figura 4.1 – (a) Geometria da torre de suspensão (altura torre: 37,05 m) e (b) modelo da silhueta no ATP.....	72
Figura 4.2 – (a) Geometria da torre de ancoragem (altura torre: 31,05 m) e (b) modelo da silhueta no ATP.....	73

Figura 4.3 – (a) Geometria da torre estaiada (altura torre: 37,55 m) e (b) modelo da silhueta no ATP.....	73
Figura 4.4 – Valores de impedância de aterramento para as torres de linha de transmissão.....	75
Figura 4.5 – Distribuição de impedância de pé de torre considerando a linha de transmissão inteira.....	76
Figura 4.6 – Valores de impedância de aterramento para as torres do tipo suspensão (a), a torre de ancoragem (b) e a torre do tipo estaiada (c).....	78
Figura 4.7 – Distribuição de impedância de pé de torre considerando somente a torre de suspensão (a), a torre de ancoragem (b) e a torre do tipo estaiada (c).....	79
Figura 4.8 – Formas de onda representativas adotadas nas simulações.....	80
Figura 4.9 – Sobretensões através do isolador da linha mais baixo localizado a esquerda nas torres da LT, considerando as três torres típicas da linha de 230 kV, considerando a forma de onda representativa do Monte San Salvatore e assumindo valores de impedância de pé de torre de 10 Ω (a), 20 Ω e 40 Ω (c).....	82
Figura 4.10 – Sobretensões através do isolador da linha mais baixo localizado a esquerda nas torres da LT, considerando as três torres típicas da linha de 230 kV, considerando a forma de onda representativa do Morro do Cachimbo e assumindo valores de impedância de pé de torre de 10 Ω (a), 20 Ω e 40 Ω (c).....	84
Figura 4.11 – Efeito disruptivo considerando a forma de onda representativa do Monte San Salvatore e as silhuetas de suspensão, ancoragem e estaiada para $Z_p = 10 \Omega$ (a), $Z_p = 20 \Omega$ (b) e $Z_p = 40 \Omega$ (c).....	87
Figura 4.12 – Efeito disruptivo considerando a forma de onda representativa do Morro do Cachimbo e as silhuetas de suspensão, ancoragem e estaiada para $Z_p = 10 \Omega$ (a), $Z_p = 20 \Omega$ (b) e $Z_p = 40 \Omega$ (c).....	88
Figura 4.13 – (a) Geometria da torre autoportante de suspensão (b) Modelo da torre no ATP.....	92
Figura 4.14 – (a) Geometria da torre estaiada (b) Modelo da torre no ATP.....	93
Figura 4.15 – Taxa de desligamento de torres autoportantes de suspensão.....	96
Figura 4.16 – Taxa de desligamento de torres estaiadas.....	96
Figura 4.17 – (a) Geometria da torre de 138 kV, as flechas dos cabos fase e de blindagem são respectivamente 11,20 m e 7,2 m e altura da torre equivalente a 27,3 m (b) Geometria	

da torre de 230 kV, as flechas dos cabos fase e de blindagem são respectivamente 18,165 m e 14,44 m e altura da torre equivalente a 37,5 m (c) Geometria da torre de 500 kV, as flechas dos cabos fase e de blindagem são respectivamente 21,17 m e 13,61 m e altura da torre equivalente a 46,8 m.....	99
Figura 4.18 – Formas de onda representativas de corrente de primeira descarga utilizadas nas simulações.....	100
Figura 4.19 – Típicas formas de onda de sobretensão através do isolador externo da linha de 230 kV da linha, considerando a injeção das correntes de descarga no topo da torre e assumindo a impedância de pé de torre de (a) 10 Ω (b) 30 Ω e (c) 60 Ω	105
Figura 4.20 – Corrente crítica x impedância de pé de torre para linhas de (a) 138 kV (b) 230 kV e (c) 500 kV.....	107
Figura 4.21 – Taxa de <i>backflashover</i> para as linhas de transmissão (a) 138 kV, (b) 230 kV, (c) 500 kV, considerando o conceito de raio de atração médio e diferentes curvas de distribuição de corrente. Na esquerda, o gráfico considerando as impedâncias de 10 a 60 Ω , na direita um zoom nas impedâncias de 10 a 30 Ω	109
Figura 4.22 – Diferenças entre as taxas de <i>backflashover</i> estimadas considerando a distribuição do IEEE como referência comparado ao uso de diferentes curvas de distribuição de corrente para (a) 138 kV (b) 230 kV e (c) 500 kV.....	110
Figura 4.23 – Taxa de <i>backflashover</i> para as linhas de transmissão (a) 138 kV, (b) 230 kV, (c) 500 kV, considerando o conceito de raio de atração equivalente e diferentes curvas de distribuição de corrente. Na esquerda, o gráfico considerando as impedâncias de 10 a 60 Ω , na direita um zoom nas impedâncias de 10 a 30 Ω	112
Figura 4.24 – Diferenças entre as taxas de <i>backflashover</i> estimadas considerando a distribuição do IEEE como referência comparado ao uso de diferentes curvas de distribuição de corrente para (a) 138 kV (b) 230 kV e (c) 500 kV.....	115

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Constantes c e d do raio de atração, $r_s = cI_0^d$	15
Tabela 2.2 - Modelos de torre de transmissão baseados em uma única seção de transmissão sem perdas	33
Tabela 2.3 - Variação da impedância de surto da parte inferior da torre em função da altura da estrutura.....	37
Tabela 3.1 - Parâmetros de curvas cumulativas de distribuições de descarga.....	65
Tabela 4.1 - Correntes Críticas para as silhuetas típicas da linha de 230 kV considerando a forma de onda representativa e a distribuição de valores de pico de corrente de descarga atmosférica associadas ao Monte San Salvatore.....	85
Tabela 4.2 - Correntes Críticas para as silhuetas típicas da linha de 230 kV considerando a forma de onda representativa e a distribuição de valores de pico de corrente de descarga atmosférica associadas ao Morro do Cachimbo.....	85
Tabela 4.3 - Taxa de backflashover considerando a metodologia convencional e proposta para correntes do Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo.....	89
Tabela 4.4 - Taxa de desligamento da torre autoportante de suspensão.....	95
Tabela 4.5 - Taxa de desligamento da torre estaiada.....	95
Tabela 4.6 - Dados dos cabos condutores.....	98
Tabela 4.6 - Comparação dos parâmetros medianos de correntes de primeiras descargas medidas em torres instrumentadas com dados extraídos das curvas apresentadas na Figura 4.18.....	101

Sumário

Agradecimentos.....	5
Resumo.....	7
Abstract.....	10
Lista de Figuras.....	12
Lista de Tabelas.....	14
Sumário.....	15
Capítulo 1- Introdução.....	19
1.1. Contextualização.....	19
1.2. Objetivos.....	20
1.3. Organização do texto.....	21
1.4. Publicações.....	22
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	24
2.1. Introdução.....	24
2.2. Passos gerais para determinação do desempenho de linhas de transmissão.....	25
2.3. Desafios envolvendo os passos gerais para determinação do desempenho de linhas de transmissão.....	29
2.3.1. Número de descargas que atingem a linha.....	29
2.3.2. Modelagem da corrente de retorno.....	39
2.3.3. Modelagem dos vãos da linha de transmissão.....	43
2.3.4. Modelagem das Torres.....	47
2.3.4.1. Silhueta dominante x distribuição de torres.....	52
2.3.4.2. Variação da altura da torre.....	53
2.3.5. Modelagem do aterramento de pé de torre.....	56
2.3.6. Modelagem da ruptura do isolamento e determinação da corrente crítica de descarga.....	61
2.4. Considerações Finais.....	66
Capítulo 3 Metodologia.....	68

3.1. Introdução.....	68
3.2. Cálculo de Desempenho de Linhas de Transmissão considerando uma única silhueta dominante.....	69
3.3. Cálculo de Desempenho de Linhas de Transmissão considerando uma representação detalhada da distribuição de torres.....	73
3.4. Cálculo do Desempenho de linhas de transmissão considerando uma única altura e considerando variação de altura das torres.....	75
3.5. Distribuições de valores de pico das correntes de descarga atmosférica: um breve histórico.....	77
3.6. Impacto da distribuição dos valores de pico das correntes de descarga atmosférica no cálculo do número de descargas incidentes na linha.....	84
3.7. Considerações finais.....	86
Capítulo 4 - Resultados.....	88
4.1. Introdução.....	88
4.2. Efeito da representação detalhada da distribuição de torres no desempenho de linhas de transmissão.....	89
4.2.1. Estudo de caso.....	89
4.2.1.1 Torres da Linha de Transmissão.....	89
4.2.1.2 Impedância de aterramento da LT.....	92
4.2.1.3 Formas de onda de corrente.....	97
4.2.2. Sobretensões típicas na cadeia de isolares.....	98
4.2.3. Efeito disruptivo associado.....	104
4.2.4. Taxa de backflashover da LT.....	107
4.3. A influência da variação da altura das torres ao longo da linha de transmissão na taxa de desligamento de LTS.....	110
4.3.1. Estudo de caso.....	110
4.3.1.1 Torres da Linha de Transmissão.....	110
4.3.1.2 Impedância de aterramento da LT.....	112
4.3.1.3 Formas de onda de corrente.....	113
4.3.2. Taxa de backflashover da LT.....	113
4.4. A influência de diferentes distribuições do valor de pico de corrente de primeiras descargas na taxa de desligamentos de LTs.....	116
4.4.1. Estudo de caso.....	117

4.4.2. Formas de onda de corrente.....	118
4.4.3. Torres da Linha de Transmissão.....	120
4.4.4. Impedância de aterramento.....	121
4.4.5. Curvas de distribuição do valor pico.....	121
4.4.5.1. Formas de ondas de sobretensão típicas.....	122
4.4.5.2. Correntes Críticas.....	124
4.4.6. Taxa de Backflashover: Influência da curva de distribuição de corrente adotada para determinar $P(I_p > I_{crit})$	127
4.4.7. Taxa de Backflashover: Influência da curva de distribuição de corrente adotada para determinar $P(I_p > I_{crit})$ e N_{TL}	131
4.5. Considerações Finais.....	134
Capítulo 5 - Conclusão.....	137
5.1. Conclusões.....	137
5.2. Contribuições da Tese.....	140
5.3. Propostas de Continuidade.....	141
Referências Bibliográficas.....	142

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contextualização

Linhas de transmissão (LTs) são elementos fundamentais no fornecimento de energia elétrica. Ao todo, são 179.311 km de linhas de transmissão instaladas no Brasil em 2022, com previsão de expansão para 216.759 km até 2027, segundo o Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (Sistema Interligado Nacional) 2022-2027 divulgado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Esses dados e o Plano de Operação podem ser consultados na página oficial do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em www.ons.org.br.

A incidência de descargas atmosféricas em LTs pode levar a sobretensões severas sobre os isoladores e são as principais causas de desligamentos não programados. Nesse contexto, a incidência de descargas atmosféricas representa um risco elevado à continuidade da operação da LT. Os órgãos reguladores estabelecem limites permissíveis os desligamentos que, quando ultrapassados, resultam em perdas no faturamento e multas para as concessionárias de energia. A duração e o número de interrupções no serviço, são alguns dos índices avaliadores da qualidade do sistema elétrico. A ONS permite até 2 desligamentos/100 km/ano para linhas de 230 kV e 1 desligamento/100 km/ano para linhas com tensões iguais ou superiores a 345 kV em função da incidência de descargas atmosféricas em linhas [1].

Nos últimos anos, o conhecimento tem sido melhorado em várias áreas importantes para o cálculo do desempenho de linhas de transmissão, por exemplo, na caracterização do solo, na modelagem do aterramento frente a correntes impulsivas [2]–[4] e na obtenção de melhores estimativas a respeito da densidade de descargas atmosféricas para o solo [5]. Adicionado a isso, os projetos de linhas de transmissão tem sido cada vez mais bem documentados em função das exigências de agências reguladoras.

Assim, um número maior de informações estão disponíveis, o que permite uma avaliação mais detalhada a respeito da estimativa do desempenho da LT.

Em 2021, foi publicada pelo CIGRE uma brochura técnica com atualizações nos procedimentos para estimativa do cálculo de desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas [6]. Nesse documento, recomenda-se a utilização de distribuições de valor de pico das correntes de descargas atmosféricas obtidas a partir de medições locais sempre que estiverem disponíveis, visto que os parâmetros de descargas variam em função da localização geográfica.

Tendo em conta esses comentários iniciais e as exigências de estimativas de desempenho de linhas de transmissão cada vez mais precisos, este trabalho apresenta uma contribuição ao estudo do desempenho de linhas. Os seguintes aspectos são abordados:

- i) Proposição de metodologia de cálculo de desempenho de linhas de transmissão considerando uma representação detalhada da distribuição de torres.
- ii) Avaliação do impacto da distribuição dos valores de pico das correntes de descarga atmosférica na taxa de desligamento, *backflashover*.
- iii) Avaliação do efeito da variação de altura de diferentes estruturas de linhas de transmissão ao longo do percurso da linha.
- iv) Avaliação de diferentes metodologias para o cálculo da área de atração de uma linha de transmissão e conseqüentemente para o número de descargas que incidem sobre a linha.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de uma análise mais detalhada sobre o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. O trabalho investiga aspectos relacionados ao estudo do desempenho de linhas de transmissão:

- Avaliar as sobretensões nos isoladores de diferentes tipos de torres que compõem a linha a partir da incidência da descarga atmosférica no topo da estrutura.
- Avaliar e comparar o desempenho da linha calculado via metodologia de cálculo de desempenho de linhas considerando uma única torre dominante (recomendada pela literatura e guias internacionais) e via a metodologia proposta pelo trabalho onde se considera uma representação detalhada da distribuição de torres.
- Avaliar o impacto da variação de altura das estruturas ao longo da linha de transmissão considerando tipos de estruturas que comumente compõe linhas reais, torres do tipo autoportantes de suspensão e estaiadas.
- Analisar o desempenho de uma linha de transmissão considerando diferentes distribuições de valor de pico das correntes de descarga, visto que cada distribuição advinda de medições caracteriza a atividade atmosférica de uma determinada região.
- Avaliar as formas de onda de sobretensões para diferentes ondas representativas de parâmetros medidos de descargas atmosféricas.
- Avaliar metodologias de cálculo da área de atração da linha de transmissão e o efeito dela sobre o desempenho da linha de transmissão.

1.3. Organização do texto

Este texto está estruturado em cinco capítulos, incluindo este introdutório.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica com as principais etapas do processo de avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e as principais metodologias disponíveis na literatura utilizadas para a modelagem dos elementos do sistema, obtenção das sobretensões e cálculo da taxa de desligamentos da linha. São enumeradas as vantagens, desvantagens e limitações de cada técnica e modelagem.

O Capítulo 3 apresenta e detalha a metodologia de cálculo de desempenho de linhas de transmissão considerando-se apenas a torre dominante, recomendada pela literatura e guias de desempenho. Uma metodologia para cálculo de desempenho é proposta na qual considera-se, no cálculo da estimativa de desempenho da LT três tipos de torres dominantes. Avalia-se o efeito de uma distribuição de torres detalhada,

considerando os principais tipos de torres que podem estar presentes em uma LT, sobre a taxa de desligamentos da linha em função do *backflashover*. Também é avaliado o impacto da variação do tipo de torre ao longo do percurso da linha. São considerados variados valores de altura de torres e duas geometrias típicas de uma linha de transmissão de 230 kV. Avalia-se o impacto da consideração da característica atmosférica de onde a LT é instalada, através das curvas de distribuição de valor de pico, tendo em vista que as descargas são um fenômeno de natureza aleatória e variam em função da localização geográfica. Os parâmetros de descargas atmosféricas são comumente descritos através de distribuições cumulativas de probabilidade obtidas a partir de dados obtidos via medições em torres instrumentadas.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados das simulações realizadas. São comparados os resultados obtidos considerando-se a metodologia recomendada pela literatura e guias de desempenho de linhas de transmissão e a metodologia proposta neste trabalho, que propõe a consideração de uma distribuição de torres presentes na LT. Também são apresentados os resultados do cálculo de desempenho considerando-se diferentes distribuições de valor de pico de primeiras descargas comumente recomendadas pela literatura, e são consideradas as formas de onda representativas de primeiras descargas obtidas no Monte San Salvatore, Morro do Cachimbo e em linhas de transmissão do Japão. Apresenta-se também os resultados associados às análises realizadas da variação da altura de torres ao longo da linha de transmissão sobre as taxas de desligamento por *backflashover*.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas e os principais pontos de destaque a respeito das conclusões alcançadas através do desenvolvimento do trabalho e as propostas de continuidade.

1.4. Publicações

As seguintes publicações são resultados dos desenvolvimentos deste trabalho:

- Daiane Conceição, Miguel Guimarães, Rafael Alipio, William Chisholm, “**A Discussion on the use of IEEE Flash in the Brazilian Context: Why do distinct versions of the**

program are likely to provide very different results?”, International Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brasil, 2021.

- Daiane Conceição, Rafael Alipio, William Chisholm e Ivan J. S. Lopes, **“Lightning Performance Calculation of Transmission Lines Considering a Detailed Modeling of the Tower Geometries Distribution”**, International Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brasil, 2021.

- Daiane Conceição, Ivan J. S. Lopes, Rafael Alipio, **“An Investigation into the Effect of the Probabilistic Distribution of Lightning Current Amplitude on a Transmission Line Backflashover Rate”**-35° ICLP (*International Conference on Lightning Protection*)/XVI SIPDA (*International Symposium on Lightning Protection*) em Setembro de 2021, Colombo, Sri Lanka.

- Daiane Conceição, Ivan J. S. Lopes, Rafael Alipio, **“An investigation into the impact of tower height variation on transmission line performance considering different probability distribution”**- 36° ICLP (*International Conference on Lightning Protection*) em outubro de 2022, Cape Town, Africa do Sul.

- Conceição, D.; Alipio, R.; Lopes, I.J.S.; Chisholm, W. **“A Comprehensive Analysis on the Influence of the Adopted Cumulative Peak Current Distribution in the Assessment of Overhead Lines Lightning Performance.”** *Energies* 2023, 16, 5836. <https://doi.org/10.3390/en16155836>.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta as principais etapas do processo de avaliação de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, uma revisão bibliográfica a respeito das principais modelagens e as técnicas disponíveis na literatura para a determinação do comportamento transitório de linhas frente a correntes impulsivas atmosféricas.

2.1. Introdução

As linhas de transmissão são susceptíveis a diversas ocorrências elétricas, desde fenômenos de baixa frequência como os curtos-circuitos até aqueles de alta frequência como as descargas atmosféricas. Segundo o Relatório de Indicadores de Desempenho do SIN divulgado pelo ONS, referente aos dados obtidos até 2023, as linhas de transmissão (LTs) foram responsáveis por aproximadamente 70% das perturbações envolvendo a rede básica de energia, sendo os outros 30% divididos em subestações da rede básica e instalações fora da rede básica [7]. Nesse contexto, a incidência de descargas atmosféricas representa um risco elevado à continuidade da operação de LTs. De acordo com o relatório, elas são responsáveis por entre 35% dos desligamentos das linhas [8] representando a principal causa de perturbações em linhas de transmissão da rede básica.

Diante disso, é imprescindível uma avaliação rigorosa do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Essa análise pode ser realizada em plataformas de cálculo de transitórios eletromagnéticos como o ATP (*Alternative Transient Program*)[9] considerando diferentes abordagens e metodologias de cálculo ou em programas de cálculo de desempenho de linhas como o IEEE Flash [10], disponibilizado pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ambos de domínio público.

A fim de que os resultados obtidos pelas plataformas sejam condizentes com a realidade, é crucial que a modelagem da descarga atmosférica e dos elementos associados à linha de transmissão sejam rigorosos. Os modelos e técnicas empregados devem refletir, de maneira mais fidedigna possível, o comportamento dos elementos frente a solicitações impulsivas provenientes de descargas atmosféricas.

O objetivo deste capítulo é apresentar as modelagens mais representativas dos componentes, as técnicas e metodologias envolvidas no processo de avaliação de desempenho de linhas de transmissão. Existem muitas incertezas associadas ao comportamento da LT frente a fenômenos impulsivos. Para obter um resultado mais preciso, é fundamental conhecer as modelagens, técnicas e metodologias disponíveis na literatura, assim como as aplicabilidades e limitações de cada uma. Tal qual as possibilidades e limitações de plataforma computacionais de simulação, modelagem e cálculo de desempenho. A seguir, são apresentados os passos utilizados na determinação do desempenho de linhas de transmissão e as principais modelagens e técnicas relacionadas a cada etapa.

2.2. Passos gerais para determinação do desempenho de linhas de transmissão

A avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas encerra muitas complexidades e incertezas. A descarga possui caráter aleatório e a sua incidência em uma LT produz sobretensões e fenômenos eletromagnéticos capazes de causar perturbações no comportamento da linha, afetando a qualidade da energia transmitida e, em alguns casos, provocando a interrupção da transmissão.

O estudo de desempenho de linhas pode ser dividido em etapas a fim de facilitar sua análise. A avaliação do desempenho pode ser dividida em:

- Determinação do número de descargas que incidem na linha: obtenção da densidade de descargas para o solo (N_g) e cálculo da área de exposição da linha;
- Modelagem da onda de corrente de descarga considerando suas principais características e o caráter aleatório do seu comportamento;

- Determinação das sobretensões transitórias: modelagem de torres, vãos da linha, sistema de aterramento e do ponto de incidência da descarga;
- Determinação da ruptura, ou não, da cadeia de isoladores com base nas sobretensões transitórias as quais são submetidos durante o fenômeno.

Há diversos modelos na literatura utilizados para se determinar o número de descargas atmosféricas que incidem sobre a linha de transmissão. Segundo Salari [11], há duas categorias principais: os modelos fundamentados no Método Eletrogeométrico (MEG) e os embasados no Método de Progressão do Líder (MPL). Além desses, há o método nomeado como Raio de Atração (RA), podendo ser comumente denominado como Raio de Atração Equivalente ou Raio de Atração Médio a depender da adoção ou não de distribuições cumulativas de corrente. Esse último é um método simplificado, derivado do MPL, e comumente empregado para cálculo da incidência de descargas na linha e recomendado pelo IEEE 1243 "*IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*". Em virtude de sua simplicidade, o RA é um método difundido em guias internacionais para o cálculo de desempenho e utilizado, inclusive, no programa para cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, o IEEE FLASH. No entanto, o método que utiliza o conceito de raio de atração apresenta simplificações e essas simplificações podem impactar diretamente no cálculo da incidência de descargas que incidem na LT.

A caracterização da forma de onda da corrente de descarga atmosférica é um fator crucial na avaliação do desempenho de linhas frente a descargas. Fundamentadas em medições, foram propostos diversos modelos representativos das formas de onda de corrente de descarga. Dentre elas, a forma de onda do tipo rampa (utilizada pelo IEEE FLASH), dupla rampa, dupla exponencial, CIGRÉ e Heidler [12]. A exatidão dos resultados obtidos está condicionada à forma de onda de corrente utilizada e, por isso, é necessário conhecer as vantagens e limitações de cada modelo.

Determinadas a área de exposição da linha, e conseqüentemente o número de descargas incidentes sobre a mesma, e a forma de onda da corrente de descarga, o próximo passo consiste em calcular as sobretensões transitórias ocasionadas pela incidência da descarga nas torres da linha. Para isso, é necessário modelar os componentes da linha de transmissão: torre, aterramento e vãos da linha.

A torre é comumente representada utilizando a teoria de linhas de transmissão, por meio de uma ou várias seções de linha de transmissão monofásica e sem perdas. A linha de transmissão é definida por uma impedância de surto e tempo de trânsito da onda na linha. Na literatura, existem várias expressões para o cálculo da impedância de surto de torres de LTs em função do tipo de incidência, vertical ou horizontal, e geometria da torre [1],[6],[13].

Importante salientar que a representação da estrutura da torre, de forma simplificada, através de uma única linha de transmissão monofásica e sem perdas (como o empregado pelo IEEE FLASH), não é capaz de representar as variações da geometria da estrutura ao longo de sua altura. Uma forma mais precisa de representação consiste na utilização de várias seções de linha de transmissão monofásicas e sem perdas, onde as impedâncias de surto de cada seção são calculadas através da utilização da fórmula de Jordan corrigida revisada em [14].

Os aterramentos de LTs são submetidos a diversos tipos de solicitações elétricas. Essas ocorrências podem ser caracterizadas como lentas (curtos-circuitos) ou rápidas (descargas atmosféricas). Para cada tipo de ocorrência, o aterramento apresentará um comportamento distinto. A opção por uma modelagem inadequada do aterramento, que não seja capaz de representar os efeitos do fenômeno analisado, pode levar a erros significativos na avaliação do comportamento do sistema. A maneira mais rigorosa de se representar o aterramento é através da impedância harmônica. No entanto, a sua determinação é complexa. O aterramento pode ser caracterizado de forma aproximada por meio de sua impedância impulsiva. Essa representação leva a resultados aceitáveis em comparação aos obtidos através da impedância harmônica [15]–[19].

As linhas de transmissão possuem parâmetros distribuídos e dependentes da frequência. A representação dessas características é fundamental para a avaliação assertiva da propagação de ondas de corrente impulsivas, como as descargas atmosféricas. No ATP/EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) existem, atualmente, quatro modelos com parâmetros distribuídos e um com parâmetros concentrados. Dos quatro com parâmetros distribuídos, três consideram a variação dos parâmetros da linha com a frequência. Desses, apenas o modelo de Noda é descrito diretamente no domínio das fases, sendo que os outros, JMarti e Semlyen, empregam a representação modal [20], [21]. O modelo mais comumente utilizado na literatura, e que caracteriza de modo

assertivo as linhas de transmissão com assimetria não significativa da disposição de seus condutores, é o modelo JMarti.

A etapa final da avaliação de desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas consiste na determinação da ruptura, ou não, da cadeia de isoladores. Alguns programas para avaliação de transitórios em linhas de transmissão não possuem componentes específicos para a caracterização dos isoladores. No entanto, há metodologias capazes de avaliar a disrupção na linha. Para uma avaliação precisa da ocorrência de descarga disruptiva no isolamento da LT, é necessário a consideração do pico da onda de sobretensão, da forma da onda, da polaridade e do tempo de duração. Os métodos mais robustos disponíveis na literatura são os de efeito disruptivo (Método DE) e o de progressão do líder (MPL), sendo que o primeiro não é recomendado para formas de sobretensão que não apresentem polaridade única e o segundo não apresenta limitações, embora sua implementação seja mais complexa que a do Método DE [12], [13].

Uma vez conhecido o menor valor de sobretensão capaz de causar a disrupção do isolamento da linha, é primordial o cálculo do valor de pico da forma de onda de corrente associada a essa sobretensão. O menor valor de pico de uma corrente de descarga atmosférica capaz de provocar uma falha no isolamento da linha é denominado corrente crítica.

Para o cálculo do número de desligamentos de uma linha de transmissão em razão da incidência de descargas atmosféricas, é necessário também determinar a densidade de descargas para a terra na região, a área de exposição da linha e a probabilidade de ocorrência da corrente crítica. A probabilidade de ocorrência é dada através de uma função de densidade de probabilidade (PDF) e os parâmetros dessa função são obtidos a partir de dados advindos de medições de descargas atmosféricas reais. É importante destacar que a PDF pode impactar em dois pontos distintos na estimativa do número de desligamentos da linha, no cálculo da área de exposição da linha e na probabilidade de ocorrência de correntes superiores à corrente crítica. Isso será mais bem explicitado nas próximas seções e no Capítulo 3.

As principais distribuições estatísticas de corrente obtidas a partir da PDF são as distribuições de Berger, baseada em medições realizadas no Monte San Salvatore na Suíça [22], a do Morro do Cachimbo, embasada em medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo em Minas Gerais [23] e em [6] recomenda-se também a distribuição de Takami e Okabe, advinda de medições de corrente realizadas em linhas de transmissão do Japão

[24]. Para obtenção de resultados mais compatíveis com a realidade, é importante a utilização da distribuição que melhor represente as características das descargas atmosféricas relativas à região na qual a linha está localizada. É importante salientar aqui que a recomendação dessas distribuições advém do fato de serem obtidas através de torres instrumentadas, e em razão disso, possuem maior confiabilidade dos resultados obtidos em comparação a outras metodologias de medições realizadas em outras localizações no mundo [24].

O processo de avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é complexo. Diante disso, é comum a adoção de simplificações em função das incertezas associadas à disponibilidade de dados, confiabilidade e/ou limitação dos modelos disponíveis, grau de precisão requerido etc. Nas seções a seguir, cada etapa é detalhada, assim como são descritos os principais modelos e métodos empregados na literatura para determinação do comportamento transitório da linha e as vantagens, desvantagens e limitações associadas a cada um.

2.3. Desafios envolvendo os passos gerais para determinação do desempenho de linhas

2.3.1. Cálculo da área de exposição e do número de descargas que atingem a linha: Modelos de Incidência

A incidência de uma descarga sobre uma linha de transmissão aérea produz um fenômeno transitório eletromagnético que depende da geometria e dos parâmetros da linha, assim como dos parâmetros da descarga atmosférica. O cálculo do número de descargas que incidem sobre a linha baseia-se nos chamados modelos de incidência e em técnicas estatísticas, devido ao seu caráter aleatório. Esse número é expresso em termos do número de descargas por cem quilômetros de comprimento da linha por ano [4], [6], [10].

Na literatura, existem diversos modelos capazes de representar o complexo fenômeno da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Uma pesquisa sobre todos os documentos publicados sobre o tema não é o objetivo deste trabalho, mas, de acordo com Salari [11], aceita-se pela literatura que esses modelos podem ser agrupados em duas categorias principais: 1) técnicas baseadas no chamado

modelo eletrogeométrico (MEG), eventualmente considerando apenas descargas verticais [25], [26],[27] e 2) técnicas baseadas no modelo de progressão do líder (MPL) [28], [29].

Na Figura 2.1, é possível observar um condutor de uma linha de transmissão, de índice k , paralelo a superfície da terra. O ângulo θ é o ângulo com a linha vertical de uma projeção ortogonal do líder do canal de descarga em um plano vertical perpendicular à direção da linha. De acordo com as bases do MEG, r_{sk} e $r_{s,solo}$ são os raios de atração, ou *striking distances*, do condutor e da terra, respectivamente [30].

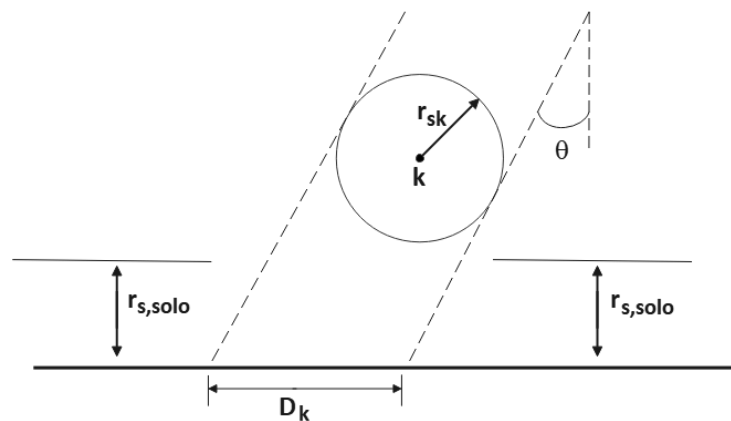


Figura 2. 1 – Comprimento da sombra D_k na superfície do solo atingida pela descarga atmosférica na ausência do condutor k . Adaptado de [11], [30].

Para cada valor de raio de atração r_{sk} e para cada valor do ângulo θ , uma descarga irá atingir o condutor de índice k . Na ausência do condutor, a descarga atingiria a superfície da terra em um caminho paralelo a linha, de comprimento D_k . Ademais, há uma relação entre os raios de atração, do condutor e do solo, e a amplitude da corrente de descarga I_0 . Essa relação é expressa através da seguinte forma:

$$r_s = cI_p^d \quad (2.1)$$

onde c e d são valores constantes ou dependentes da altura do condutor e do ponto de incidência (condutor, cabo de blindagem ou superfície da terra) e I_p corresponde ao valor de pico da corrente da descarga atmosférica [30].

É importante ressaltar que a amplitude da corrente de descarga a ser considerada no MEG é a amplitude da primeira descarga. O raio de atração de um condutor k é calculado em função do valor de pico da corrente de descarga (expressão (2.1)). Logo, é possível afirmar que D_k é uma função de I_p (valor de pico da onda de corrente de descarga atmosférica) e θ , $D_k(I_p, \theta)$.

Em virtude do caráter aleatório de descargas atmosféricas, as variáveis I_p e θ podem ser caracterizadas através das funções densidade de probabilidade $p_{I_p}(I_p)$ e $p_\theta(I_\theta)$, respectivamente [30]. Um valor médio do parâmetro D_k , considerando todos os valores de θ e I_p , pode ser obtido através da expressão abaixo:

$$\overline{D_k} = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} D_k(\theta, I_p) p_\theta(\theta) p_{I_p}(I_p) d\theta dI_p \quad (2.2)$$

Note que, na expressão (2.2) as variáveis I_p e θ são assumidas estatisticamente independentes, ou seja, a ocorrência de um determinado valor de pico da corrente não depende do ângulo de incidência da descarga e o ângulo de incidência não depende do valor de pico da corrente. Para o caso da consideração de incidência somente de descargas verticais ($\theta = 0^\circ$), a expressão (2.2) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\overline{D_k} = \int_0^{\infty} D_k(I_p) p_{I_p}(I_p) dI_p \quad (2.3)$$

É importante salientar que o modelo eletrogeométrico considera o efeito de atração do solo ($r_{s,solo}$). À medida em que se aumenta o valor de pico da corrente, maiores são os valores obtidos para os raios de atração, tanto do solo quanto do condutor. Dessa maneira, $r_{s,solo}$ irá interceptar as circunferências associadas aos condutores e irá diminuir a exposição total de um dado condutor k . Uma parcela das descargas que incidiriam no condutor passarão a incidir no solo. A consideração do raio de atração do solo tende a diminuir a área de exposição da linha a partir de um determinado valor de I_p . Sendo assim, é de extrema importância avaliar esse efeito a fim de se determinar com exatidão o valor de D_k .

Essa técnica pode ser facilmente estendida para o caso de uma linha de transmissão com vários condutores. A Figura 2.2 ilustra uma configuração de linha trifásica com dois cabos de blindagem (índices 1 e 2) e três condutores fase (índices 3, 4 e 5). É importante salientar que assim como o valor de pico da descarga o ângulo de incidência também possui um caráter aleatório. Porém, o mesmo raciocínio pode ser utilizado para consideração de uma incidência vertical ($\theta = 0^\circ$) [11], [30]. A área de exposição de todos os condutores da linha para uma dada amplitude de corrente, em metros, é dada pelo somatório a seguir:

$$D_{total} = \sum_{i=k}^n D_i \quad (2.4)$$

onde n é o número total de condutores da linha analisada.

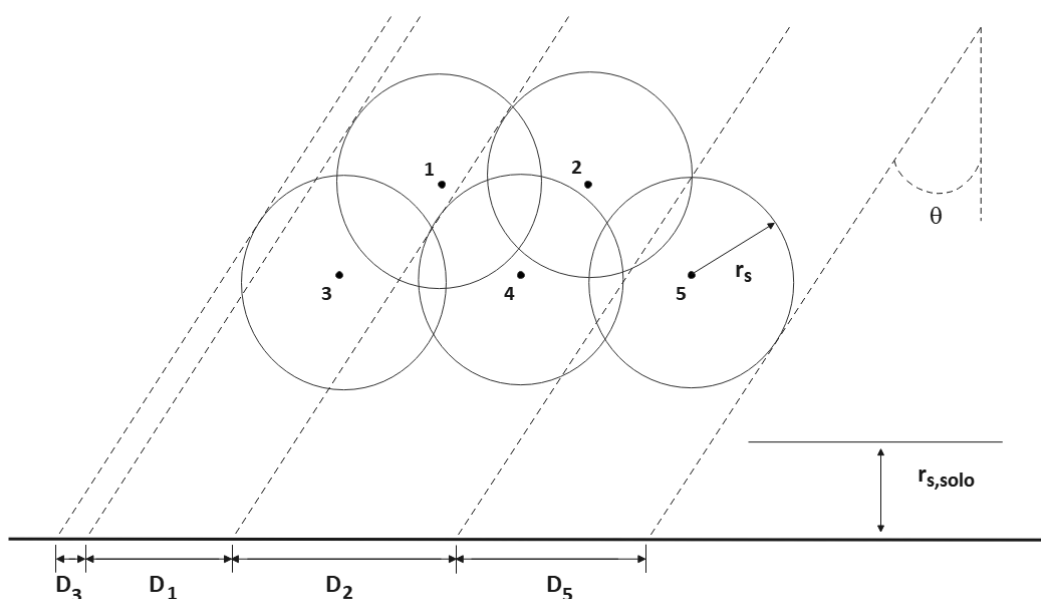


Figura 2. 2 – Exemplo de aplicação do MEG considerando uma linha de transmissão multicondutora. Adaptado de [11], [30].

As constantes c e d na expressão (2.1) são normalmente determinadas por meio da comparação entre o desempenho real de linhas de transmissão e aquele estimado por meio de modelos teóricos. Há diversos trabalhos na literatura que propõem valores para essas constantes. Alguns deles são apresentados na Tabela 2.1, onde h_m e h_t se referem a

altura média dos cabos fase e altura da torre, respectivamente. A altura média é definida como a altura do cabo na torre subtraída de dois terços da flecha.

Os coeficientes utilizados para os cálculos do raio de atração do condutor e do solo, propostos pelo grupo de trabalho do IEEE [31] e recomendados pelo IEEE Std. 1243 de 1997 [27], obtiveram resultados satisfatórios quando comparados a resultados obtidos em campo e experimentalmente. As expressões para o cálculo de r_{sk} e $r_{s,solo}$ são dadas por:

$$r_{sk} = 10 \cdot I^{0,65} \quad (2.5)$$

$$r_{s,solo} = \begin{cases} [3,6 + 1,7 \cdot \ln(43 - y_c)] \cdot I^{0,65} & y_c < 40m \\ 5,5 \cdot I^{0,65} & y_c \geq 40m \end{cases} \quad (2.6)$$

onde

y_c é a altura média do condutor mais baixo em metros, dado pela altura da torre subtraída de dois terços da flecha.

Tabela 2.1 - Constantes c e d do raio de atração, $r_s = cI_0^d$. Adaptado de [31].

	Solo		Condutor fase e Cabo de blindagem	
	$r_{s,solo}$		r_{sk}	
Fonte	c	d	c	d
Young, et al	27	0,32	(1)	0,32
Armstrong	6	0,80	6,7	0,80
Brown	6,4	0,75	7,1	0,75
Love	10	0,65	10	0,65
Anderson	6,4; 8 ou 10	0,65	10	0,65
IEEE Working Group	5,12; 6,4 ou 8	0,65	8	0,65
Eriksson	Para o condutor fase: $c = 0,67 \cdot h_m^{0,6}$, $d = 0,74$			
	Para o cabo de blindagem: $c = 0,67 \cdot h_t^{0,6}$, $d = 0,74$			
	Para o solo: $c = 0$			
Rizk	Para o condutor fase e cabo de blindagem $c = 1,57 \cdot h^{0,45}$, $d = 0,69$			
	Para o solo: $c = 0$			

(1) $c = 12000 / (462 - h_t)$, com $c > 27$

É importante salientar que o Modelo Eletrogeométrico (MEG) não considera explicitamente a dependência dos raios de atração, tanto do condutor quanto do solo, com a altura da torre. Essa variável não é considerada em razão de que já é esperado que estruturas mais altas possuam maior capacidade de atração de descargas do que estruturas mais baixas. Esse ponto é tipicamente percebido como uma limitação do modelo eletrogeométrico clássico. No entanto, os modelos MEG são capazes de indicar uma forte correlação entre a carga impulsiva da descarga e o valor de corrente de pico, em função nas inúmeras observações realizadas ao longo dos anos e que são base para o modelo [10,11,32].

Apesar de não ser o escopo deste trabalho aprofundar em todos os modelos de incidência em linhas de transmissão é importante mencionar também o método de progressão do líder, MPL. Com o objetivo de resolver certas limitações do MEG, o MPL foi desenvolvido para melhorar a simulação do processo de conexão (*attachment*) da descarga com estruturas aterradas [6,10,25-26,29]. O método se baseia em um conhecimento profundo do processo físico atrelado ao fenômeno, buscando alcançar resultados mais precisos e consistentes.

O MPL se baseia no processo físico de desenvolvimento da descarga até a incidência em uma estrutura aterrada, na simulação passo a passo do processo de conexão do líder descendente (*stepped leader*) até o início do ponto de conexão advindo da estrutura, líder ascendente (*upward leader*), Figura 2.3. Conceitos importantes na aplicação do MPL ao problema de incidência de descargas atmosféricas em estruturas aterradas são os conceitos de distância de atração e raio de atração.

A distância de atração é definida como uma distância lateral entre o líder descendente (*downward leader*) e a estrutura, distância horizontal entre o eixo vertical do líder descendente e a estrutura no momento e nas condições para o salto final ser completado, *final jump*. Raio de atração do condutor, é definido como entre a ponta do líder descendente e o futuro ponto de terminação na estrutura no momento e nas condições para o salto final ser completado. O processo de conexão entre a estrutura aterrada e o canal de descarga está ilustrado na Figura 2.3.

O raio de atração R_a é geralmente descrito pela equação a seguir

$$R_a(h, I) = \xi h^E I^F \quad (2.7)$$

onde de h é a altura da estrutura, ξ , E e F são constantes que são dependentes de premissas adotadas na aplicação do método de progressão do líder.

Em 1987, Eriksson propõe em [33], com base em estudos empíricos e analíticos, uma estimativa mais precisa da área de exposição de linhas de transmissão baseado no MPL. As constantes propostas por Eriksson [27] são recomendadas por brochuras e normas [6,22] e levam às equações a seguir:

$$R_a(h, I) = 0.67 \cdot h^{0.6} \cdot I^{0.74} \quad (2.8)$$

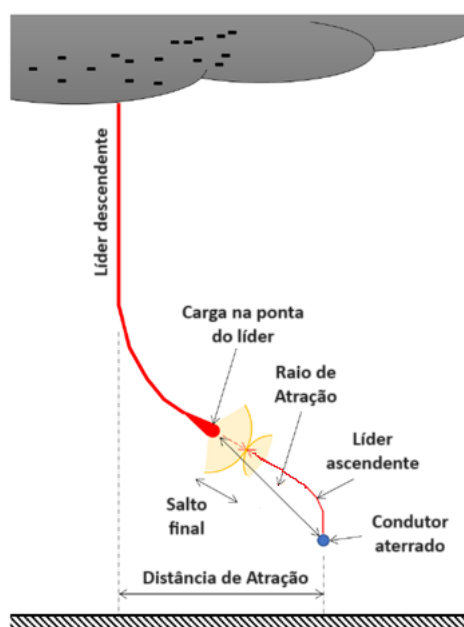


Figura 2.3 - Definição de raio de atração e distância de atração no tempo e nas condições para o salto final ser completado [Adaptado de 6].

Baseado na equação acima Eriksson propõe uma expressão para o cálculo do raio de atração equivalente da linha, equação (2.9).

$$R_{equivalente} = \int_{I=0}^{I=\infty} R_a(h, I) p(I) dI \quad (2.9)$$

Em (2.9) raio de atração equivalente da linha de transmissão é calculada pela integração de $R_a(h, I)$ multiplicado pela função densidade de probabilidade $p(I)$. Por isso, é importante ressaltar que para uma mesma estrutura, uma mesma geometria de torre, a área de exposição da linha, e conseqüentemente o número de descargas esperadas para incidir na linha de transmissão, irá depender da distribuição de corrente adotada [34,35]. O efeito da distribuição do valor de corrente de pico adotada sobre o número de descargas incidentes sobre a linha e sobre o desempenho da mesma frente a descargas será abordado mais detalhadamente no Capítulo 3.

A expressão (2.10) é derivada da equação (2.9) e amplamente utilizada em standards e brochuras para estimar a atratividade da linha

$$R_{medio}(h) = 14 \cdot h^{0.6} \quad (2.10)$$

Essa expressão simplificada, chamada de raio de atração médio, foi proposto por Eriksson assumindo um pico de corrente médio de 35 kA em (2.8) e considerando um grande número de observações experimentais de descargas atmosféricas incidindo sobre uma variedade de estruturas na África do Sul [33]. O valor médio de 35 kA foi baseado em medições disponíveis, naquele tempo, principalmente considerando extensivos trabalhos de Berger [36] e Popolansky. No entanto, é preciso enfatizar que (2.10) representa o raio de atração médio de estruturas em função da altura, para um valor médio de corrente somente e não para uma distribuição de valores de pico de corrente, como o representado na equação (2.9).

A ideia de raio de atração médio foi implementada por Anderson em [32] e é empregado no programa IEEE Flash para o cálculo da área de exposição da linha. Segundo Anderson, o raio de atração corresponde ao comprimento da sombra do condutor no solo, essa metodologia foi criada com o intuito de estabelecer a incidência de descargas em condutores aéreos [31].

Segundo Anderson [32], uma linha de transmissão localizada acima do solo produz uma sombra sobre o mesmo. Descargas que incidem no interior da sombra produzida pelos condutores atingem a linha de transmissão e as descargas que incidem na área externa são atraídas para o solo.

A Figura 2.4 apresenta uma aproximação simples para o comprimento da sombra W para uma linha de transmissão com dois cabos de blindagem. Para uma linha com

somente um cabo de blindagem, a variável b se torna igual a zero. A altura (h), indicada na figura, refere-se à altura média do cabo de blindagem da linha, calculada pela altura do cabo subtraído de dois terços da flecha.

A expressão (2.10) considera o raio de atração médio apresentado por estruturas em função da altura e o ajuste dos coeficientes utilizados na expressão foram obtidos considerando apenas os valores médios de correntes de descarga com base em medições realizadas à época [33], como o mencionado anteriormente. Há, na literatura, inúmeras expressões para o cálculo da área de exposição da linha baseadas no conceito de raio de atração médio [32]–[34]. As diferenças observadas são decorrentes das diferentes teorias utilizadas para a construção de cada expressão. No entanto, em sua maioria, apresentam o formato delineado na expressão (2.10).

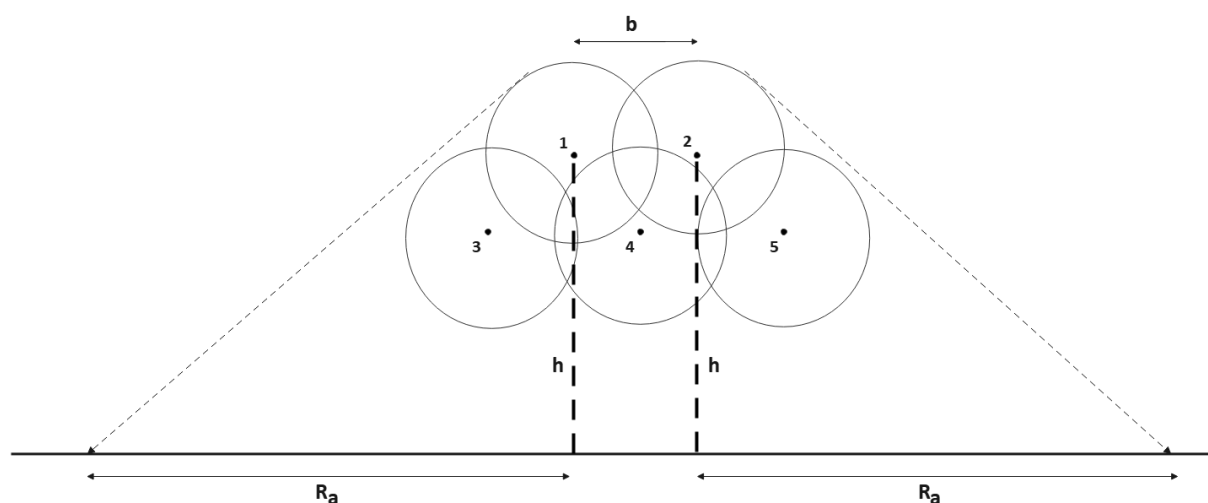


Figura 2. 4 - Área de exposição da linha considerando o raio de atração equivalente. Adaptado de [32].

As expressões propostas por Eriksson para cálculo da área de exposição da linha de transmissão W foram recomendadas pelo grupo de trabalho do IEEE em 1993 [31] e, posteriormente, pelo IEEE 1243 de 1997 [27].

Em [33] e [27], é apresentada uma expressão para o cálculo do número de descargas que incidem na linha de transmissão:

$$N_s = \frac{N_g \cdot W}{10}, \quad (2.11)$$

sendo
$$W = 2 \cdot R_a + b = (28 \cdot h^{0,6} + b) \quad (2.12)$$

Onde:

N_g é a densidade de descargas para a terra (descargas/km²/ano),

W é a área de exposição da linha de transmissão,

R_a é o raio de atração,

b é a distância entre os cabos para-raios.

Se o valor de N_g não estiver disponível ele pode ser estimado através da expressão [27]:

$$N_g = 0,04 \cdot T_d^{1,25} \quad (2.13)$$

Onde:

T_d é o número de dias de trovoadas dado em dias/ano.

O raio de atração médio é utilizado no programa IEEE Flash e recomendado por guias internacionais de cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas. Apesar da simplicidade de implementação, esse conceito engloba algumas aproximações e simplificações que devem ser consideradas na análise do desempenho da linha frente a descargas.

É de grande importância salientar aqui que a expressão (2.10), proposta por Eriksson, foi obtida considerando um valor médio de corrente, como já mencionado anteriormente, e, portanto, não abrange o conjunto de valores possíveis para a amplitude da corrente de pico, diferentemente do MEG e da expressão de raio de atração equivalente, equação (2.9). Além disso, as constantes da expressão (2.10) são ajustadas considerando-se medições que podem não englobar as características locais de onde a linha de transmissão está instalada, levando a obtenção de valores que não representam as reais características atmosféricas associadas a LTs. O raio de atração médio obtém, em geral, valores de área de exposição maiores do que aqueles obtidos através do Modelo Eletrogeométrico e do raio de atração equivalente. Dessa maneira, a utilização do raio de atração médio superestima a incidência de descargas atmosféricas na linha de transmissão, impactando diretamente o cálculo do desempenho da linha levando a

valores não realísticos do comportamento da linha frente a fenômenos como descargas atmosféricas.

2.3.2. Modelagem da corrente de retorno

Uma avaliação mais precisa dos efeitos da incidência de descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão e, conseqüentemente, o seu desempenho frente a esse fenômeno, depende de uma representação adequada da corrente de descarga, uma vez que os resultados de simulações estão condicionados à representatividade das ondas de corrente utilizadas.

Várias medições têm sido realizadas ao longo dos anos por diversos grupos de estudo com o objetivo de caracterizar formas de onda de descargas atmosféricas, destacando-se entre elas as medições obtidas no Morro do Cachimbo [35], em Minas Gerais, Brasil, as de Berger no Monte San Salvatore [36], na Suíça e as do Japão obtidas por Takami e Okabe através de medições realizadas em linhas de transmissão [24]. A descrição das formas de onda de corrente associadas a descargas é tipicamente realizada através de um conjunto de parâmetros, o qual é detalhado a seguir e pode ser visualizado na Figura 2.5.

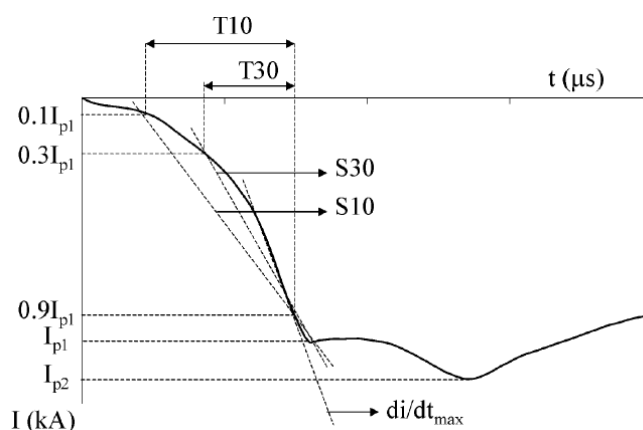


Figura 2.5 - Parâmetros utilizados para caracterizar ondas de descarga atmosférica [37].

Os parâmetros indicados na Figura 2.5 são comumente adotados para caracterizar as formas de onda de descargas atmosféricas. Os valores I_{p1} e I_{p2} se referem ao primeiro e segundo pico respectivamente, $T10$ corresponde ao tempo necessário para a amplitude

da corrente aumentar de $0,1I_{p1}$ até $0,9I_{p1}$ e T30 corresponde ao tempo necessário para a amplitude da corrente aumentar de $0,3I_{p1}$ até $0,9I_{p1}$. A inclinação das linhas retas conectando $0,1I_{p1}$ até $0,9I_{p1}$ e $0,3I_{p1}$ até $0,9I_{p1}$ caracterizam S10 e S30, respectivamente. Por fim, di/dt_{\max} representa a taxa de variação máxima da corrente no tempo. O parâmetro T50, não ilustrado na Figura 2.5, denota o tempo total necessário para a amplitude da corrente decair para a metade do valor da corrente de pico [38].

Usualmente, as descargas são modeladas de forma simplificada em plataformas de simulação de transitórios eletromagnéticos como, por exemplo, o software IEEE Flash que utiliza a forma de onda do tipo rampa. Dentro desse conjunto de modelagens simplificadas, as representações mais comumente empregadas são a onda do tipo rampa, triangular ou dupla rampa e dupla exponencial. As formas de onda do tipo rampa e triangular são construídas por duas retas, sendo que na triangular uma reta crescente caracteriza a frente da onda e uma decrescente a cauda. Importante destacar que o decaimento da onda não é representado na onda do tipo rampa. Nela, a cauda é definida como uma reta horizontal de valor igual ao pico da onda de descarga. A forma de onda dupla exponencial, como o próprio nome já indica, é composta por uma soma de duas funções exponenciais que possuem, cada uma, um tempo de decaimento específico [12], [39].

A despeito das facilidades de implementação, as ondas dos tipos rampa e triangular apresentam derivadas constantes ao longo de toda a sua frente de onda e não retratam a característica côncava da descarga. Além disso, a onda do tipo rampa também não representa o decaimento da amplitude da descarga, importante para avaliação da suportabilidade de isoladores e da dissipação de energia em dispositivos para-raios. Apesar de utilizada por algumas décadas, a dupla exponencial apresenta a taxa de crescimento máxima próxima ao ponto inicial da curva, diferente de uma onda de descarga real que apresenta essa mesma taxa próxima ao valor de pico. Ademais, não reproduz a natureza côncava da descarga nos seus instantes iniciais [39].

Com o intuito de obter uma representação mais fidedigna de ondas de descarga reais, o CIGRÉ (*International Council on Large Electric Systems*)[40] recomenda o uso de duas expressões independentes para caracterizar a onda de descarga, uma levando a um aumento gradual da inclinação até 90% do valor de pico da corrente e a outra reproduzindo os parâmetros relativos à cauda. A forma de onda proposta pelo CIGRÉ

representa a natureza côncava da onda de descarga e permite controlar o valor de pico, o tempo de frente, de decaimento e o tempo total de duração. Ainda assim, essa forma de caracterização apresenta a desvantagem de não ser descrita por uma única expressão, o que, em alguns casos, pode levar a instabilidades numéricas devido a uma descontinuidade no ponto de intersecção entre as duas expressões. Além de tudo, não representa os múltiplos picos característicos das ondas de descarga reais [38].

Com o propósito de contornar as desvantagens dos modelos citados anteriormente, em 1985, Heidler propôs uma expressão analítica para a representação da onda de descarga. A função de Heidler contém derivadas contínuas no domínio do tempo, diferentemente do modelo proposto pelo CIGRÉ. Sua taxa de crescimento máxima é próxima ao pico da corrente e a função é capaz de reproduzir a característica côncava da frente da onda e de representar os múltiplos picos da onda de descarga [41]. A função de Heidler é descrita por:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-(t/\tau_2)} \quad (2.14)$$

$$\eta = e^{[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_1/\tau_2)^{1/n}]} \quad (2.15)$$

Nas expressões (2.14) e (2.15), I_0 corresponde a amplitude da forma de onda, τ_1 e τ_2 são constantes que controlam o tempo de frente e o tempo de decaimento respectivamente, η corresponde ao fator de correção da amplitude e n controla a taxa de crescimento da onda de corrente.

De acordo com [38], para a caracterização das formas de onda representativas de descargas atmosféricas, considerando os parâmetros medianos do Monte San Salvatore e da estação do Morro do Cachimbo é necessária a soma de n funções de Heidler. Para a representação das características típicas das primeiras descargas de retorno, é necessário a soma de seis ou sete funções. Para as descargas subsequentes é necessário a soma de duas funções.

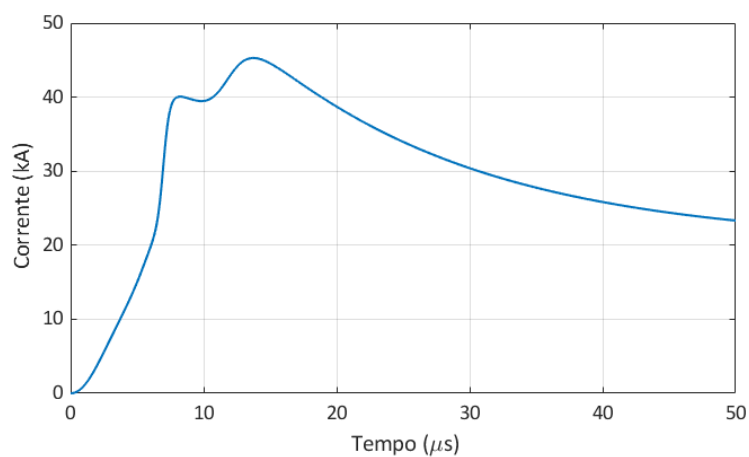
O fenômeno da incidência de descarga atmosférica possui natureza aleatória. Na literatura, o Método de Monte Carlo é usualmente empregado para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão por ser capaz de reproduzir o caráter

probabilístico associado aos parâmetros da descarga e ao comportamento da linha frente a descargas.

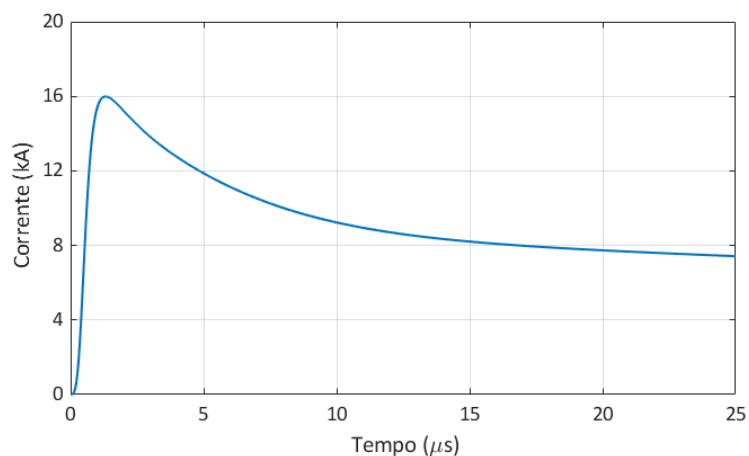
A fim de reproduzir, de maneira fidedigna, o caráter estatístico relacionado ao fenômeno, é necessário representar um elevado número de formas de onda de impulsos atmosféricos com diferentes parâmetros e não somente os medianos, além de considerar a correlação estatística entre eles. Negligenciar as correlações estatísticas existentes entre os parâmetros que caracterizam as curvas de descargas pode resultar em formas de onda fisicamente inconsistentes, o que comprometeria a qualidade e a credibilidade dos estudos de desempenho da linha [42].

A Figura 2.6 ilustra formas de onda representativas, construídas a partir da soma de n funções de Heidler, que reproduzem os parâmetros medianos de primeiras descargas e descargas subsequentes medidas no Morro do Cachimbo. Mais detalhes a respeito das formas de onda da Figura 2.6, assim como de outras formas de onda representativas de descargas atmosféricas, são encontrados em [38].

Apresenta-se em [42] uma metodologia que permite, utilizando a soma de funções de Heidler, reproduzir formas de onda representativas de descargas atmosféricas, com a vantagem de possibilitar a representação de parâmetros diferentes dos medianos, ponto essencial para a aplicação do Método de Monte Carlo. Essa metodologia possibilita a escalabilidade das formas de onda apresentadas em [38], mantendo as correlações estatísticas entre os parâmetros das formas de onda, como, por exemplo, a correlação entre valor de pico e tempo de frente de primeiras descargas de retorno e auxilia também a construção de novas formas de ondas representativas de medições utilizando as funções de Heidler. Além disso, possibilita que a avaliação do comportamento de linhas de transmissão frente a descargas seja realizada utilizando formas de onda fisicamente consistentes. Considerando todas as formas de onda discutidas nesta seção, as representações propostas em [38] e [42] são as mais assertivas e consistentes, tendo em vista as formas de onda obtidas em medições reais de descargas atmosféricas.



(a)



(b)

Figura 2.6 – Formas de onda obtida pela soma de funções de Heidler e que reproduzem os principais parâmetros medianos de primeiras descargas (a) e descargas subsequentes (b) medidas na Estação do Morro do Cachimbo.

2.3.3 – Modelagem dos vãos da linha de transmissão

A caracterização precisa dos vãos e, conseqüentemente, dos cabos de blindagem e cabos condutores das linhas de transmissão aéreas, é um fator fundamental para os estudos transitórios envolvendo a incidência de descargas atmosféricas em LTs. As linhas de transmissão possuem parâmetros distribuídos e dependentes da frequência, fato extremamente relevante na análise da propagação de ondas de corrente impulsiva, como as descargas atmosféricas. As formas de onda que percorrem a linha são atenuadas e distorcidas em função da existência do efeito de propagação e efeito pelicular. Para uma avaliação precisa das sobretensões e correntes transitórias que percorrem a linha e,

conseqüentemente, do comportamento da linha frente a fenômenos impulsivos, é necessária uma representação rigorosa [21].

A modelagem da linha de transmissão, considerando as suas principais características, é uma tarefa laboriosa que vem sendo desenvolvida ao longo dos anos e tem sido objeto de estudo de diversos autores na literatura. A finalidade desses estudos é modelar o comportamento dinâmico da linha de forma rigorosa e eficiente, assim como desenvolver modelos e ferramentas computacionais que auxiliem na representação precisa da linha em plataformas de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

As linhas podem ser caracterizadas por modelos com parâmetros concentrados ou distribuídos e modelos com parâmetros constantes ou dependentes da frequência. O modelo com parâmetros concentrados mais relevante na literatura é o pi-nominal, o qual é composto por resistores, indutores e capacitores cujos valores são calculados para um único valor de frequência. As limitações desse modelo residem na não caracterização dos efeitos de propagação da linha e na não consideração da dependência de seus parâmetros com a frequência. A utilização do pi-nominal é recomendada somente para a representação de linhas eletricamente curtas ou em regime permanente [12].

O Modelo de Bergeron representa a distribuição dos parâmetros ao longo da linha por meio da aplicação do método das características, que tem como objetivo modelar os parâmetros distribuídos da indutância série e capacitância shunt de uma linha de transmissão ideal, ou seja, sem perdas [43]. A representação das perdas é realizada mediante a inserção de resistências concentradas em três pontos distintos da linha: início, meio e fim. Em virtude disso, o modelo é considerado como “artificialmente” distribuído em termos das perdas.

Apesar de ser mais representativo que o modelo pi-nominal, pois considera a natureza distribuída dos parâmetros da linha, o Modelo de Bergeron apresenta algumas limitações. O modelo não representa a variação dos parâmetros da linha com a frequência, que são calculados em uma frequência única especificada pelo usuário. Ademais, não considera a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência [44].

Com o intuito de se obter resultados mais precisos na avaliação de sobretensões causadas em linhas de transmissão decorrentes da incidência de descargas atmosféricas, é de extrema importância a consideração da variação dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência visto que, as formas de onda das descargas estão associadas a um espectro de frequências e não a uma frequência única.

Isto posto, o modelo amplamente aplicado na literatura para avaliação de transitórios eletromagnéticos de origem atmosférica em linhas de transmissão é o proposto por Marti em [45]. Além dele, os modelos de Semlyen e Noda também levam em consideração a dependência dos parâmetros da linha com a frequência, sendo que os modelos de Marti e Semlyen são desenvolvidos no domínio modal e o de Noda no domínio das fases.

Modelo de Marti, denominado JMarti, utiliza uma matriz de transformação constante, calculada para uma frequência específica, com o intuito de desacoplar o modelo de fase em modos, ou seja, representar a linha no domínio modal. Os modos são independentes uns dos outros e cada um deles possui uma velocidade de propagação específica e comportam-se como uma linha de transmissão monofásica, o que simplifica a realização dos cálculos e determinação do comportamento dinâmico da linha [21]. Nesse modelo, as funções dependentes da frequência (matriz de propagação e admitância característica) são representadas por uma soma de funções racionais, de fase mínima, contendo apenas polos e zeros reais [46], onde os polos e resíduos são determinados por meio do método assintótico de Bode [12].

É importante salientar que, apesar de ser robusto e amplamente empregado na literatura, o modelo de Marti apresenta algumas limitações que devem ser observadas. A matriz de transformação modal aplicada pelo modelo é considerada constante. No entanto, a matriz não é constante em todo o espectro de frequências, ou seja, é dependente da frequência. A implementação da dependência da frequência da matriz de transformação é complexa e demanda um elevado esforço computacional uma vez que pode haver o cruzamento de modos em algumas frequências, o que dificulta um ajuste rigoroso [21].

A consideração da matriz de transformação constante pode levar a erros significativos em algumas configurações, como LTs com assimetrias acentuadas, circuitos duplos ou na representação de cabos subterrâneos [47]. Ademais, uma limitação da implementação do modelo JMarti em plataformas de cálculo de transitório, principalmente em plataformas do tipo EMT, é a utilização da formulação clássica de Carson para o cálculo dos parâmetros longitudinais da linha, que implica na desconsideração do efeito das correntes de deslocamento, da variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência e da admitância do solo [20], [46].

O modelo de linha de Semlyen é similar ao de Marti e é desenvolvido no domínio modal com sua matriz de transformação também assumida como constante. A dependência dos parâmetros da linha com a frequência é ajustada a partir de funções racionais de segunda ordem, e o modelo é considerado como um caso particular do modelo JMarti [21].

A fim de superar as restrições dos modelos elaborados no domínio modal, foram propostos modelos desenvolvidos diretamente no domínio das fases. Nesses, as soluções das equações de linhas de transmissão são obtidas no domínio das fases, sem a necessidade de transição para o domínio modal. Diferentes modelos foram concebidos seguindo essa premissa, dentre os principais o modelo ULM (*Universal Line Model*) e o modelo desenvolvido por Noda [46]

O modelo de Noda propõe um método de solução para as convoluções baseado no modelo IARMA (*Interpolated Auto-Regressive Moving Average*). Noda representa as matrizes de admitância característica e de propagação como funções no domínio Z e utiliza o método dos mínimos quadrados modificado para ajuste das variáveis dessas funções [20], [46].

O modelo ULM é diretamente desenvolvido no domínio das fases e foi proposto em [48] a fim de representar todas as configurações de linhas de transmissão e superar as restrições dos modelos elaborados no domínio modal. As matrizes de propagação e admitância característica, presentes nas equações de LTs, são ajustadas por meio da aplicação do método *Vector Fitting* (VF) proposto por [49]. Vale destacar que o modelo ULM é independente do passo de tempo utilizado na simulação, diferentemente do modelo de Noda [44].

Os modelos de linha citados encontram-se implementados em plataformas de simulação de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo. Os modelos pi-nominal, Bergeron, JMarti, Semlyen e Noda na plataforma ATP e o modelo ULM no PSCAD/EMTDC e EMTP-RV. O modelo mais comumente utilizado pela literatura é o modelo de JMarti, em virtude da assertividade na representação das principais características da linha de transmissão e de sua estabilidade numérica.

Além dos modelos de linha de transmissão tipicamente encontrados em plataformas do tipo EMT (PSCAD, EMTP, ATP) encontram-se na literatura modelagens de LTs embasadas diretamente na teoria de campo, como por exemplo as modelagens fundamentadas no HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) [50], [51]. De modo geral, essas

representações não possuem as limitações mencionadas dos modelos desenvolvidos no domínio modal. Em contrapartida, demandam um maior esforço computacional e nem sempre é claro como o efeito da impedância de retorno e admitância do solo é incorporado.

Um fator relevante para a avaliação rigorosa do desempenho de linhas de transmissão é a consideração do efeito de torres adjacentes sobre os valores das sobretensões de origem atmosférica. Na literatura, é usual a representação de três estruturas da linha, um vão à direita e outro à esquerda da estrutura na qual houve a incidência da descarga.

No IEEE Flash os vãos da linha de transmissão são representados de maneira simplificada por meio de uma linha de transmissão ideal. Além disso, o IEEE Flash considera o acoplamento entre os condutores de maneira simplificada, por meio da determinação de coeficientes de acoplamento entre os cabos de blindagem e os condutores fase. As sobretensões nos condutores fase são determinadas a partir das sobretensões nos cabos de blindagem e dos coeficientes de acoplamento desses com os condutores. Outra simplificação do Flash consiste na desconsideração da variação dos parâmetros da linha com a frequência, característica muito relevante tendo em vista o espectro de frequências associado a descargas atmosféricas. Esse tipo de modelagem simplificada da LT pode levar a desvios significativos no cálculo de desempenho da linha [27].

Para efeito de comparação, no modelo JMarti, o acoplamento entre os condutores é considerado por meio da natureza matricial da indutância, capacitância e resistência. As ondas de tensão e corrente são determinadas em todos os condutores considerando o efeito da dependência da frequência dos parâmetros da linha. Uma abordagem mais rigorosa quando comparada com a metodologia adotada pelo IEEE Flash.

2.3.4 - Modelagem das Torres

A modelagem das torres da linha de transmissão é um aspecto muito importante no cálculo do desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas e, por isso, a sua determinação deve ser feita de forma consistente [52].

Há diversas abordagens, teóricas e experimentais, que foram desenvolvidas ao longo dos anos com o objetivo de avaliar o comportamento da torre frente a fenômenos impulsivos. Entre as abordagens teóricas, existem aquelas desenvolvidas no domínio do tempo [53]–[55], da frequência [56], [57], baseando-se nas teorias de circuitos e de linhas de transmissão [56], [58]–[60], teoria de guias de onda [61] e de campo eletromagnético [54], [55], [62]. As abordagens experimentais realizadas em torres de tamanho real [63] ou em escala [59], [63], [64].

O comportamento da torre frente à incidência de descargas é um problema eletromagnético. Em geral, o tempo de propagação da onda de corrente impulsiva que incide sobre a torre da linha de transmissão é menor que o tempo de frente da onda, da ordem de dez vezes. Em virtude disso, a maior parte dos modelos consideram que a resposta da torre é predominantemente composta por ondas no modo transversal eletromagnético (TEM), negligenciando outros modos de radiação eletromagnética. Partindo dessa simplificação, a torre pode ser representada como uma linha de transmissão com impedância constante [65].

Na literatura, a torre é usualmente retratada empregando-se a teoria de linhas de transmissão, por meio de uma ou várias seções de linha, ou a teoria de circuitos, através de elementos de circuito; em ambas a representação é feita levando-se em consideração a geometria da estrutura. A vantagem dessas abordagens consiste na facilidade de implementação em ferramentas de simulação de transientes eletromagnéticos, como por exemplo programas do tipo EMTP [66].

Modelos simplificados de torres, derivados da teoria de linha de transmissão, têm sido bastante utilizados em trabalhos recentes. Eles possuem a vantagem de demandar um tempo de simulação reduzido, o que é conveniente quando é necessário um número elevado de simulações, como no caso do Método de Monte Carlo por exemplo [67]. A estrutura é representada como uma linha de transmissão monofásica, ou um conjunto de linhas em série, sem perdas. A linha, para fins de análise de transientes eletromagnéticos, é caracterizada por uma impedância de surto e um tempo de trânsito.

Existem, na literatura, várias expressões para o cálculo da impedância de surto, considerando a incidência vertical ou horizontal na estrutura. As primeiras abordagens utilizadas para o cálculo da impedância de surto foram deduzidas assumindo-se uma incidência vertical e derivadas a partir da teoria eletromagnética. Esses trabalhos empregam formas geométricas simples para a representação da torre, como a cilíndrica

de Wagner [53] e a cônica de Sargent e Darveniza [54]. A incidência horizontal corresponde a uma incidência no meio do vão, as ondas de sobretensão provocadas pela descarga se propagam através dos cabos e “incidem” horizontalmente na torre. A resposta da estrutura a uma incidência horizontal é investigada por Chisholm et al. em [59]. Nesse trabalho, são propostas modificações nas expressões apresentadas em [53] e [54], além de uma nova expressão para cálculo da impedância de surto para torres com geometria do tipo cinturada (*Waist*).

As expressões de Wagner, Sargent e Darveniza e Chisholm foram implementadas no programa de cálculo de transitórios IEEE Flash [27]. Embora a expressão para o cálculo da impedância de surto para estruturas do tipo *Waist* implementada no Flash seja uma expressão modificada, diferente da proposta inicialmente por Chisholm e recomendada pelo CIGRE [40], [66].

É importante destacar que a velocidade de propagação da descarga ao longo dos elementos da torre pode ser assumida como sendo a velocidade da luz. No entanto, os múltiplos caminhos ao longo das ferragens da estrutura inserem um atraso no tempo de trânsito na torre. Em virtude disso, o tempo de propagação acaba sendo maior do que o obtido pela divisão da altura da torre pela velocidade da luz, como é comumente calculado. Com o intuito de incorporar esse comportamento de forma simplificada na representação da estrutura, o programa IEEE Flash adota como velocidade de propagação o valor de $0,85c$, sendo c o valor da velocidade da luz, exceto para a geometria do tipo *H-Frame*.

A representação da estrutura por uma única linha de transmissão, como o implementado no Flash e apresentado na Tabela 2.2, eventualmente pode não representar rigorosamente o comportamento transitório da torre caso essa possua geometrias mais complexas ou geometrias que não se encaixem nas apresentadas na Tabela 2.2 (Cônica, Cilíndrica, *Waist* ou *H-Frame*). Na literatura, há modelos propostos para a representação dessa variação da geometria utilizando a teoria de linhas não-uniformes como o apresentado em [58] ou utilizando a teoria de linhas multicondutoras verticais [56], [68]. Nessa abordagem divide-se a torre em seções, cada seção é representada por um sistema de multicondutores paralelos verticais, que pode ser reduzido a um único condutor com uma impedância de surto equivalente. Determinada a impedância de surto equivalente de cada seção separadamente, conectam-se em série as

linhas com suas impedâncias associadas, Figura 2.7. Mais detalhes a respeito dessa representação podem ser vistos em [69].

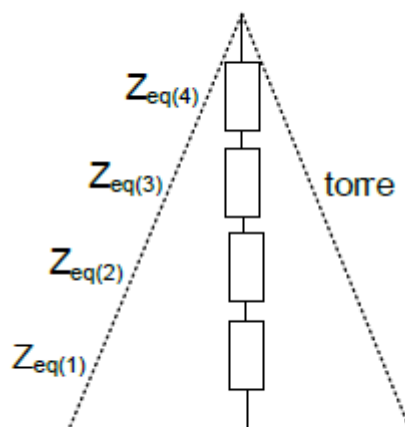
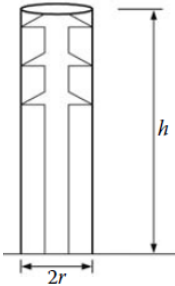
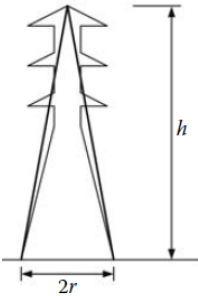
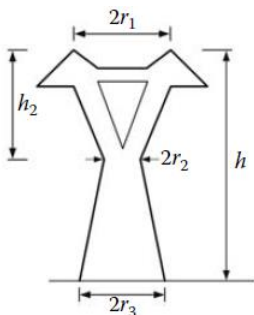
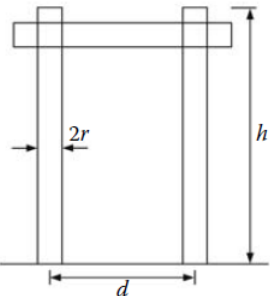


Figura 2. 7 - Representação da torre de transmissão por um conjunto de condutores verticais [12].

A teoria de linhas multicondutoras é amplamente aplicada devido à sua facilidade de incorporação em plataformas do tipo EMTP. Além da teoria de linhas multicondutoras a torre pode ser representada a partir de modelagens embasadas na aplicação direta da teoria de campo (HEM) [50], [51]. A modelagem por meio da aplicação do HEM não apresenta as simplificações e limitações mencionadas anteriormente, no entanto demanda um grande esforço computacional e sua implementação é uma tarefa complexa.

Tabela 2.2 - Modelos de torre de transmissão baseados em uma única seção de transmissão sem perdas. Adaptado de [66].

Geometria da torre	Diagrama	Impedância de surto
Cilíndrica		$Z = 60 \cdot \left(\ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 1 \right)$ $t = \frac{h}{0,85 \cdot c}$
Cônica		$Z = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right)$ $t = \frac{h}{0,85 \cdot c}$
Cinturada (<i>Waist</i>)		$Z = \sqrt{\frac{\pi}{4}} 60 \cdot \left(\ln \left(\cot \left(\frac{\tan^{-1} \left(\frac{r_1}{h} \right)}{2} \right) \right) - \ln \sqrt{2} \right)$ $r = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{h}$ $h = h_1 + h_2$ $t = \frac{h}{0,85 \cdot c}$
H-Frame (pórtico)		$Z_1 = 60 \cdot \ln \left(2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 60$ $Z_2 = \frac{d \cdot 60 \cdot \ln \left(2 \frac{h}{r} \right) + h \cdot Z_1}{h + d}$ $Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$ $t = \frac{1}{c} \frac{h \cdot Z_1 \cdot (d + h) \cdot Z_2}{Z_1 + (d + h) \cdot Z_2}$

2.3.4.1. Silhueta dominante x distribuição de torres

O valor da impedância de surto da torre impacta diretamente os valores de sobretensão de origem atmosférica, afetando diretamente o número de desligamentos e o desempenho da linha. Em virtude disso, é de extrema importância a sua determinação rigorosa.

Uma linha de transmissão usualmente possui um elevado número de torres. A linha em geral é composta por diferentes tipos de estruturas como por exemplo, torres de suspensão, estaiada, ancoragem, entre outros. As estruturas geralmente possuem diferentes alturas e comprimentos de vão em virtude da variação da topografia ao longo da extensão da linha.

Com o intuito de simplificar o cálculo de desempenho da LT, é usual determinar o tipo de torre dominante, aquele com o maior número de estruturas ao longo do percurso da linha. Com base na geometria dessa estrutura, calcula-se a impedância de surto. Este valor é então utilizado para avaliação de desempenho de toda a extensão da linha de transmissão. Essa metodologia é comumente empregada para calcular o desempenho de LTs. Essa simplificação pode levar a erros no cálculo da taxa de desligamentos, principalmente quando a linha é composta por estruturas do tipo estaiadas e de suspensão, já que essas possuem, em geral, uma diferença mais acentuada entre os seus valores de impedância de surto. Em geral torres do tipo estaiadas possuem menores valores de impedância de surto.

A diferença entre os valores de impedância de surto entre estruturas estaiadas e de suspensão se deve principalmente ao fato de que a primeira possui suportes metálicos, conhecidos como estais, que são uma alternativa de caminho para surtos advindos de descargas atmosféricas. A presença desses caminhos alternativos resultam em um efeito equivalente à redução da impedância de surto da torre [40].

Para ilustrar a diferença entre as duas estruturas são apresentadas a seguir, Figuras 2.8, as silhuetas de duas torres onde as impedâncias de surto são calculadas por meio da teoria de multicondutores verticais e utilizando a metodologia empregada em [14].

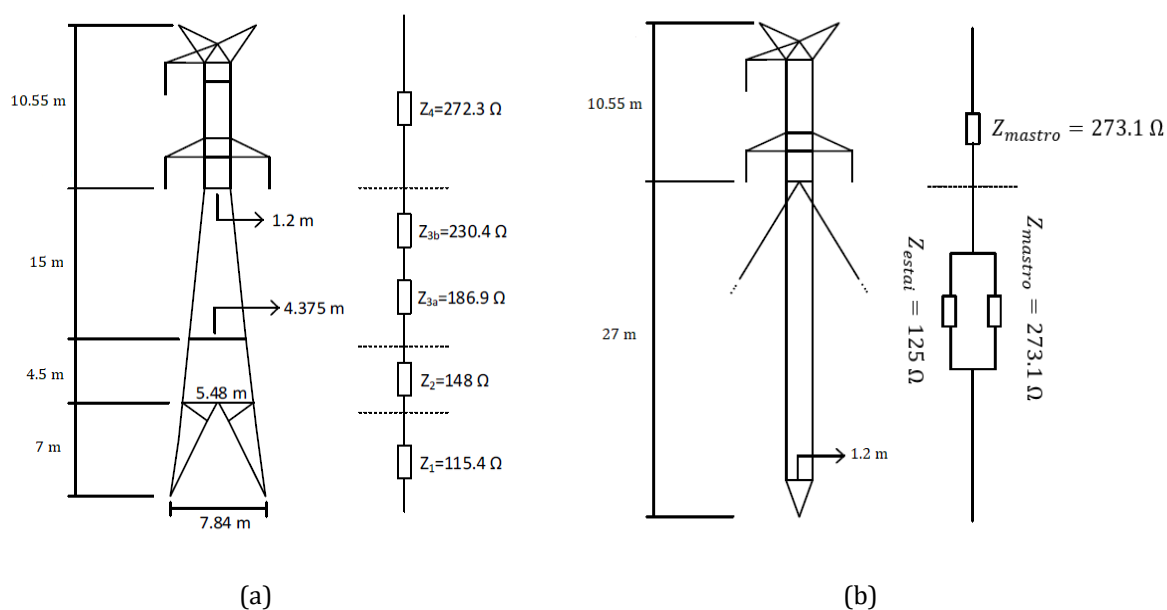


Figura 2.8 – Representação das impedâncias de surto de uma estrutura de suspensão (a) e de uma estrutura estaiada (b).

A divisão da linha de transmissão em mais de um grupo de estruturas dominantes, de forma a considerar de maneira mais assertiva a variação de impedâncias de surto das estruturas ao longo de toda a linha, pode impactar diretamente na performance da linha frente a descargas atmosféricas. Essa hipótese será abordada de forma mais detalhada nos próximos capítulos desta tese.

2.3.4.2. Variação da altura da torre

Devido as suas longas extensões, as linhas de transmissão em geral têm um alto número de estruturas e podem atravessar regiões com uma vasta gama de topografias, resistividade do solo e densidade de descargas atmosféricas. Diferentes geometrias de torre são utilizadas ao longo da linha com diferentes valores de altura em função das características topográficas de cada região.

Tipicamente, os tipos de estruturas e suas respectivas alturas variam ao longo da linha de transmissão. Alguns fatores influenciam a configuração de uma dada linha de transmissão considerando suas especificidades. Em razão das suas longas extensões, linhas de transmissão podem atravessar regiões com diferentes características geográficas (regiões planas, montanhas, vales, florestas, rios, etc.), ser instaladas em

diferentes tipos de solos (com diferentes composições e valores de resistividade), diferentes características climáticas com variados valores de densidade de descarga atmosférica para o solo. Em adição a isso, é necessário considerar as normas e regras estabelecidas no país ou na região onde serão instaladas as estruturas da linha de transmissão e os custos associados à construção da TL, sempre buscando atingir o máximo custo-benefício do projeto. Todos esses fatores devem ser levados em consideração pelos projetistas. Esses fatores irão determinar o trajeto da linha, os tipos de torres alocados em cada seção da linha etc.

Devido a todas essas especificidades mencionadas acima, seções de uma linha podem eventualmente ter estruturas mais altas que podem ser críticas, em função da maior exposição a incidência de descargas. Em geral, por simplificação, o procedimento padrão empregado para avaliar o desempenho da linha de transmissão considera a extensão de uma linha como um todo e o valor médio de altura das torres. A variação da altura das estruturas não é considerada na avaliação e no cálculo de desligamentos da linha de transmissão por *blackflashover*.

Para ilustrar o impacto da variação de altura da torre sobre os valores de impedância de surto na torre de uma linha de transmissão é apresentada a seguir, Figura 2.9 (a), a geometria de uma torre autoportante de suspensão correspondente a uma linha de 230 kV típica, na qual as impedâncias de surto são calculadas por meio da teoria de multicondutores verticais e utilizando a metodologia empregada em [14]. A estrutura foi dividida em cinco seções, Figura 2.9 (b), cada uma representada por quatro condutores paralelos. Isso foi feito para considerar a variação da geometria da torre ao longo da altura.

Na Figura 2.9 (a) a variável X representa a variação da altura da parte inferior da torre, o que implica consequentemente na variação da altura total da estrutura. Na Tabela 2.3 são apresentados valores de impedância de surto calculados para a parte inferior da torre considerando-se cada valor de altura da estrutura. Considerando-se somente os valores de pé de torre, a impedância de surto variou 152% comparando-se o maior e o menor valor de altura possíveis. É importante salientar que o aumento da altura X implica em um aumento dos valores de impedância de surto para todas as seções da torre. Mais detalhes sobre como é considerada a variação da altura das estruturas da LT e o efeito no desempenho da linha são apresentados nos Capítulos 3 e 4 desta tese. É importante ressaltar que todas as variações foram realizadas considerando valores de pés de torre

comumente utilizados em projetos reais que envolvem os dois tipos de torre, autoportante e de suspensão, embasados em projetos de estruturas consideradas em projetos de linhas de transmissão.

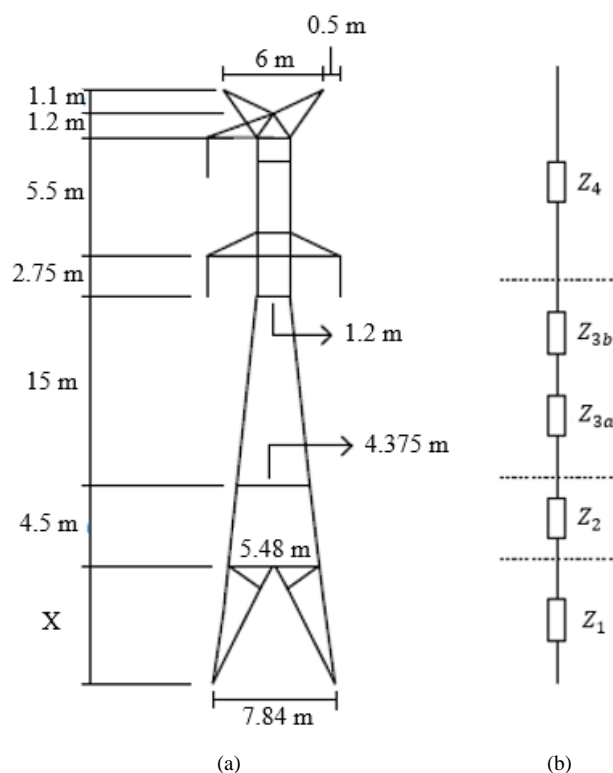


Figura 2.9 - (a) Geometria da torre de suspensão autoportante e (b) modelo da torre no ATP.

Tabela 2.3 - Variação da impedância de surto da parte inferior da torre em função da altura da estrutura

h (m)	31,0	32,5	34,0	35,5	37,0	38,5	40,0	41,5	43,0
Z_1 (Ω)	56,8	79,2	94,0	105,0	115,4	123,8	131,2	137,7	143,6

A identificação de trechos críticos, que possuem torres com maiores valores de altura e conseqüentemente valores área de exposição e de incidência de descargas maiores, pode permitir a implementação de medidas para melhorar o desempenho da linha de maneira mais eficiente e otimizada, implementando as medidas de proteção em trechos específicos e mais críticos e não na linha de transmissão como um todo.

2.3.5 - Modelagem do Aterramento de Pé de Torre

Os aterramentos elétricos de linhas de transmissão são submetidos a diversos fenômenos elétricos. Esses fenômenos podem ser caracterizados como lentos, por exemplo os curtos-circuitos, ou rápidos, como as descargas atmosféricas. As ondas de corrente de curtos-circuitos estão relacionadas a uma faixa mais baixa do espectro de frequência, de correntes contínuas até alguns kHz e em razão disso, são denominadas solicitações mais lentas. As ondas de descarga atmosférica possuem um caráter impulsivo e em virtude disso, estão associadas a uma ampla faixa do espectro de frequências, que vai até alguns MHz [16].

As diferenças entre as diversas solicitações às quais a LT é exposta resultam em comportamentos distintos dos fenômenos eletromagnéticos presentes no sistema de aterramento. A fim de que se possa avaliar precisamente o comportamento da LT frente a esses fenômenos, é essencial uma modelagem rigorosa do aterramento [16]. A Figura 2.10 ilustra um arranjo de aterramento comumente empregado em torres de transmissão, onde as dimensões L dos cabos contrapesos variam segundo a resistividade do solo onde a torre está localizada [13]. Para a caracterização rigorosa dos aterramentos de LTs, é fundamental a consideração dos efeitos eletromagnéticos presentes no sistema de aterramento, os efeitos condutivo e capacitivo do solo, além do efeito indutivo e resistivo do eletrodo [16], [70].

O meio no qual o aterramento está inserido é considerado um meio com perdas, visto que o solo reúne ao mesmo tempo características condutivas e dielétricas. O efeito condutivo de um sistema de aterramento consiste na dispersão para o solo, de maneira conduzida, de uma corrente injetada no aterramento, tendo em vista a característica do meio onde o sistema está imerso [16], [70].

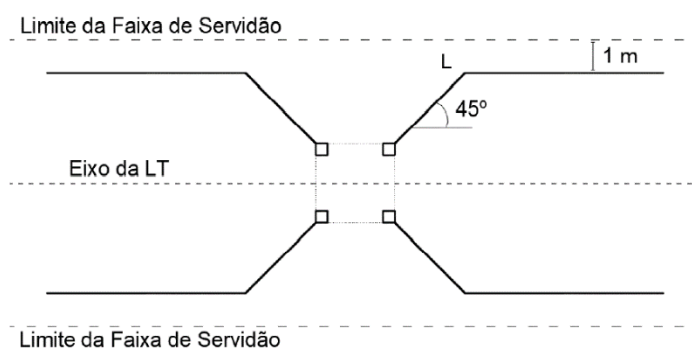


Figura 2. 10 - Arranjo de aterramento de torres de transmissão [13].

A corrente que é dispersa no eletrodo do aterramento produz um campo elétrico no solo, e a variação desse campo em relação ao tempo em um meio com características dielétricas, como o solo, resulta em uma corrente de deslocamento, ou corrente capacitiva. Quanto maior a frequência da onda de corrente injetada no sistema, maior a variação do campo elétrico no solo, mais pronunciado o efeito capacitivo no aterramento e menor o módulo da impedância do sistema. Para solicitações elétricas lentas, como a corrente de curto-circuito, a corrente de deslocamento pode ser desprezada. No entanto, para solicitações rápidas, descargas atmosféricas, a corrente de deslocamento pode atingir a mesma ordem de grandeza das correntes condutivas [16], [70].

Além do campo elétrico no solo, a corrente no eletrodo produz um campo magnético no interior do mesmo e no solo ao redor dele. A circulação de corrente gera um fluxo magnético no interior do eletrodo e no meio circunvizinho, caracterizando assim o efeito indutivo no aterramento. Quanto maiores as frequências associadas à corrente injetada no sistema, mais acentuado é o efeito indutivo no eletrodo em razão da maior variação do campo magnético em relação ao tempo [16], [70].

O propósito dos eletrodos de aterramento é fornecer caminhos de baixa impedância para dispersão de correntes associadas a solicitações elétricas. Apesar de serem constituídos por materiais considerados bons condutores, possuem resistividade elétrica diferente de zero, apresentando uma resistência longitudinal que caracteriza o efeito resistivo associado ao eletrodo.

Quanto maior as frequências associadas às ondas de corrente as quais o aterramento é submetido, mais acentuado é o efeito pelicular, que consiste na tendência de a corrente fluir na superfície dos condutores elétricos. Em virtude desse efeito, menor a área de circulação de corrente no eletrodo e mais pronunciado é o efeito resistivo. Ainda assim, o efeito resistivo do solo é muito mais acentuado do que o efeito resistivo dos eletrodos, já que a condutividade do eletrodo é muito mais elevada que a condutividade do solo. Isto posto, o efeito resistivo do eletrodo no sistema de aterramento pode ser desconsiderado, mesmo se esse for submetido a correntes com altas frequências [16].

Os efeitos condutivo e capacitivo do solo e os efeitos indutivo e resistivo do eletrodo, são diretamente dependentes dos parâmetros eletromagnéticos que caracterizam o meio onde o aterramento está inserido e dos parâmetros eletromagnéticos do próprio eletrodo caso sua impedância interna seja considerada. O efeito condutivo é

influenciado pela condutividade do solo, o capacitivo pela permissividade elétrica e o efeito indutivo no eletrodo pela permeabilidade magnética [71].

A condutividade e a permissividade elétrica variam segundo o tipo de solo e são dependentes da frequência. O aumento da frequência ocasiona o aumento da condutividade e a diminuição da permissividade. À medida que a resistividade elétrica do solo em baixa frequência aumenta, essa variação com a frequência é ainda mais acentuada. A permeabilidade magnética do solo é, em geral, constante e próxima ao valor da permeabilidade magnética no vácuo para a maior parte dos solos [72], [73]. A variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência influencia a resposta transitória do aterramento e resulta em uma redução da impedância do sistema [16].

A não consideração da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo leva a erros significativos na avaliação da resposta do aterramento, sobretudo frente a descargas atmosféricas e para solos com resistividade em baixa frequência elevada, muito comuns no Brasil. Para uma análise assertiva do comportamento de linhas de transmissão frente a ondas de corrente impulsiva é essencial a modelagem rigorosa do sistema de aterramento.

As ondas de corrente impulsiva que se propagam em um eletrodo imerso no solo estão suscetíveis a dois fenômenos de propagação, a atenuação e a distorção da onda. A atenuação corresponde ao decréscimo da amplitude da onda de corrente ao longo do eletrodo e aumenta com a frequência e com a condutividade do solo. A distorção corresponde a deformação da onda, com o aumento do seu tempo de frente à medida que se propaga. Em virtude do efeito de atenuação, a densidade de corrente dispersa ao longo do eletrodo diminui e a partir disso, deriva-se o conceito de comprimento efetivo, muito importante em sistemas de aterramento [16], [70], [74].

O comprimento efetivo corresponde a um valor limite a partir do qual os eletrodos não contribuem para a redução da impedância impulsiva de aterramento. Por exemplo, o aumento do comprimento do cabo contrapeso de uma torre de linha de transmissão além do valor do seu comprimento efetivo, não implica uma melhora no desempenho da estrutura frente a descargas atmosféricas. Isto ocorre porque a partir do valor de comprimento efetivo o efeito de atenuação da onda de corrente é tão acentuado que a corrente dispersa para o solo a partir dali não é significativa, o comprimento do eletrodo a partir desse ponto não afeta a impedância do aterramento. O valor do comprimento efetivo diminui com o aumento da frequência e da condutividade do solo [13], [16], [71].

O sistema de aterramento de linhas de transmissão é comumente representado utilizando um resistor simples com valor igual à sua resistência de aterramento, tanto em plataformas de avaliação de transitórios eletromagnéticos, como ATP/EMTP, quanto em programas de avaliação de desempenho de linhas, como o IEEE Flash. Para análise de fenômenos em baixa frequência essa consideração apresenta bons resultados, já que em baixa frequência os efeitos reativos podem ser desprezados, e o sistema de aterramento pode ser representado eletromagneticamente por uma resistência de aterramento, RLF.

Contudo, para avaliação de fenômenos como a descarga atmosférica que possui uma ampla faixa do espectro de frequência, os efeitos reativos e os efeitos de propagação não podem ser desconsiderados. Nesse caso, a utilização de uma resistência R_{LF} para representação do aterramento pode levar a erros significativos na avaliação do comportamento transitório do sistema e, conseqüentemente, na avaliação do desempenho de linhas de transmissão.

A maneira mais rigorosa de se representar o comportamento do aterramento, considerando os efeitos eletromagnéticos associados ao seu transitório, é através da impedância harmônica $Z(\omega)$. Essa impedância é uma grandeza complexa dada pela razão entre os fasores de elevação de potencial no aterramento $V(\omega)$ e de corrente injetada $I(\omega)$ e é dada pela expressão (2.16) [75].

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.16)$$

As plataformas de cálculo de transitórios do tipo ATP/EMTP não possuem modelos de aterramento que considerem o comportamento dependente da frequência. Apesar disso, com o desenvolvimento da técnica numérica de ajuste vetorial (*Vector Fitting*), tornou-se relativamente simples incorporar o comportamento dependente da frequência de sistemas de aterramento em plataformas do tipo ATP/EMTP. Detalhes a respeito dessa técnica e sobre a metodologia de determinação de parâmetros empregada são descritos em [49], [76]–[80]. Apesar do fato do VF possibilitar a representação do comportamento dependente da frequência de sistemas de aterramento em plataformas de análise de transitórios, o processo para determinação desse comportamento é complexo.

O comportamento impulsivo do sistema de aterramento pode ser caracterizado de forma simplificada através do conceito de impedância impulsiva de aterramento, Z_p . A impedância impulsiva é definida pela relação entre valor de pico da elevação de potencial no ponto de injeção de corrente e o valor de pico da corrente injetada e é obtida através da expressão (2.17) [12], [70].

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (2.17)$$

A representação do aterramento por meio de sua impedância impulsiva contempla de forma aproximada o comportamento dependente da frequência do aterramento, visto que o valor da impedância impulsiva é influenciado pelo conteúdo de frequência do sinal injetado no sistema. Além disso, como a impedância impulsiva corresponde a um número real puro, a sua inserção em plataformas de cálculo do tipo ATP/EMTP é bem mais simples do que a inclusão da impedância harmônica. Em plataformas como a do IEEE Flash não é possível a incorporação da impedância harmônica, contudo a impedância impulsiva pode ser incluída de maneira direta. Em [19], [81], [82] são apresentadas equações para determinação da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento, obtidas através de simulações empregando-se um modelo eletromagnético rigoroso. Em [17] é apresentada uma metodologia original para determinação da impedância impulsiva de sistemas de aterramento genéricos a partir da resistência de aterramento e em [83] essa metodologia é aplicada para o caso específico de cabos contrapeso de linhas de transmissão.

Segundo [19], a representação do sistema de aterramento de linhas de transmissão através de sua impedância impulsiva leva a resultados muito próximos aos obtidos utilizando a impedância harmônica na ausência de para-raios [12], [13].

Quando a linha de transmissão é submetida a fenômenos impulsivos, como descargas atmosféricas, uma onda de corrente com elevada intensidade é injetada no sistema de aterramento. Dependendo da dimensão e geometria do sistema, da condutividade do solo e da intensidade de corrente a qual o aterramento é submetido, o campo elétrico no solo pode ultrapassar um valor crítico e romper a rigidez dielétrica do meio, o que caracteriza o efeito de ionização do solo [84]. Quando o campo elétrico no solo atinge valores superiores ao valor crítico de ionização, ocorrem descargas elétricas do

eletrodo para o solo e o meio ionizado se transforma em um condutor. O efeito de ionização do solo resulta na redução da impedância de aterramento do sistema. Entretanto, o fenômeno de ionização do solo é mais relevante para sistemas compactos e com pequenas dimensões. Para aterramentos típicos de torres de linhas de transmissão, que possuem grandes dimensões, esse fenômeno costuma ser desprezado [16]. É importante salientar que a ionização do solo é um fenômeno não linear e de difícil determinação, não existindo ainda um consenso na literatura a respeito do exato valor de campo elétrico crítico para a sua ocorrência.

2.3.6 - Modelagem da Ruptura do Isolamento e Determinação da Corrente Crítica de Descarga

O comportamento de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas está intimamente associado à avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores da linha frente a sobretensões de origem atmosférica. Alguns programas comumente utilizados para a realização dessa avaliação, como o ATP, não possuem modelos específicos para prever o fenômeno. Contudo, há na literatura metodologias amplamente estudadas com o objetivo de avaliar a ocorrência da disrupção.

Uma dessas metodologias consiste na comparação do valor de pico da onda de sobretensão à qual os isoladores estão submetidos com o valor do CFO (*Critical Flashover Overvoltage* ou Tensão Crítica Disruptiva) relacionado à cadeia de isoladores instalada na LT. O CFO corresponde ao valor de pico da forma de onda de sobretensão padrão¹, que, ao ser aplicada sobre a cadeia de isoladores irá ocasionar uma probabilidade de ocorrência de disrupção de 50%. O isolador ao ser submetido a tensões impulsivas padronizadas com valor de pico igual ao CFO irá falhar em metade do número de sobretensões aplicadas. O valor do CFO é tradicionalmente estabelecido através do método *up and down*, mais detalhes podem ser encontrados em [85].

A despeito da simplicidade de implementação, essa técnica possui limitações para avaliação da suportabilidade da linha. A ocorrência da descarga disruptiva na cadeia de isoladores da LT está relacionada ao valor de pico da onda de sobretensão, forma da onda,

¹ A forma de onda de sobretensão impulsiva padrão corresponde a uma dupla exponencial com tempo de frente de 1,2 μs e tempo de meia onda de 50 μs .

polaridade e tempo de duração. Um valor de sobretensão superior ao valor do CFO não necessariamente resulta na ruptura do isolamento.

Para uma avaliação mais rigorosa da suportabilidade da linha é necessário a utilização de métodos mais robustos, que levem em conta a forma de onda do impulso de tensão aplicado, polaridade, valor de pico e tempo de duração. Há na literatura algumas alternativas mais elaboradas com o propósito de avaliar a suportabilidade da linha. Dentre elas a utilização das chamadas curvas tensão-tempo, ou curvas $V \times T$, abordagem utilizada pelo programa IEEE Flash nos cálculos de desempenho de linhas.

A curva $V \times T$ é determinada experimentalmente para um determinado comprimento de isolador, ou gap, e relaciona a suportabilidade do mesmo com o valor de pico de uma forma de onda de sobretensão impulsiva padronizada e o tempo para a ocorrência de uma descarga disruptiva. As curvas são representadas através de equações empíricas e devem ser utilizadas somente dentro das condições delimitadas experimentalmente [40].

A representação da curva $V \times T$ para um determinado comprimento de cadeia de isoladores pode ser obtida através da expressão (2.18). A Figura 2.11 ilustra curvas $V \times T$ para diferentes comprimentos de isolamento [27].

$$V(t) = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) \cdot W \quad (2.11)$$

Onde,

V é a suportabilidade do isolador (kV);

t é o tempo para disrupção

W comprimento do isolador

A metodologia para avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores de uma linha de transmissão utilizando a curva $V \times T$ consiste em comparar, em um mesmo instante de tempo, os valores da forma de onda de sobretensão aplicados aos isoladores com os valores $V(t)$ associados à curva $V \times T$ relativa aos isoladores. Se, em um determinado instante, o valor da sobretensão superar a tensão disruptiva indicada pela curva, ocorrerá a ruptura do isolamento [27], [40].

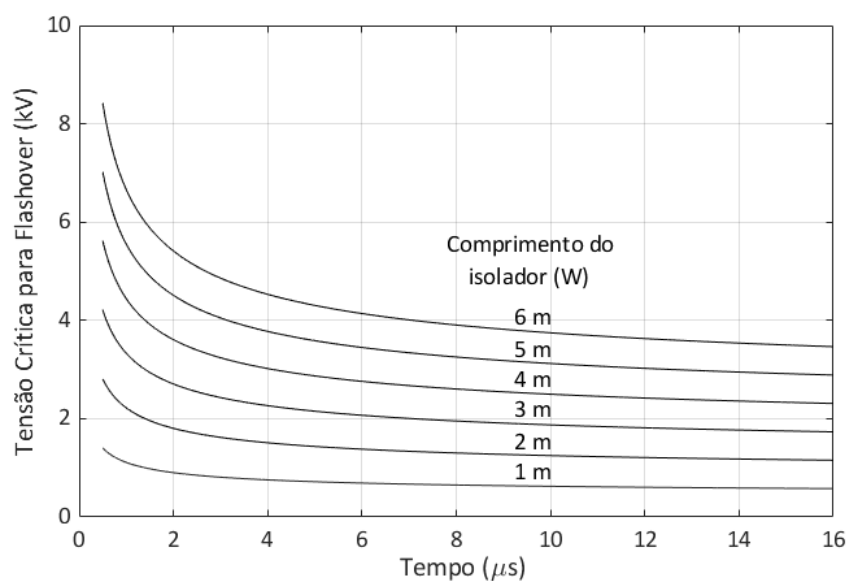


Figura 2. 11 - Curvas V x t para diferentes comprimentos de isoladores. Adaptado de [40].

Independentemente da abordagem baseada na utilização das curvas V x T ser mais robusta do que a simples comparação da sobretensão sobre os isoladores com o valor de CFO, essa metodologia é derivada de medições experimentais às quais foram impostas tensões impulsivas padronizadas e, em virtude disso, só descrevem de forma fidedigna o comportamento dos isoladores submetidos a essa forma de onda específica.

As formas de onda de sobretensões atmosféricas reais diferem muito do formato de uma onda padronizada. Assim sendo, as curvas V x T não podem ser aplicadas diretamente na avaliação da disrupção já que essas podem levar imprecisões no cálculo do número de desligamentos da LT.

O Método do Efeito Disruptivo (*Disruptive Effect Method*), também conhecido como Método DE ou Método de Integração, foi proposto por Witzke e Bliss por volta da década de cinquenta [40] e permite a avaliação do comportamento de isoladores frente a formas de onda de sobretensões impulsivas com diferentes parâmetros [86].

O método DE, Figura 2.12, estabelece que há uma tensão mínima V_0 a qual deve ser excedida antes do início do processo de disrupção dos isoladores. O tempo para ruptura do isolamento, t_c , depende da amplitude e da duração da forma de onda de sobretensão aplicada acima dos valores V_0 . A determinação da suportabilidade do isolamento da linha requer o cálculo da constante de efeito disruptivo, D_c , dada pela expressão (2.17).

$$D_c = \int_{t_0}^{t_c} (V(t) - V_0)^n dt \quad (2.19)$$

onde t_0 é o instante de tempo no qual o valor da sobretensão $V(t)$ supera o valor da tensão mínima requerida V_0 e n é uma constante. Para a ocorrência da disrupção, o valor D_c deve ser maior que o chamado efeito disruptivo crítico, D_{ec} , o qual é determinado experimentalmente e é intrínseco à configuração de isoladores avaliada. Valores para V_0 , n , e D_{ec} podem ser encontrados em [87].

O Método DE considera o efeito da forma de onda das sobretensões em todo o intervalo de tempo, diferentemente da abordagem que utiliza as curvas $V \times T$ onde somente um ponto é considerado na avaliação da disrupção do isolamento. Apesar do Método do Efeito Disruptivo ser mais elaborado e robusto em comparação às demais abordagens citadas e ser amplamente aplicado na literatura, ele apresenta resultados assertivos apenas para formas de onda de sobretensão com polaridade única [40], [87]. Para avaliação da suportabilidade dos isoladores frente a sobretensões com dupla polaridade, ou natureza oscilatória recomenda-se a utilização do Método de Progressão do Líder (MPL).

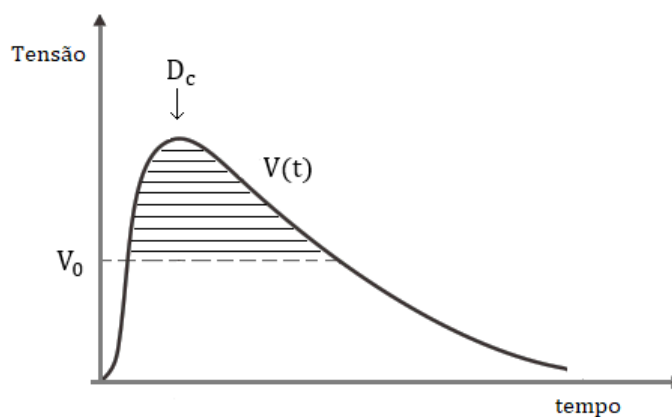


Figura 2. 12 - Caracterização do Método do Efeito Disruptivo

O MPL consiste em três fases e se baseia no processo físico relacionado à disrupção do isolador: início do efeito corona, propagação do *streamer* e progressão do líder. O tempo total para a ocorrência da disrupção do isolamento da linha corresponde à soma dos tempos dos três processos. Os *streamers* se propagam ao longo do isolador a partir do

momento que o valor da sobretensão aplicada excede um valor limiar de tensão e dá início ao efeito corona. Se a sobretensão permanece elevada o suficiente, esses *streamers* se propagam até se tornarem o canal do líder. A disrupção no isolamento ocorre quando o líder atravessa o canal desenvolvido entre a mística e o condutor fase [40]. Em virtude da complexidade da implementação do modelo, o método de progressão do líder demanda um elevado esforço computacional.

Em todas as metodologias abordadas anteriormente, é avaliada o menor valor de sobretensão de origem atmosférica capaz de provocar a disrupção do isolamento da linha de transmissão. O menor valor de corrente de descarga atmosférica capaz de gerar uma sobretensão que leve a uma descarga disruptiva na cadeia de isoladores da LT é denominado corrente crítica de descarga.

O valor da corrente crítica é de extrema importância no cálculo da taxa de desligamentos da linha. A partir dele, é calculada a probabilidade de ocorrência da corrente crítica por meio de uma função de densidade de probabilidade do tipo log-normal, expressão (2.20), a qual caracteriza a dispersão estatística do valor de pico da corrente de descarga atmosférica [88].

$$p_{I_p}(I_p) = \frac{1}{I_p \sigma_{\ln I_p} \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln I_p - \ln \mu_{I_p}}{\sigma_{\ln I_p}} \right)^2 \right] \quad (2.20)$$

Onde $\sigma_{\ln I_p}$ e μ_{I_p} são o desvio padrão logarítmico e o valor médio da corrente I_p , respectivamente.

As três principais distribuições estatísticas de corrente de descarga correspondem à distribuição de Berger, originada de medições realizadas na Estação de Monte San Salvatore, a distribuição relacionada às medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo em Minas Gerais e a distribuição relacionada às medições realizadas em linhas de transmissão no Japão, empregadas na literatura e em guias internacionais como [40],[27] e [88], sendo as três obtidas a partir de medições em torres instrumentadas. Como já mencionado anteriormente, medições em torres instrumentadas são consideradas pela literatura como medições com uma maior confiabilidade, sendo por isso, as recomendadas pela brochura do CIGRÉ, salientando aqui que as medições de Takami e Okabe são obtidas em linhas de transmissão instrumentadas.

É de grande importância que se utilize a distribuição que represente de maneira mais assertiva as características das descargas atmosféricas relativas à região onde a linha de transmissão está localizada. O programa IEEE Flash, por exemplo, realiza o cálculo de desempenho da linha utilizando a distribuição proposta pelo IEEE. Contudo, a distribuição do Morro do Cachimbo pode ser mais representativa para caracterização de descargas atmosféricas em regiões tropicais, assim sendo, a utilização de dados do Monte San Salvatore para avaliação do comportamento de LTs localizadas em regiões tropicais pode levar a estimativas de desempenho diferentes daquelas observadas na prática.

2.4. Considerações finais

Neste capítulo, foram apresentados os principais aspectos envolvidos na estimativa do desempenho de linhas de transmissão e os desafios envolvidos em cada etapa desse processo. Primeiro, é fundamental determinar o número de descargas atmosféricas que incidem sobre a linha e, para tal, calcula-se a área de exposição. Avaliada a área de exposição, é fundamental a modelagem da corrente de retorno da descarga. O desempenho da linha de transmissão frente a fenômenos impulsivos de origem atmosférica depende da caracterização adequada da onda de corrente.

O próximo passo compreende a modelagem dos componentes da linha de transmissão a fim de determinar as sobretensões transitórias nas cadeias de isoladores da linha: vãos, torre e aterramento. Para uma avaliação consistente das sobretensões e correntes transitórias que percorrem a linha, é necessária uma representação rigorosa dessas características. Existem diversos modelos propostos para a representação da estrutura da torre da LT. Um ponto muito importante na avaliação do desempenho da linha é a caracterização da variação da geometria da estrutura, que varia ao longo do comprimento da estrutura.

Com o intuito de simplificar a avaliação do desempenho da LT, usualmente utiliza-se um único tipo de estrutura e considera-se um valor médio de altura da torre e se obtém o desempenho da linha como um todo. Simplificações como essa podem incorrer em avaliações imprecisas a respeito do comportamento da LT frente a descargas atmosféricas. É de grande importância ressaltar aqui que todos os modelos, distribuições das correntes, incluindo as formas de ondas assumidas para as análises, possuem suas

incertezas. O presente trabalho busca contribuir no avanço de se buscar modelos e representações cada vez mais representativas, mas sem perder de vista todas as incertezas envolvidas nas estimativas de desempenho de linhas de transmissão, incluindo a modelagem do solo, que não é o mesmo ao longo da linha, o conhecimento das impedâncias de aterramento de cada torre, etc.

A última etapa do processo de avaliação do desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas consiste na avaliação da ruptura do isolamento e na determinação da corrente crítica. A avaliação da suportabilidade dos isoladores deve levar em conta a forma de onda da descarga, da polaridade, o valor de pico e o tempo de duração. A partir do menor valor de sobretensão capaz de gerar uma descarga disruptiva no isolamento da LT é possível determinar a corrente crítica. Ela corresponde ao valor de corrente relacionado ao menor valor de sobretensão que acarreta a disrupção da cadeia de isoladores. O valor da corrente crítica impacta diretamente no cálculo do número de desligamentos da linha já que esse é diretamente proporcional à probabilidade da ocorrência da corrente crítica.

A avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é comumente realizada empregando-se simplificações para a determinação da área de exposição da linha, para a representação da forma de onda da descarga, da estrutura, dos vãos, do aterramento e para a determinação da suportabilidade do isolamento. Essas simplificações podem resultar em desvios no cálculo do número de desligamentos da linha de transmissão.

No próximo capítulo são apresentadas metodologias e técnicas propostas utilizadas para avaliação do desempenho da linha. No Capítulo 4 são avaliados os efeitos de simplificações na estimativa do número de desligamentos da linha e são apresentados os resultados obtidos através das técnicas apresentadas no Capítulo 3.

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia mais comumente utilizada para o cálculo do desempenho de linhas de transmissão, avalia-se a importância da consideração de diferentes grupos de silhuetas no cálculo do desempenho e uma nova metodologia é proposta tendo em vista essa consideração. Considera-se também a influência de diferentes distribuições cumulativas de valor de pico da corrente de descarga atmosférica sobre o cálculo da taxa de desligamentos por backflashover da linha.

3.1. Introdução

A incidência direta de descargas atmosféricas na LT pode ocasionar dois fenômenos capazes de provocar a ruptura do isolamento da linha: o *flashover* e o *backflashover*. O enfoque deste trabalho reside no segundo, o qual é o principal responsável pelos desligamentos não programados em LTs em virtude da incidência de descargas atmosféricas [8].

Uma linha de transmissão devidamente blindada evita desligamentos causados pela incidência de descargas atmosféricas diretamente em seus cabos fase, *flashover*. Ainda assim, descargas atmosféricas incidentes em cabos para-raios, ou na própria torre de transmissão, podem ocasionar elevadas sobretensões sobre a cadeia de isoladores, podendo resultar em desligamentos por *backflashover* [6], [13], [89].

No processo de avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, é comum a adoção de simplificações em função das incertezas associadas à disponibilidade de dados, confiabilidade ou limitação dos modelos disponíveis.

Em função das longas extensões e das particularidades do relevo ao longo do percurso, a LT é constituída por diferentes estruturas com diferentes alturas e

especificidades. A linha é tipicamente composta por diferentes tipos de estruturas, podendo ser dividida por exemplo entre as estruturas denominadas autoportantes (suspensão e ancoragem) e estaiadas.

Uma simplificação comumente adotada é a consideração somente da torre denominada dominante ou típica e a consideração de um valor de altura médio para a estrutura considerada como típica. Esse valor de altura e essa estrutura dominante são considerados para toda a linha de transmissão a fim de avaliar o desempenho da linha inteira frente a descargas atmosféricas. Nessa metodologia, o tipo de silhueta mais numerosa ao longo do percurso e o valor médio de altura são adotados para estimar o desempenho da linha inteira. Essas simplificações, no entanto, podem levar a desvios na estimação da taxa de desligamentos.

A fim de se obter estimativas mais precisas acerca do desempenho de linhas de transmissão, é importante contemplar as características locais de incidência de descargas de onde a LT está instalada. Ao longo dos anos, medições de descargas atmosféricas têm sido realizadas em várias localidades com o objetivo de caracterizar mais realisticamente ondas representativas de descargas, uma vez que essas podem possuir características diferentes em função do local de incidência [88]. Com base nas medições e nos parâmetros obtidos, é possível definir distribuições de valor de pico das correntes de descarga mais representativas das condições locais.

Este capítulo tem como objetivo apresentar as principais metodologias para cálculo do desempenho da linha recomendadas por normas internacionais, e as metodologias propostas pelo trabalho que tem como objetivo avaliar o efeito da consideração de diferentes estruturas ao longo de uma LT, da distribuição dos valores de pico das correntes de descarga e da variação da altura das estruturas sobre o desempenho da linha.

3.2. Cálculo de Desempenho de Linhas de Transmissão considerando uma única silhueta dominante

O primeiro passo para o cálculo da taxa de desligamentos da linha de transmissão em função da incidência de descargas atmosféricas é determinar o número de descargas que atingem a LT. Duas abordagens são comumente utilizadas na literatura para o cálculo

do número de descargas que atingem a LT: técnicas baseadas em Modelos Eletrogeométricos e no conceito de Raio de Atração.

Tendo em vista modelos embasados no conceito de Raio de Atração considerando-se as equações propostas por Eriksson em [33], Raio de Atração Equivalente (RAe) (Equação (2.9)) e Raio de Atração Médio (RAm) (Equação (2.10)). O Raio de Atração Médio é uma metodologia recomendada em guias internacionais de desempenho de linhas de transmissão [27] e de distribuição [90], e é a principal justificativa para a utilização dessa metodologia neste trabalho. A expressão proposta por essas normas para o cálculo do número de descargas incidentes em uma linha de transmissão é dada pelas equações a seguir:

$$W = 28h^{0,6} + b \quad (3.1)$$

$$N_s = N_g \left(\frac{W}{10} \right) \quad (3.2)$$

onde W é a atratividade lateral da linha (m), N_s é o número de descargas que incidem a cada 100 km da linha de transmissão, N_g é a densidade de descargas para o solo (flashes/km²/ano), h é a altura do cabo de blindagem (m) e b é a distância entre os cabos de blindagem da torre da LT (m).

É importante ressaltar aqui que o RAm considera apenas um valor de corrente médio, 35 kA, obtido com base nos dados de medições disponíveis a época que Eriksson propôs essa metodologia, diferentemente do Raio de Atração Equivalente, não considera uma distribuição de valor de pico de corrente. A descarga atmosférica é um fenômeno aleatório, possui uma variabilidade estatística, e o seu valor de pico varia em função da localização geográfica. A não consideração da distribuição de valor de pico de corrente, ou seja, a consideração de um único valor de pico de descarga, pode afetar diretamente o cálculo do número de desligamentos da LT em função da ocorrência por backflashover.

As linhas de transmissão usualmente possuem longas extensões, podendo atravessar diferentes tipos de relevo ao longo do seu percurso possuindo um elevado número de estruturas e podendo estar submetida a diferentes valores de densidade de descargas atmosféricas para o solo, N_g . Essas estruturas podem ser de diversos tipos

(suspensão, ancoragem, estaiadas) e possuir diferentes alturas ao longo do comprimento da linha.

A avaliação do desempenho da linha considerando cada estrutura individualmente, efetuando o cálculo do número de desligamentos para cada tipo de silhueta e cada altura, exige um enorme esforço computacional. Tendo em vista que uma LT pode possuir centenas de estruturas, simplificações são comumente adotadas. A metodologia de cálculo de desempenho de linhas de transmissão comumente adotada pela literatura [27], [40], considera somente a silhueta dominante ou típica para avaliação do desempenho da linha inteira frente a descargas atmosféricas, e a altura média dessa estrutura ao longo da linha.

É denominada estrutura dominante o tipo de silhueta que possui o maior número de torres ao longo da extensão da linha. Por exemplo, considerando que uma linha de transmissão possua 350 torres ao longo da sua rota divididas em 180 silhuetas de suspensão, 120 do tipo estaiada e 50 do tipo ancoragem. Nesse caso, a silhueta dominante, e única considerada no cálculo na metodologia proposta pela literatura, é a estrutura autoportante de suspensão.

Determinada a estrutura típica, determina-se a altura média da silhueta, a impedância de surto e o vão da linha a serem considerados no cálculo de desempenho da LT. Tendo em conta que as alturas das estruturas e os comprimentos dos vãos associados a essas variam ao longo da linha, obtém-se o valor médio para cada uma dessas variáveis.

Definida a silhueta típica, altura média e vão, é calculada a impedância de surto da torre considerando a metodologia de Jordan estendida proposta em [69]. Essa abordagem permite a consideração da variação da geometria da silhueta ao longo de sua altura.

As simulações desenvolvidas nesta tese a fim de avaliar as sobretensões geradas por surtos atmosféricos em linhas de transmissão foram implementadas no ATP (*Alternative Transient Program*). Cada vão da linha é representado utilizando a ferramenta LCC (*Line and Cable Constants*) do ATP, que inclui as rotinas de cálculo de constantes de cabos e linhas. Na LCC, as posições dos condutores da linha são inseridas de acordo com a geometria da torre e o modelo de linha com parâmetros distribuídos e dependente da frequência de Marti é utilizado [45].

Além da silhueta, da altura da estrutura e do vão, a impedância de aterramento das estruturas que compõem a linha de transmissão também varia, visto que o extenso percurso da linha atravessa diferentes tipos de relevo e de solo. As dimensões do sistema

de aterramento variam em LTs a depender do tipo e composição do solo atravessado pela linha. O sistema de aterramento da linha é instalado em solos com diversos valores de resistividade, podendo possuir valores mais baixos ou mais elevados de impedância de aterramento dependendo do tipo de solo. A forma mais rigorosa de representar o sistema de aterramento é através da impedância harmônica; no entanto, a sua determinação é complexa e demanda um alto esforço computacional. Neste trabalho, a representação do sistema de aterramento de linhas de transmissão é feita através da sua impedância impulsiva (Z_p), visto que, em linhas de transmissão sem para-raios, Z_p leva a resultados muito próximos aos obtidos utilizando a impedância harmônica [12], [13], [19].

Em virtude dos diferentes valores de impedância impulsiva presentes ao longo da LT, o que é usualmente recomendado pela literatura, e por guias de desempenho de linhas de transmissão, a divisão do conjunto total de impedâncias em k grupos com N_k torres. Para cada grupo k , calcula-se o valor médio de impedância impulsiva criando-se assim uma distribuição com k valores de Z_p . Considerando, por exemplo, o caso citado anteriormente, uma linha de transmissão com 350 estruturas, e conseqüentemente 350 valores de impedância impulsiva, poderia ser ordenado em ordem crescente de valor de impedância e dividido em dez grupos de Z_p com trinta e cinco estruturas cada. A distribuição seria composta por dez valores de impedâncias impulsivas médias.

Para cada valor de Z_p associado a uma dada seção k , é calculada a sobretensão resultante à qual o isolamento é submetido em função da incidência de uma descarga atmosférica. A descarga é injetada no topo de uma torre central. Um par de torres adjacentes, idênticas à atingida, é incluído nas simulações a fim de considerar o efeito de propagação das sobretensões ao longo dos condutores da linha e o efeito das reflexões advindas de torres adjacentes.

O final da linha é perfeitamente casado em toda faixa de frequência da LT utilizando linhas infinitamente longas. A onda de corrente é representada através de uma soma de funções de Heidler, visto que essa abordagem é capaz de reproduzir as características típicas de uma onda de primeira descarga. São considerados os parâmetros medianos representativos das ondas de correntes medidas no Monte San Salvatore, Morro do Cachimbo e em linhas de transmissão do Japão [38].

Determinadas as sobretensões para cada seção k , o próximo passo consiste em avaliar a suportabilidade do isolamento da LT frente a essas sobretensões. Essa análise é feita empregando-se o Método do Efeito Disruptivo (Método DE). Como explicitado no

Capítulo 2, essa abordagem permite a avaliação da suportabilidade de um arranjo isolante frente a formas de onda de sobretensão de características variadas (diferentes da forma de onda padrão) e é comumente utilizada na literatura.

Aplicando o Método DE às sobretensões, obtém-se o valor da corrente crítica I_{Ck} associada com cada seção k da linha de transmissão. A taxa de desligamentos (taxa de *backflashover* ou BFR_k) de cada seção k é determinada a partir da equação (3.3).

$$BFR_k = 0,6 \times N_S \times P(I_P > I_{Ck}) \quad (3.3)$$

onde $P(I_P > I_{Ck})$ corresponde à probabilidade do valor de pico I_P de uma onda de corrente de descarga atmosférica exceder o valor de I_{Ck} .

A taxa de *backflashover* total da linha (BFR) é dada pela expressão:

$$BFR = \frac{1}{N} \sum_1^k BFR_k \times N_k \quad (3.4)$$

onde N é o número total de torres da linha de transmissão, $N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$.

3.3. Cálculo de Desempenho de Linhas de Transmissão considerando uma representação detalhada da distribuição de torres

A impedância de surto da torre é um parâmetro essencial para o desenvolvimento de projetos de proteção e de coordenação de isolamento em linhas de transmissão. A impedância tem influência direta sobre os valores de sobretensões aos quais as cadeias de isoladores da linha são submetidos quando da incidência de uma descarga atmosférica. Neste contexto, o valor da impedância de surto é fundamental na determinação da suportabilidade dos isoladores da LT e conseqüentemente na avaliação do desempenho da mesma frente a surtos de origem atmosférica. Sua determinação deve ser feita de maneira rigorosa.

Usualmente, as torres que tipicamente compõem a LT podem ser agrupadas em dois conjuntos distintos: autoportantes (suspensão e ancoragem) e estaiadas. A silhueta

do tipo estaiada possui valores de impedância de surto menores em relação aos valores obtidos para torres de suspensão [40]. A principal justificativa para isso reside na presença de suportes metálicos, estais, que fornecem caminhos alternativos para a corrente advinda de descargas atmosféricas.

A fim de se obter taxas de desligamentos por *backflashover* (*BFR*) da linha de transmissão mais realísticas, tendo em conta que a linha é usualmente composta por diferentes tipos de silhuetas com valores de impedância variados, é necessária a consideração da distribuição de torres ao longo da LT, ou seja, a consideração não de uma silhueta dominante, mas sim dos principais tipos de estruturas que compõem a linha.

A metodologia proposta recomenda a divisão da linha de transmissão em três grupos de estruturas dominantes: 1) suspensão; 2) ancoragem e 3) estaiadas. Para cada conjunto de estruturas, aplica-se a metodologia convencional para cálculo de desempenho explicitada na seção anterior. São considerados os valores de impedância de surto e atratividade da silhueta (W), posicionamento de condutores e distribuição da impedância impulsiva de pé de torre (Z_p) característicos de cada grupo de estruturas. Importante salientar que, em virtude da diferença entre as geometrias das silhuetas de cada conjunto, a atratividade W possui valores distintos, conseqüentemente o número de descargas que incidem na linha é diferente para cada tipo de torre.

As simulações são realizadas no ATP para cada tipo de silhueta da mesma forma como a descrita para a metodologia convencional, com uma especificidade para as simulações desenvolvidas para as estruturas de ancoragem. Quando a torre de ancoragem é atingida por uma descarga, o par de torres adjacentes é do tipo autoportante de suspensão e não de ancoragem. Essa consideração é feita a fim de fornecer um caráter mais realista para as simulações, visto que essa condição é comumente encontrada em linhas de transmissão reais.

Obtidas as sobretensões para cada silhueta dominante (considerando a distribuição de Z_p específica de cada silhueta), aplica-se o Método DE e a corrente crítica é determinada para cada grupo. A partir dos valores de I_c calcula-se as taxas de *backflashover* para cada tipo de torre, BFR_1 associada com o grupo 1 (suspensão), BFR_2 associada com o grupo 2 (ancoragem) e BFR_3 associada com o grupo 3 (estaiadas). A taxa de *backflashover* da LT inteira é dada pela expressão (3.5).

$$BFR = \frac{1}{N} \{S_1 \times BFR_1 + S_2 \times BFR_2 + S_3 \times BFR_3\} \quad (3.5)$$

onde N é o número total de estruturas ao longo da linha de transmissão e S_i é o número total de estruturas do grupo i .

A consideração no cálculo de desempenho da linha de transmissão da distribuição de torres ao longo da linha propicia uma avaliação mais realística a respeito do comportamento da mesma frente a descargas atmosféricas. Além disso, permite a identificação dos trechos mais críticos, que possuem taxas de desligamentos maiores em comparação aos demais. Estruturas com maiores valores de impedância de surto em geral levam a valores mais elevados de sobretensão resultante, podendo dispor de maiores valores de BFR em comparação aos outros tipos de torres.

Determinado o grupo de estruturas que possuem o desempenho mais crítico da linha, é possível implementar medidas específicas de proteção para esse grupo a fim de melhorar o seu desempenho. Medidas como a melhoria do sistema de aterramento, instalação de para-raios, aumento da cadeia de isoladores, diminuindo assim o número de desligamentos relativo ao grupo de torres e conseqüentemente melhorando do desempenho da linha como um todo. Ademais, essa ação resulta na implementação de medidas de melhoria do desempenho da linha de maneira mais eficiente e econômica.

3.4. Cálculo de desempenho de linhas de transmissão considerando uma única altura e considerando a variação de altura das torres

Um dos objetivos desta tese é avaliar o efeito da consideração da variação de altura de diferentes tipos de estruturas que constituem uma linha na taxa de desligamento por *backflashover*. As variações de altura da torre da linha de transmissão são definidas avaliando-se as alturas de pés de torre disponíveis para cada tipo de estrutura. Uma torre de LT é composta e montada por partes. São fabricados pés de torre com diferentes valores de altura em função da variação de altura dos relevos por onde uma LT pode passar. As demais partes componentes da estrutura possuem comprimentos padrões, em geral não há variação.

São selecionados diferentes valores de pé de torre para estruturas autoportantes de suspensão e estaiadas, de acordo com projetos reais de linhas de transmissão no Brasil.

Para cada valor de altura é calculado o valor da impedância de surto, que muda em função da altura e geometria da estrutura. São calculadas as posições de cada condutor, flechas e vãos condizentes com cada uma das alturas consideradas, sempre respeitando as alturas mínimas de condutor cabo-solo para o respectivo nível de tensão da linha.

É considerada uma variação de altura de 31,0m a 43,0m para as estruturas autoportantes de suspensão e de 31,5m a 43,5m para as estruturas estaiadas. A fim de se avaliar exclusivamente o efeito da variação de altura das estruturas sobre o desempenho da linha considera-se o método proposto por brochuras e normas para cálculo de desempenho da LT, considera-se uma estrutura típica como representante de toda a linha. Serão consideradas torres do tipo estaiadas e autoportantes, assim será possível avaliar o efeito da altura no desempenho da linha para dois tipos de geometrias bem distintos.

As torres de ancoragem não são consideradas nas análises de variação de altura. As estruturas de ancoragem são utilizadas como “suportes” da linha de transmissão, garantindo mais estabilidade mecânica e estrutural da LT. Elas estão em menor número ao longo da estrutura e em geral possuem menores valores de altura em comparação com os demais tipos de estruturas presentes ao longo da linha. Por serem estruturas mais baixas e estarem em menor número o impacto da variação de altura dessas estruturas no desempenho da LT é significativamente baixo em relação aos demais tipos de geometria de torre. Além disso as estruturas de ancoragem, em geral, estão entre estruturas que possuem maiores alturas, como estaiadas ou autoportantes de suspensão, tendo assim uma menor probabilidade de incidência de descargas.

O raio de atração da torre depende diretamente da altura da mesma, ou seja, quanto maiores os valores de altura da estrutura, maior a incidência de descargas na torre e maior a taxa de desligamentos da linha. O cálculo da área de atração de uma LT é dada pelas expressões (3.6) e (3.7).

$$R_{medio}(h) = 14 \cdot h^{0.6} \quad (3.6)$$

$$W = 2 \cdot R_{medio} + b \quad (3.7)$$

Onde b representa a distância entre os cabos para-raios e R_{medio} corresponde ao raio de atração médio e h representa a altura da torre da linha de transmissão.

Como explicitado no Capítulo 2, há diversas metodologias utilizadas para calcular a atratividade da linha. Para avaliar unicamente o efeito da variação da altura, sem o impacto de distribuições de corrente no cálculo da área de atração da LT, é considerada a metodologia baseada no cálculo do raio de atração médio, R_{medio} , proposto por Eriksson em [33], equações (3.6) e (3.7), em razão dessa metodologia ser amplamente recomendada em brochuras e normas e não considerar o efeito da distribuição de corrente da descarga atmosférica.

3.5. Distribuições de valores de pico das correntes de descarga atmosférica

A severidade de descargas atmosféricas em termos de desligamento da linha em função de backflashover é fortemente relacionada com os parâmetros da descarga atmosférica, nomeados: valor de pico da corrente, máxima taxa de crescimento, taxa média de crescimento, tempo de frente da onda de corrente, duração total da descarga, carga transferida e energia específica, ação integral [36]. Dentro desses parâmetros, o mais importante para estudos de proteção de sistemas elétricas contra descargas elétricas é o valor de pico da corrente. A pesquisa por uma distribuição de corrente de valores de pico para proteção contra descargas atmosféricas data de pesquisas anteriores a 1930, com um primeiro consenso alcançado em 1950.

Uma abrangente pesquisa de diferentes distribuições de valores de pico de corrente, juntamente com informações detalhadas, pode ser encontrada na brochura do CIGRÉ publicada em 2013, *Lightning Parameters for Engineering Applications* (CIGRÉ TB 549). A seguir, um resumo das distribuições mais comumente utilizadas na proteção contra descargas atmosféricas em linhas de transmissão é apresentada e discutida brevemente.

A fim de se obter uma caracterização fidedigna dos parâmetros das ondas de corrente e, conseqüentemente, estimativas mais precisas de desempenho de linhas de transmissão, estações de medições de descarga foram construídas em diversas partes do mundo.

Segundo A. J. Eriksson a intensidade do valor médio da corrente de descarga atmosférica pode variar com alguns fatores, como localização geográfica ou a severidade

da tempestade [33]. É importante considerar distribuições cumulativas dos parâmetros da onda de corrente da descarga que contemplem as características locais onde a LT está instalada a fim de se obter uma estimativa de desempenho o mais coerente possível com a realidade.

Inúmeras medições foram realizadas ao longo dos anos com o intuito de determinar os parâmetros relacionados às descargas atmosféricas e distribuições estatísticas foram propostas a fim de avaliar a natureza aleatória da descarga e de seus parâmetros. Em 1972, foi apresentado um estudo por Popolansky no qual foi indicado uma série de erros encontrados nas curvas de distribuição cumulativa do valor de pico das correntes de descargas atmosféricas propostas até então. As medições nas quais as curvas de distribuição foram baseadas, em sua maior parte, foram obtidas em torres e cabos para-raios de linhas de transmissão por meio de elos magnéticos [91], [92].

Como descrito em [91], uma eventual desmagnetização devido à ocorrência de correntes de curto-circuito na LT, incidência de descargas atmosféricas com polaridade oposta, saturação, poderiam afetar a qualidade dos resultados obtidos através dos elos magnéticos [92]. Os erros percentuais associados a essa forma de medição do valor de pico da corrente poderiam ser muito elevados. Logo, as curvas de distribuição de probabilidade existentes não eram confiáveis. Além disso, essas foram embasadas em medições de descargas atmosféricas ascendentes e descendentes, visto que na época ainda não havia critério de diferenciação [92].

A partir das medições realizadas por Berger [93], 192 medições de descargas atmosféricas, características específicas puderam ser atribuídas a descargas ascendentes e descendentes, permitindo uma diferenciação entre os tipos de descargas. Assim, foi recomendado pelo CIGRÉ [40] a elaboração de uma nova curva de distribuição de probabilidade cumulativa dos picos de corrente, com base nos novos dados obtidos através das medições de Berger. O objetivo dessa curva seria descrever o comportamento das descargas atmosféricas e seus parâmetros de uma forma geral. A nova base de dados era composta por medições realizadas em diversas partes do mundo onde, a exceção das de Berger, todas foram obtidas por meio do uso de elos magnéticos [94].

O objetivo de se ter uma base de dados composta por medições realizadas em diversas localidades do mundo por diversos pesquisadores era obter uma base de dados com o maior número de medições de descargas atmosféricas possível. Descargas atmosféricas possuem caráter estatístico e medições com alto grau de complexidade, em

razão disso distribuições de corrente sofrem de uma falta de dados na faixa final das distribuições, particularmente para os valores de pico de corrente mais elevados. Esse fato traz incertezas em certas aplicações de engenharia já que o comportamento das descargas nessa faixa de valores não é estatisticamente bem caracterizado e iriam possuir maiores valores de incerteza. Uma base de dados com um maior número de dados advindos de medição diminuiria essa incerteza, e por isso, foram adicionadas às medições de Berger medições obtidas através de elos magnéticos expandindo para uma base de dados com 624 medições.

Foram analisadas diversas funções a fim de modelar o comportamento aleatório do valor de pico da descarga. Dentre diversas funções, a função distribuição do tipo log-normal foi a que obteve um melhor ajuste à curva de probabilidade cumulativa construída com base no conjunto de medições. É importante ressaltar que, segundo Popolansky, as diferenças entre a curva cumulativa obtida experimentalmente e sua aproximação pela distribuição log-normal são significativas se testes estatísticos usuais forem utilizados. Apesar disso, das funções testadas, a log-normal foi a que apresentou o melhor ajuste [92].

Como resultado do estudo desenvolvido por Popolansky, a função de distribuição de probabilidade do tipo log-normal é adotada para representar não somente a distribuição de probabilidade cumulativa dos picos de corrente, como também para caracterizar o comportamento estatístico dos parâmetros de ondas de corrente de descargas atmosféricas [92]. A expressão que descreve a função densidade de probabilidade para um determinado parâmetro x da onda de corrente é dada por [95]:

$$p_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\sigma_{\ln x}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \ln \mu_x}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right] \quad (3.6)$$

onde $\sigma_{\ln x}$ e μ_x são respectivamente o desvio padrão logarítmico e o valor médio do parâmetro x .

Os valores dos parâmetros obtidos por Berger a partir de 192 medições realizadas no Monte San Salvatore, na Suíça, foram resumidos em [96]. Todos os parâmetros foram calculados manualmente e permitiram uma análise abrangente a respeito do comportamento impulsivo das ondas de corrente de descargas atmosféricas. Contudo, os dados comumente utilizados pela literatura são oriundos de cálculos computacionais

realizados a partir das medições obtidas por Berger, que foram previamente digitalizados por H. Kröninger [97]. Em virtude da complexidade do cálculo, as diferenças entre alguns parâmetros obtidos manualmente em [96] e computacionalmente em [98] são significativas, principalmente diferenças associadas à taxa de crescimento e tempo de subida [92].

Em função de um estudo apresentado por Berger em 1978 [22], no qual o autor do estudo indica que todas as descargas positivas medidas na estação de Monte San Salvatore foram classificadas como ascendentes, o CIGRÉ estabeleceu que uma nova curva de distribuição de probabilidade cumulativa associada somente a descargas descendentes negativas confirmadas ou medições de correntes negativas em estruturas de alturas inferiores a 60 m, deveria ser construída. O limite de altura citado é proveniente de um estudo realizado por A. J. Eriksson no qual conclui-se que a incidência de descargas atmosféricas ascendentes em estruturas de altura inferior a 60 m é bem abaixo de 10% [99].

A nova curva de distribuição foi apresentada em 1980 por Anderson e Eriksson em [98]. Além da curva de distribuição cumulativa foram apontados também parâmetros relativos às formas de onda de corrente para as primeiras descargas de retorno e para as subsequentes. A base de dados utilizada foi composta por apenas descargas descendentes negativas, totalizando 338 medições, diferentemente das 624 medições de Popolansky. Apesar da maioria das descargas atmosféricas medidas em San Salvatore terem sido do tipo ascendente, foram utilizadas somente descargas descendentes negativas, consideradas mais representativas para estudos de desempenho de linhas de transmissão [92], [98].

Há duas distribuições de valor de pico de corrente de descarga mais comumente encontradas na literatura e adotadas por guias e normas de proteção contra descargas atmosféricas: a distribuição do IEEE (IEEE 1410-2010 [90] e IEEE 1243-1997 [100]) e a distribuição recomendada por CIGRÉ [98]. Essas distribuições, denominadas “distribuições globais”, foram obtidas a partir de medições diretas e indiretas em diversos lugares do mundo e dos estudos citados anteriormente. As distribuições utilizaram a base de dados de 338 medições mencionada acima, utilizando os dados obtidos por Berger e de medições de links magnéticos de diversos lugares do mundo, por isso são chamadas de “distribuições globais”. As curvas são apresentadas na Figura 3.1 [88].

A distribuição sugerida pelo CIGRÉ adota a metodologia sugerida por Anderson e Eriksson em 1980 [98]. A distribuição é composta por duas retas com inclinações diferentes e que se cruzam em 20 kA. A abordagem utiliza duas retas e não somente uma com o intuito de melhor aproximar a distribuição cumulativa da corrente de pico dos dados obtidos experimentalmente. Para a curva sugerida pelo IEEE adota a metodologia proposta por Anderson [100] (comumente adotada pela literatura), a probabilidade de ocorrência do valor de pico da corrente de primeira descarga é dada pela equação (3.7). A distribuição para descargas subsequentes é dada pela equação (3.8).

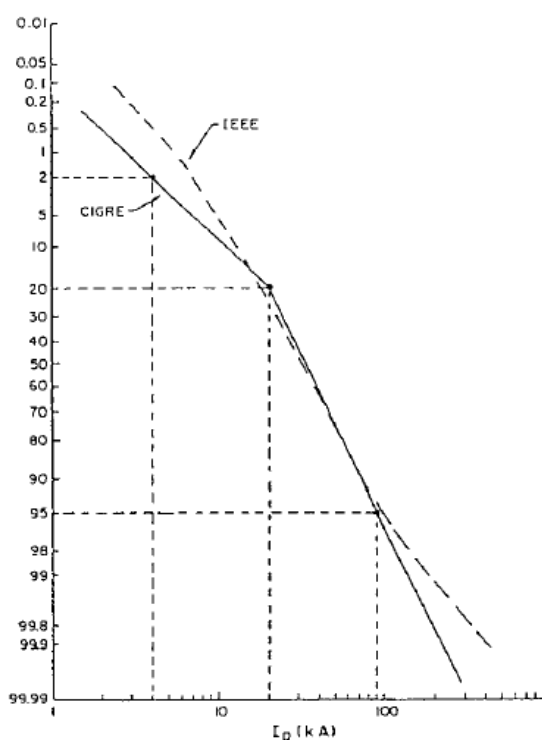


Figura 3.1 - Distribuições de valor de pico para ondas de primeira descarga descendentes negativas. Retirado de [40].

$$P(I) = \frac{1}{1 + (1/31)^{2,6}} \quad (3.7)$$

$$P(I) = \frac{1}{1 + (1/12)^{2,7}} \quad (3.8)$$

É importante salientar alguns pontos a respeito das distribuições globais recomendadas pelas normas de proteção contra descargas atmosféricas, IEEE e CIGRÉ. As

distribuições propostas pelas normas não são muito diferentes da proposta por Berger, obtida a partir de medições diretas realizadas na estação instalada no Monte San Salvatore na Suíça e ainda hoje consideradas como as medições mais confiáveis. Como o mencionado anteriormente, com intuito de diminuir as incertezas a níveis aceitáveis na engenharia para os valores localizados nos pontos extremos da curva de distribuição (valores de pico de corrente extremamente baixos ou particularmente altos (acima de 100 kA)) seria necessário um número muito maior de medições, provavelmente na ordem de milhares mais do que a disponível atualmente [88].

Tendo isso em consideração, é compreensível a tentativa de reunião do maior número de medições e dados disponíveis a respeito da incidência de descargas atmosféricas, com intuito de aumentar a amostra de dados e, assim, reduzir as incertezas estatísticas. Em 1972, Popolansky combinou medições diretas e de elos magnéticos realizadas em 8 países, base de dados com 624 medições. A distribuição proposta por Anderson e Eriksson considera apenas descargas descendentes negativas, mas ainda sim são consideradas medições obtidas a partir de elos magnéticos, uma base de dados composta por 338 medições. A distribuição proposta pelo CIGRÉ em 1991 [40] adicionou 70 medições obtidas de maneira direta e indireta à base de Anderson e Eriksson e aumentou o tamanho da amostra para 408 [88].

Um fato muito importante, e que deve ser ressaltado, a respeito das distribuições “globais” de valores de pico de descarga é a inclusão de medições indiretas menos precisas que podem conter erros significativos. Como explicitado anteriormente, os elos magnéticos são susceptíveis a saturação, ou desmagnetização em função do balanço durante o seu transporte ou em virtude da ocorrência de correntes de curto-circuito nas linhas de transmissão. Em resumo, é importante ponderar se seria melhor não “comprometer” as medições obtidas de forma direta, como as de Berger, adicionando medições indiretas advindas de elos magnéticos e que podem conter erros expressivos [88].

Como explicitado anteriormente, a versão mais recente de distribuição cumulativa global sugerida pelo CIGRÉ foi aproximada por duas linhas retas tendo diferentes inclinações com um ponto de intersecção em 20 kA. A mudança de inclinação nesse ponto é feita justamente com o propósito de realizar um ajuste mais preciso de conjuntos de dados, visto que esses não representam uma mesma população geral (são obtidos direta e indiretamente em diversas localidades do mundo) e, por isso, apresentam uma

dispersão mais elevada. Não está claro se misturar medições diretas com medições indiretas contribui para a construção de uma distribuição estatisticamente mais confiável ou se, na verdade, poderia haver uma contaminação acumulada de dados, tendo em vista a presença de medições de alta qualidade juntamente com dados de medição de qualidade questionável [88].

Ao longo dos anos, medições diretas de descargas atmosféricas têm sido realizadas em várias localidades do mundo, em torres instrumentadas e linhas de transmissão, com o objetivo de caracterizar mais realisticamente ondas representativas [88]. Com base nas medições realizadas e nos parâmetros obtidos, é possível obter distribuições cumulativas do valor de pico da descarga mais condizentes com as condições locais onde as LTs estão instaladas. Algumas distribuições tipicamente empregadas na literatura são as obtidas através de medições realizadas na torre instrumentada no Morro do Cachimbo [23] e as obtidas por Takami e Okabe em torres instrumentadas de linhas de transmissão no Japão [24]. As expressões (3.9) e (3.10) correspondem às distribuições obtidas por meio de medições realizadas no Morro do Cachimbo para primeiras descargas de retorno e descargas subsequentes, respectivamente.

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{43,3}\right)^{3,8}} \quad (3.9)$$

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{17,3}\right)^{3,2}} \quad (3.10)$$

Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros das curvas log-normais associadas com as distribuições de Berger [36], Morro do Cachimbo [23], Takami e Okabe [24] e CIGRÉ [6]. Substituindo na equação (3.6) os valores apresentados na tabela a seguir é possível obter a curva cumulativa de probabilidade associada.

Tabela 3.1 - Parâmetros de curvas cumulativas de distribuições de descarga

Distribuições	$\sigma_{\ln I_p}$	μ_{I_p} (kA)
Berger (MSS)	0,6102	30
Morro do Cachimbo (MCS)	0,47	43,3

Takami e Okabe (TLJ)	0,644	29,3
CIGRE ($I_c < 20 \text{ kA}$)	1,33	61
CIGRE ($I_c \geq 20 \text{ kA}$)	0,605	33,3

3.6 Impacto da distribuição dos valores de pico das correntes de descarga atmosférica no cálculo do número de descargas incidentes na linha

A distribuição dos valores de pico das correntes de descarga atmosférica impacta em dois pontos distintos do cálculo de desempenho de linhas de transmissão: no cálculo da área de exposição da linha e no cálculo da probabilidade de ocorrência da corrente crítica de descarga I_c .

Como explicitado no Capítulo 2, a área de exposição da linha pode ser calculado utilizando metodologias baseadas no Modelo Eletrogeométrico (MEG) e no Método de Progressão do Líder (MPL). O foco do presente trabalho reside nos métodos embasados no MPL para cálculo da área de exposição da linha e o número de descargas incidentes na LT. O Método de Progressão do Líder se baseia no conceito de raio de atração da linha (R_a), equação (2.7). Em 1987 Eriksson propõe, com base em estudos empíricos e analíticos, uma estimativa mais precisa da área de exposição de linhas de transmissão baseado no MPL. As constantes propostas por Eriksson são recomendadas por brochuras e standards e levam às equações a seguir.

$$R_a(h, I) = 0,67 \cdot h^{0,6} \cdot I^{0,74} \quad (3.11)$$

$$R_{equivalente} = \int_{I=0}^{I=\infty} R_a(h, I) \cdot p(I) dI \quad (3.12)$$

Onde R_a corresponde ao raio de atração da linha, h a altura da torre, I o valor de pico da corrente de descarga, $R_{equivalente}$ ao raio de atração equivalente da torre e $p(I)$ e a probabilidade cumulativa de valor de pico de corrente.

A expressão (3.13) é derivada da expressão (3.11) e é amplamente utilizada em standards e brochuras para estimar a atratividade da linha. Essa expressão simplificada, chamada de raio de atração médio, foi proposto por Eriksson assumindo um pico de

corrente médio de 35 kA e considerando um grande número de observações experimentais de descargas atmosféricas incidindo sobre uma variedade de estruturas na África do Sul [33x]. O valor médio de 35 kA foi baseado em medições disponíveis é época da proposição.

$$R_{\text{médio}} = 14 \cdot h^{0,6} \quad (3.13)$$

Onde $R_{\text{médio}}$ corresponde ao raio de atração médio de uma torre de uma linha de transmissão de altura h e valor de pico de corrente de descarga atmosférica equivalente a 35 kA. É preciso enfatizar que (3.13) representa o raio de atração médio de estruturas em função da altura, para um valor médio de corrente somente e não para uma distribuição de valores de pico de corrente, como o representado na equação (3.11).

O presente trabalho adota as expressões de raio de atração equivalente e raio de atração médio para calcular a atratividade W da linha, equação (3.14). Como o mencionado anteriormente no Capítulo 2, essa expressão é recomendada por brochuras e standards para cálculo do número de descargas incidentes sobre a LT. Essa consideração tem como objetivo analisar o impacto probabilidade cumulativa de corrente, $p(I)$, no cálculo da taxa de desligamentos da LT por *backflashover*, equação (3.15).

$$W = 2 \cdot R_{(\text{equivalente} / \text{medio})} + b \quad (3.14)$$

$$BFR = 0,6 \cdot 0,1 \cdot N_g \cdot W \cdot p(I_{\text{crit}}) \quad (3.15)$$

Onde BFR é a taxa de desligamentos por *backflashover*, N_g corresponde à densidade de descargas atmosféricas para a terra e $p(I_{\text{crit}})$ a probabilidade de ocorrência da corrente crítica, que é o menor valor de corrente capaz de provocar uma sobretensão responsável por um desligamento da LT por BFR.

De posse das equações acima explicitadas, é importante salientar que o cálculo de BFR considerando $R_{\text{equivalente}}$ tem a utilização da probabilidade cumulativa de valor de pico da corrente utilizada em dois pontos distintos, no cálculo da atratividade da linha, W , e no cálculo de $p(I_{\text{crit}})$. A consideração de $R_{\text{médio}}$ implica o impacto de $p(I)$ somente no cálculo da probabilidade de ocorrência da corrente crítica.

Como pode ser visto nas expressões (3.11) a (3.15), a distribuição cumulativa dos valores de pico da corrente impacta diretamente no cálculo da taxa de *backflashover* da linha. Em virtude das distribuições utilizadas, para um mesmo valor de corrente crítica, obtém-se diferentes valores de probabilidade de ocorrência e conseqüentemente de *BFR*. O mesmo vale para o cálculo da atratividade, W , da LT, para uma mesma estrutura, sem variar o valor da altura, pode-se obter diferentes valores de descargas incidentes na LT em função da distribuição cumulativa empregada. Diante disso, a distribuição cumulativa do valor de pico é uma variável fundamental na avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosférica.

No Capítulo 4 são apresentados os estudos de caso e simulações considerando o raio de atração médio a fim de mensurar o impacto da probabilidade de corrente cumulativa de maneira isolada e empregando-se o raio de atração equivalente com o propósito de avaliar o efeito em dois pontos do cálculo. São consideradas as distribuições de valor de pico de corrente de descarga cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 3.1 e a recomendada pelo IEEE, equação (3.7).

3.7 Considerações Finais

Ao longo do capítulo foi proposta uma nova metodologia para o cálculo de desempenho de linhas de transmissão, na qual considera-se três grupos de silhuetas (suspensão, ancoragem e estaiada) e não somente um único tipo dominante como o recomendado pela abordagem tradicional.

A linha de transmissão é constituída por diversos tipos de estruturas com diferentes geometrias e valores de altura. O método recomendado por brochuras para cálculo do desempenho de uma LT indica como valor de altura uma média entre todos os valores de altura das torres que compõe a linha. Essa simplificação impacta na avaliação da taxa de desligamentos da linha visto que o valor da altura de uma estrutura afeta diretamente o cálculo da atratividade das torres e conseqüentemente o número de descargas que irão incidir sobre a LT.

Outra variável importante na avaliação do desempenho é a distribuição cumulativa de probabilidade do valor de pico da corrente. A fim de obter uma caracterização fidedigna dos parâmetros das ondas de corrente e, conseqüentemente, cálculos mais

realísticos a respeito de desempenho de linhas de transmissão, estações de medições de descarga foram construídas em diversas partes do mundo. A partir das medições realizadas, construiu-se uma distribuição cujo intuito é representar o caráter estatístico dos valores de pico das correntes de descarga.

A distribuição cumulativa dos valores de pico é fundamental no cálculo de desempenho de linhas de transmissão, impactando no cálculo da área de exposição e na determinação da probabilidade de ocorrência do valor da corrente crítica de descarga. O uso de distribuições que reflitam a característica de incidência de descargas do local onde a linha está instalada possibilita um cálculo mais preciso, visto que as descargas possuem características diferenciadas em função da localidade.

No próximo capítulo, são apresentados os estudos de caso, as simulações e os resultados obtidos a fim de demonstrar o efeito da consideração de diferentes tipos de torres, diferentes valores de altura e de diferentes distribuições de valores de pico de correntes de descarga sobre a avaliação do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas a fim de avaliar o efeito da consideração da distribuição de torres ao longo do percurso da linha de transmissão, da variação de altura das torres ao longo da linha e de diferentes distribuições de valor de pico sobre o desempenho da LT frente a descargas atmosféricas. Comparam-se os resultados obtidos através da consideração de um único tipo de torre e uma distribuição detalhada de torres no cálculo da taxa de desligamentos da linha por backflashover, da consideração de uma única altura e um conjunto de valores variados de altura na taxa de backflashover e os resultados obtidos utilizando as diferentes distribuições cumulativas associadas a medições de descargas atmosféricas.

4.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar e analisar as simulações de sobretensões atmosféricas em linhas de transmissão no ATP com o intuito de avaliar o impacto da representação mais detalhada da distribuição de torres, da variação de altura de estruturas ao longo da linha de transmissão e da distribuição do valor de pico da corrente de descarga atmosférica no valor da taxa de desligamento da linha por *backflashover*. Para realizar essas avaliações, são consideradas LTs de 138, 230 e 500 kV, ondas representativas de corrente de descargas atmosféricas obtidas a partir de medições realizadas no Monte San Salvatore, na Suíça, e no Morro do Cachimbo, no Brasil, e as obtidas por Takami e Okabe em linhas de transmissão no Japão e suas respectivas distribuições de valor de pico de descarga atmosférica. Além disso são avaliadas as distribuições propostas pelo IEEE e pelo CIGRÉ, recomendadas por brochuras e normas de desempenho de linhas.

O objetivo deste capítulo é apresentar os principais resultados advindos de uma extensa análise de sensibilidade das distribuições de valores de pico da corrente de

descarga, da consideração dos principais tipos de torres presentes em uma linha de transmissão e da variação da altura das estruturas ao longo da linha sobre o desempenho da linha. Os desenvolvimentos seguintes correspondem, basicamente, a duas publicações do autor [101]-[102].

4.2. Efeito da representação detalhada da distribuição de torres no desempenho de linhas de transmissão

4.2.1. Estudo de caso

Para avaliar a influência de uma representação mais detalhada das geometrias das torres presentes ao longo do percurso da linha de transmissão no desempenho da LT frente a descargas atmosféricas, uma linha de 230 kV é considerada. A linha é composta por 220 torres, das quais 130 são de autoportantes (100 de suspensão e 30 de ancoragem) e 90 são torres do tipo estaiadas. Importante salientar que as geometrias modeladas e utilizadas nas simulações desenvolvidas são estruturas típicas de uma linha típica de 230 kV construída no Brasil [101].

Inicialmente, são avaliadas as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores em função da incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre considerando os três tipos de silhuetas dominantes que compõe a LT, de suspensão, ancoragem e estaiada. A seguir, avalia-se o desempenho da linha de transmissão considerando a metodologia recomendada pela literatura e a proposta nesta tese. As simulações são implementadas no ATP de acordo com o explicitado nas seções 3.2 e 3.3.

4.2.1.1. Torres da Linha de Transmissão

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam os detalhes geométricos de cada tipo de silhueta e o modelo implementado na simulação no ATP para as estruturas suspensão, ancoragem e estaiada, respectivamente. A linha possui um condutor por fase, com raio de 14,67 mm e resistência de corrente contínua de 0,0718 Ω /km, e dois cabos de blindagem, sendo um 3/8" EHS com raio de 4,57 mm e resistência em corrente contínua de 3,81 Ω /km e outro OPGW 13,4 com raio de 6,7 mm e resistência em corrente contínua de 0,6 Ω /km.

As flechas dos condutores da linha considerando os cabos fase, cabo de blindagem 3/8" EHS e cabo OPGW 13,4 respectivamente, correspondem a 18,165 m; 14,44 m; e 14,51 m para as torres de suspensão, 14,69 m, 11,37 m e 11,44 m para silhuetas de ancoragem e 18,165 m, 14,44 m e 14,51 m para estruturas do tipo estaiadas [101].

As torres de suspensão e de ancoragem, Figuras 4.1 e 4.2, são divididas em cinco seções, cada uma representada por quatro condutores. A impedância de surto de cada seção foi calculada através da metodologia de Jordan modificado proposta em [69], considerando distâncias médias entre os condutores da torre e assumindo $r = 5$ cm. Isto foi feito a fim de considerar a variação da geometria da torre ao longo do seu comprimento visto que a impedância de surto varia com a distância entre os condutores e com a altura da seção.

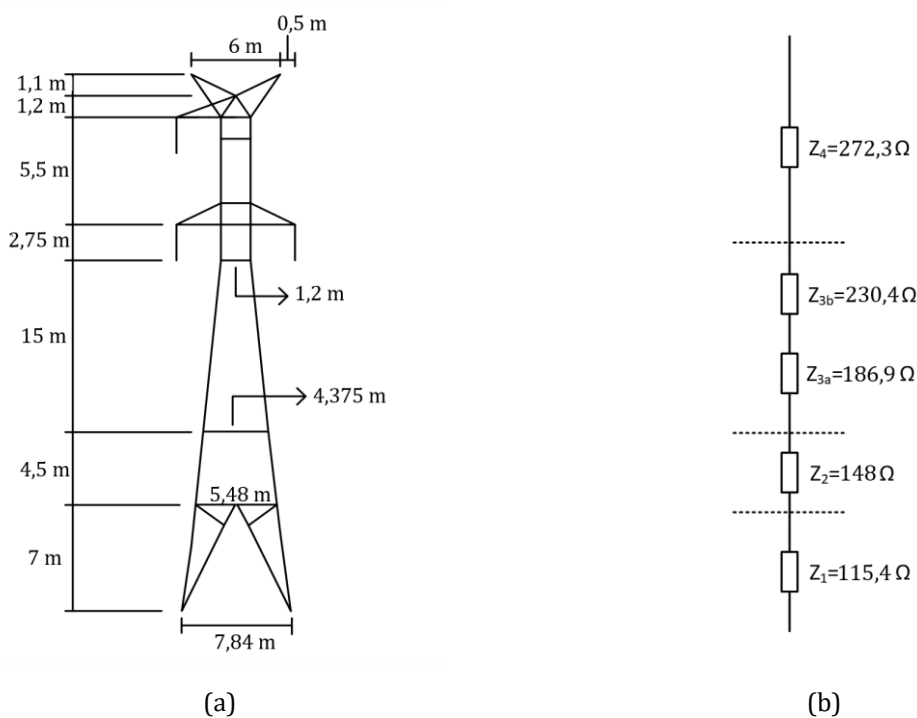


Figura 4.1 - (a) Geometria da torre de suspensão (altura torre: 37,05 m) e (b) modelo da silhueta no ATP. Adaptado de [101].

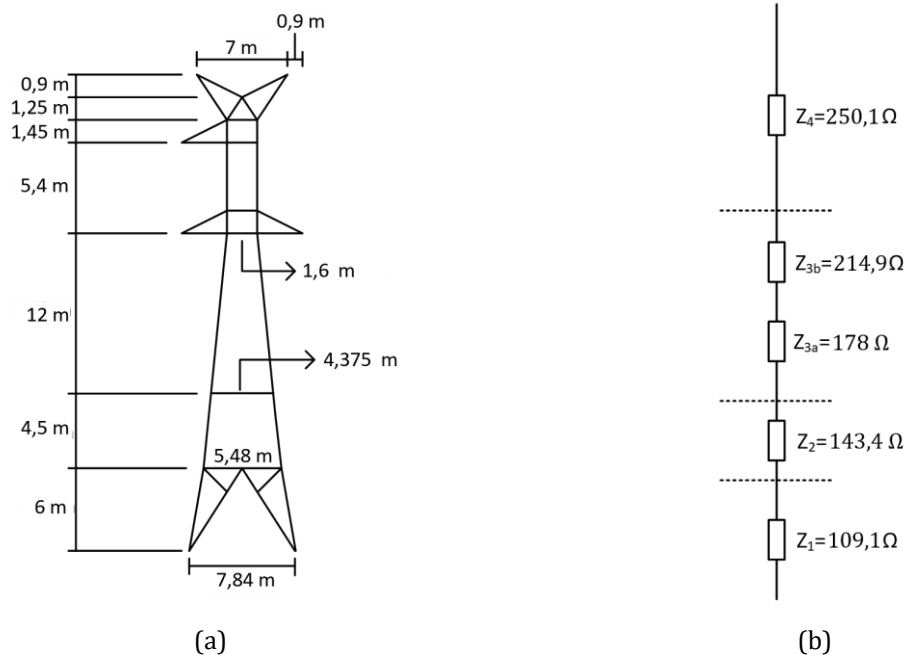


Figura 4.2 - (a) Geometria da torre ancoragem (altura torre: 31,05 m) e (b) modelo da silhueta no ATP. Adaptado de [101].

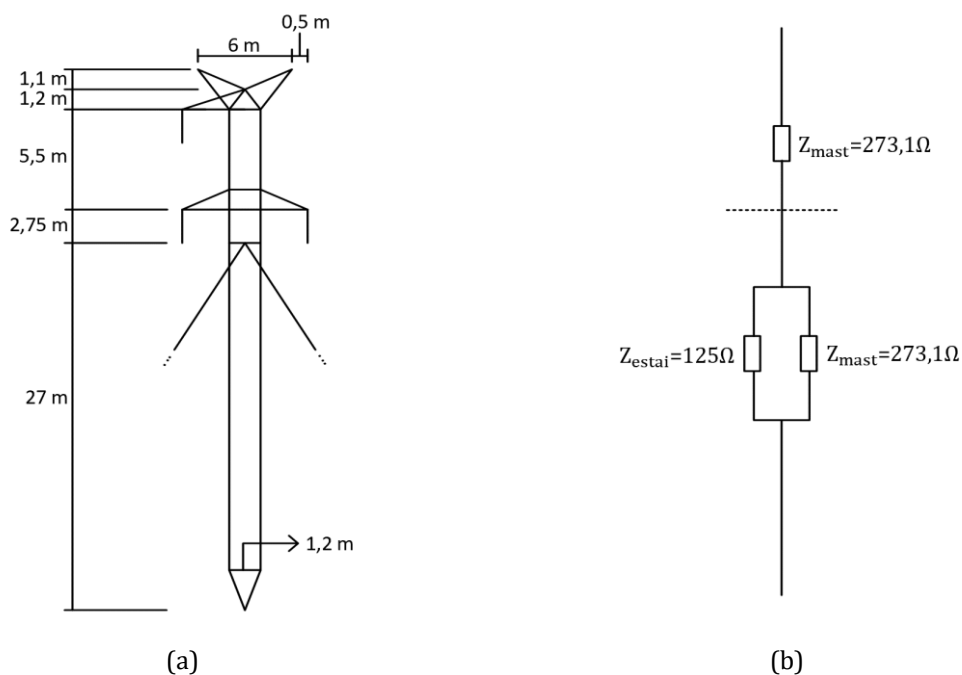


Figura 4.3 - (a) Geometria da torre estaiada (altura torre: 37,55 m) e (b) modelo da silhueta no ATP. Adaptado de [101].

A silhueta do tipo estaiada, Figura 4.3, é composta por duas partes: mastro central e os estais. O mastro foi dividido em duas seções com quatro condutores paralelos com raio de 5 cm, ambas seções tendo o mesmo valor de impedância de surto, visto que a

distância entre os condutores é basicamente a mesma ao longo de todo o mastro central. Ao todo são quatro estais de sustentação e cada um é representado como um condutor único vertical, cuja impedância de surto é calculada utilizando a expressão de Jordan revisada [69], assumindo um raio de 0,9525 cm e considerando o comprimento total do estai.

A impedância de surto equivalente dos estais é determinada dividindo-se a impedância de surto de um estai por quatro, como o recomendado em [40], considerando cada estai como condutor único e desconsiderando a presença de impedância mútua. A impedância de surto equivalente dos estais é colocada em paralelo com a impedância de surto do mastro central no ponto de conexão dos estais com o mastro, como indicado na Figura 4.3 (b). Os estais possuem um efeito geral de redução da impedância de surto equivalente da torre [40].

4.2.1.2. Impedância de aterramento da LT

Como o explicitado nos capítulos 2 e 3, a forma mais precisa de se representar o comportamento do sistema de aterramento frente a descargas atmosféricas é através da impedância harmônica, $Z(\omega)$. No entanto, a sua obtenção é complexa e demanda um alto esforço computacional. A vista disso, neste trabalho a representação do sistema de aterramento de linhas de transmissão é feita através da sua impedância impulsiva (Z_P), visto que em linhas de transmissão sem dispositivo para-raios, Z_P leva a resultados muito próximos aos obtidos utilizando a impedância harmônica [12], [13], [19].

A impedância impulsiva pode ser facilmente estimada através do coeficiente de impulso I_C e da resistência em baixa frequência R_{BF} , $Z_P = I_C \cdot R_{BF}$. Em [81] são apresentadas expressões para estimar a impedância impulsiva para alguns arranjos e sistemas de aterramento de interesse prático, a partir do coeficiente de impulso e medições de resistência de baixa frequência tendo em consideração a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo [101]. Expressões como as apresentadas em [81] podem ser ferramentas extremamente úteis para determinação em campo de um valor de impedância impulsiva próximo ao valor real. Um valor muito mais representativo do comportamento do sistema de aterramento da torre de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

A LT é composta por 220 torres com variados valores de impedância de pé torre, visto que em função da sua extensão as estruturas são instaladas em diferentes tipos de solo. Em virtude do elevado número de estruturas é complexa e trabalhosa a avaliação do desempenho da linha considerando cada silhueta e sua respectiva impedância de pé de torre de forma individual. Como o apontado na seção 3.2, o que é usualmente recomendado por guias de desempenho de linhas de transmissão é a divisão do conjunto total de impedâncias em k grupos com N_k torres [6], [27]. Para cada grupo obtém-se o valor médio da impedância impulsiva, aos quais constituem uma distribuição de valores de Z_p . A partir dessa distribuição de impedâncias, calcula-se o desempenho da linha de transmissão considerando a metodologia proposta pela literatura (seção 3.2) empregando a distribuição apresentada na Figura 4.5 e a proposta pelo trabalho (seção 3.3) utilizando as distribuições apresentadas na Figura 4.7 [101].

A Figura 4.4 apresenta os valores de impedância impulsiva de aterramento das torres que compõe a linha de transmissão e a Figura 4.5 apresenta a distribuição de impedâncias utilizada para o cálculo do desempenho da linha de transmissão através da metodologia recomendada pela literatura, na qual considera-se somente um tipo de silhueta. Os 220 valores de impedância são ordenados em ordem crescente e divididos em dez grupos com 22 estruturas cada; os valores médios de cada grupo de silhuetas são indicados na figura.

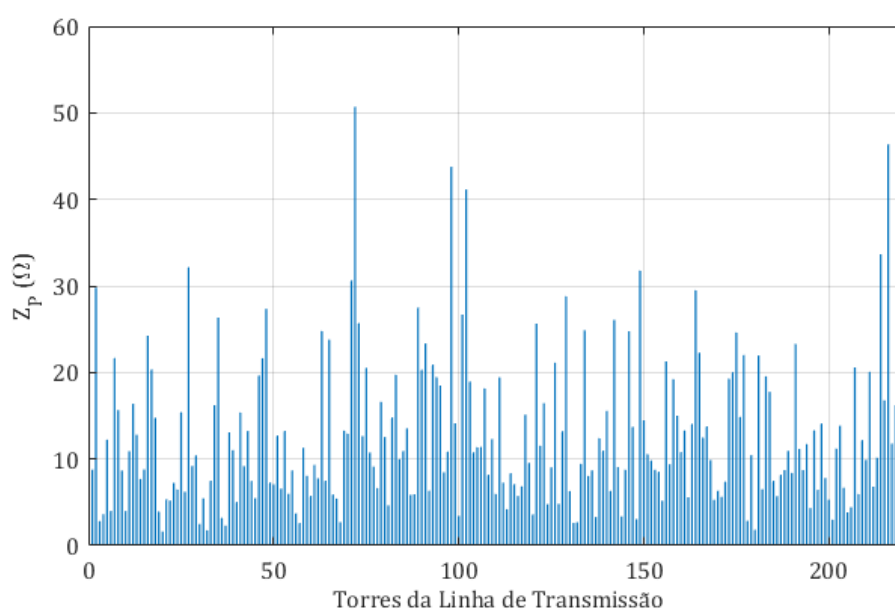


Figura 4.4 – Valores de impedância de aterramento para as torres da linha de transmissão.

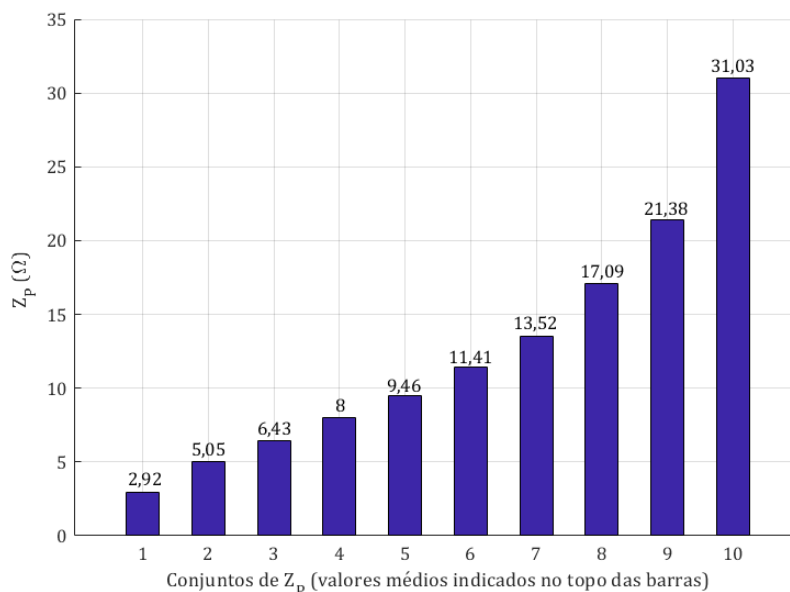
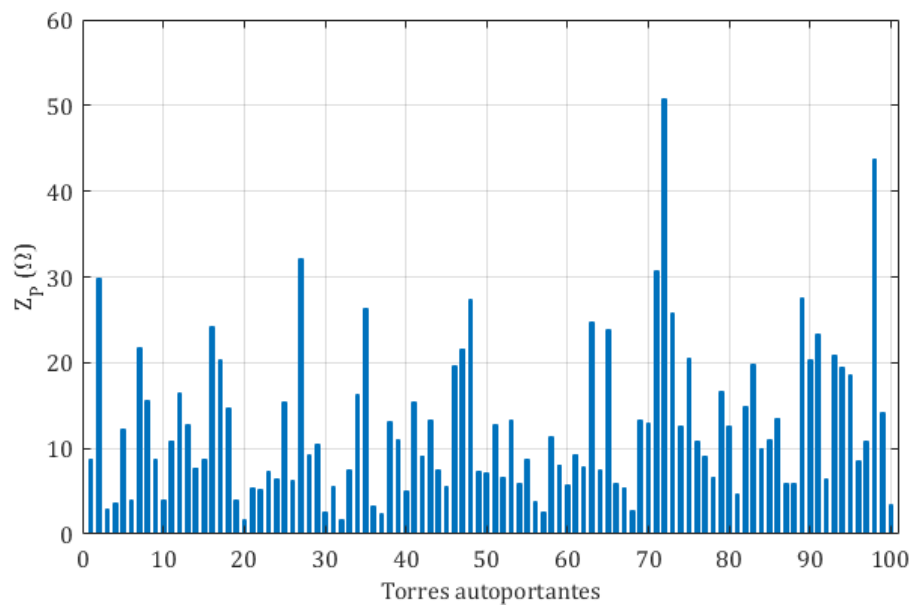
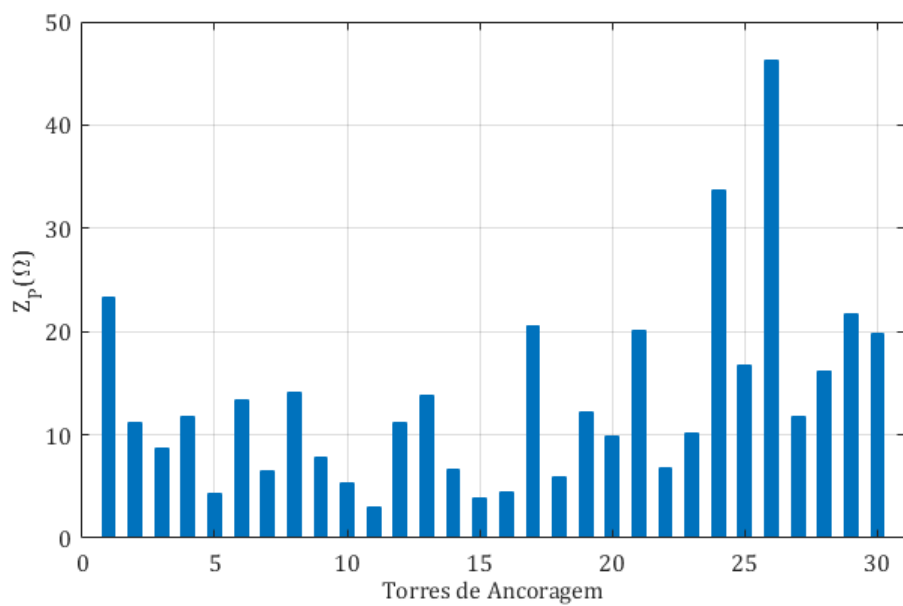


Figura 4.5 – Distribuição de impedância de pé de torre considerando a linha de transmissão inteira.

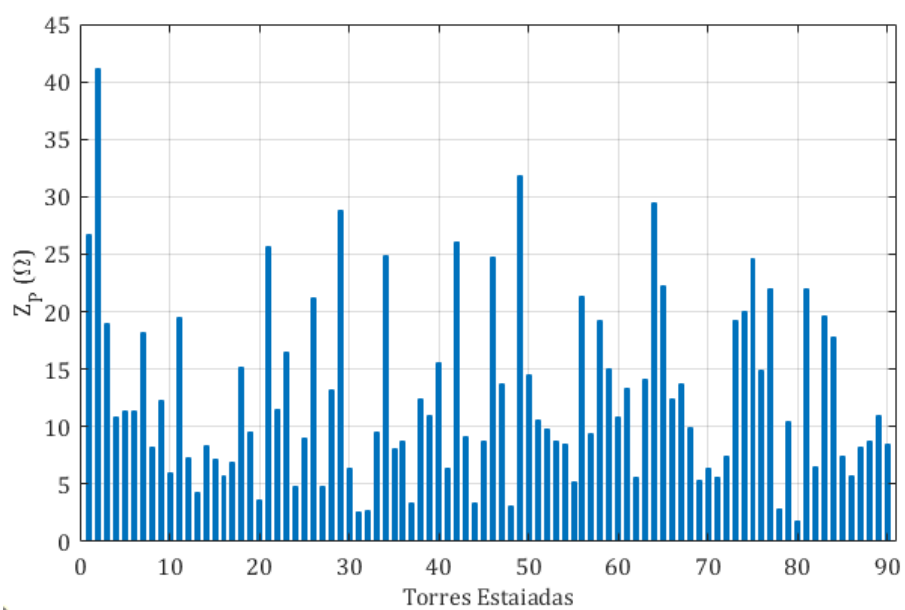
A Figura 4.6 apresenta os valores de impedância de aterramento das torres de suspensão (a), ancoragem (b) e estaiada (c). A Figura 4.7 apresenta as distribuições de impedância das torres de suspensão (a), ancoragem (b) e estaiada (c) que foram utilizadas considerando metodologia de cálculo de desempenho proposta pelo trabalho. O mesmo procedimento através do qual foram obtidos os valores de impedância de pé de torre da distribuição ilustrada na Figura 4.4 foi utilizado para a obtenção das distribuições associadas aos três tipos de silhuetas dominantes apresentadas na Figura 4.5. Cada distribuição é composta por 10 grupos com 10, 3 e 9 estruturas cada considerando as torres de suspensão, ancoragem e estaiada respectivamente .



(a)

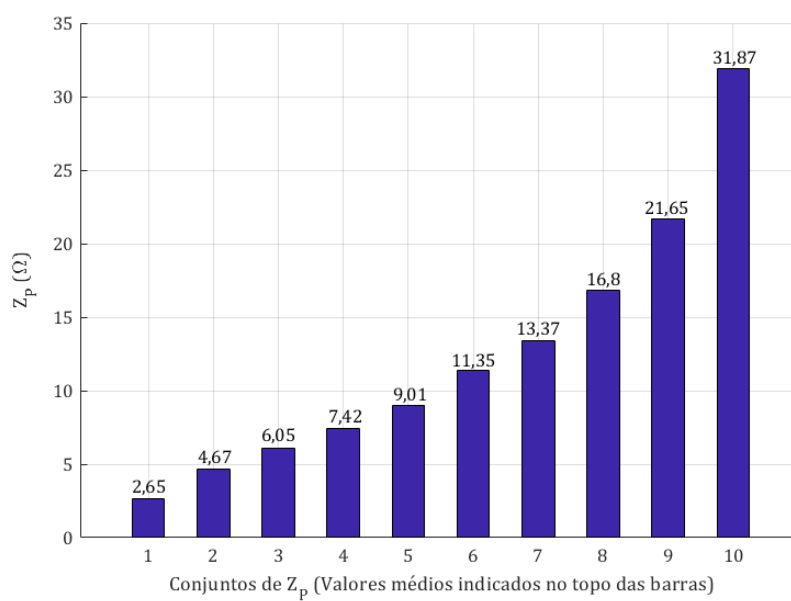


(b)

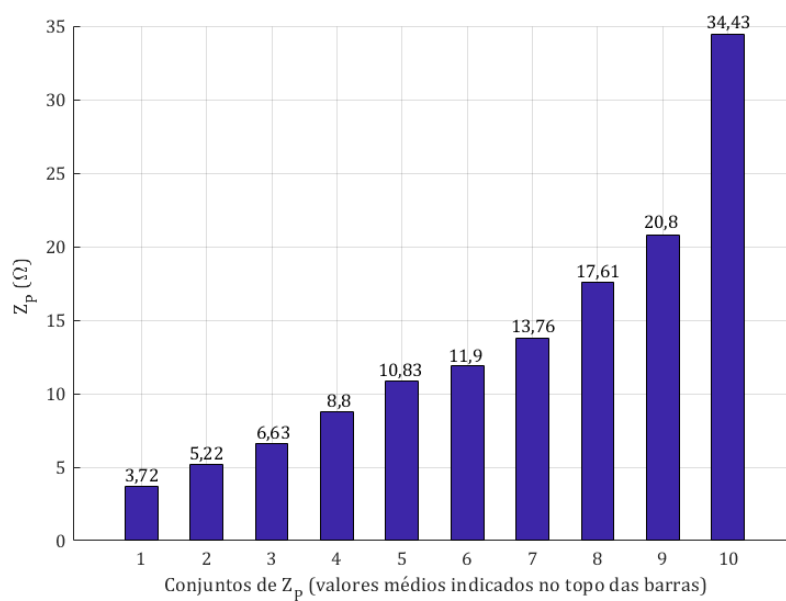


(c)

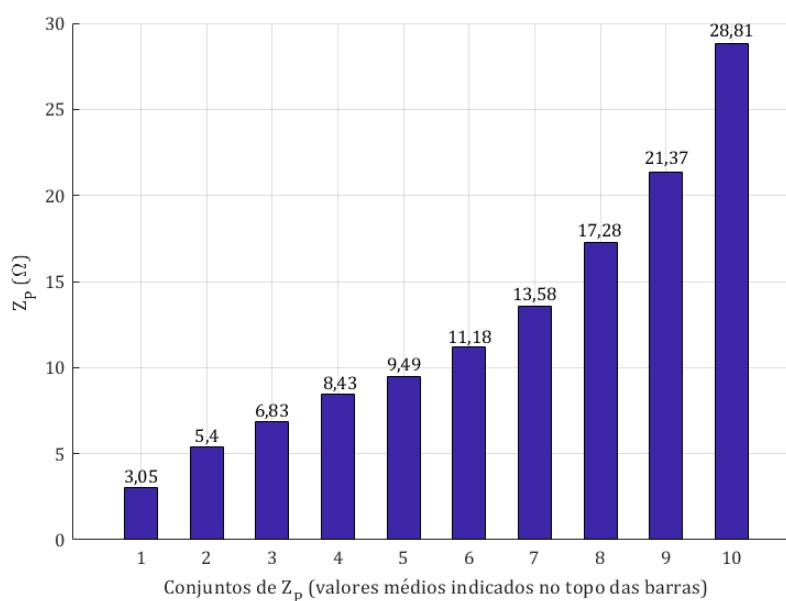
Figura 4.6 – Valores de impedância de aterramento para as torres do tipo suspensão (a), a torre de ancoragem (b) e a torre do tipo estaiada (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.7 - Distribuição de impedância de pé de torre considerando somente a torre de suspensão (a), a torre de ancoragem (b) e a torre do tipo estaiada (c).

4.2.1.3. Formas de onda de corrente

As formas de onda de corrente de descargas atmosféricas adotadas nas simulações são apresentadas na Figura 4.8 e reproduzem os principais parâmetros medianos de

correntes de primeiras descargas negativas descendentes medidas no Monte San Salvatore e no Morro do Cachimbo. As formas de onda são modeladas como soma de funções de Heidler como o detalhado em [38]. Para a curva do Monte San Salvatore, a corrente é caracterizada por um valor de pico de 31 kA e um tempo de frente virtual de 3,8 μ s. A curva associada ao Morro do Cachimbo é caracterizada por um valor de pico de 43,3 kA e um tempo de frente virtual de 4,2 μ s. Essa forma de onda foi gerada de acordo com a atualização apresentada em [23].

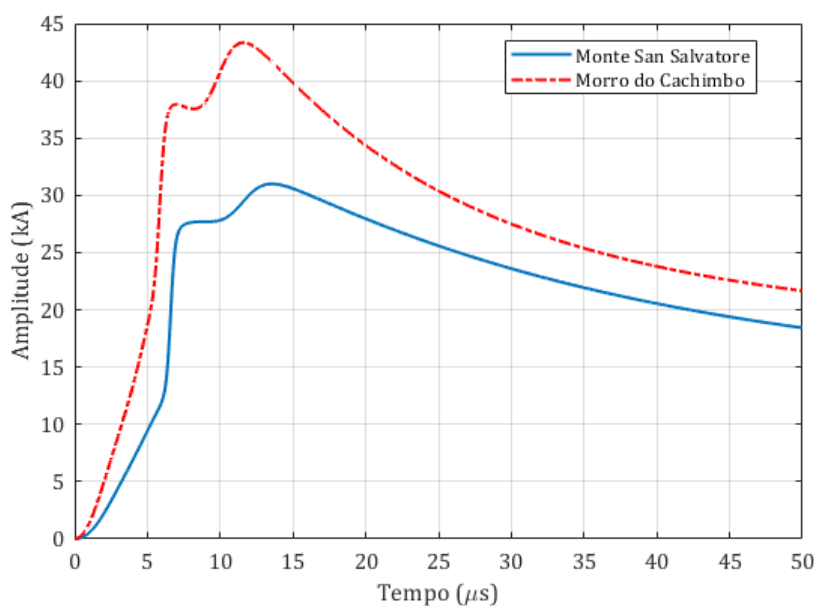


Figura 4.8 – Formas de onda representativas adotadas nas simulações.

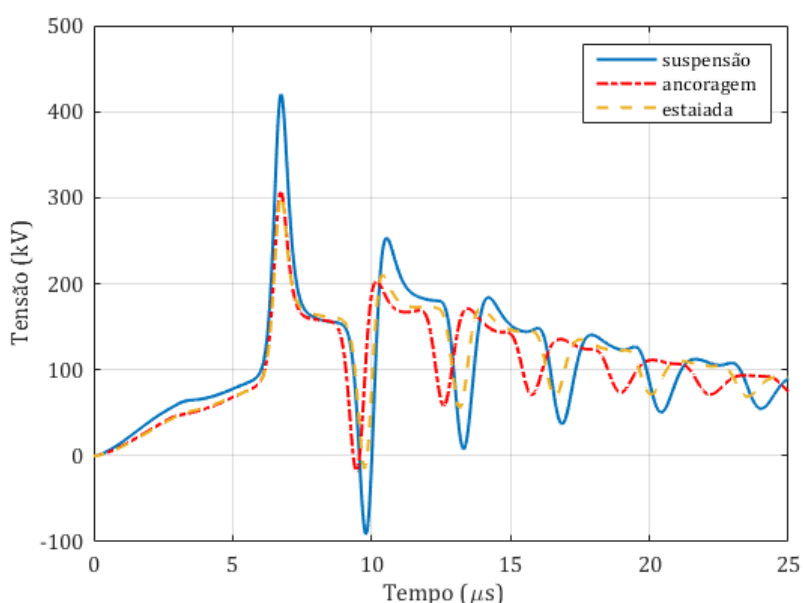
4.2.2. Sobretensões típicas na cadeia de isoladores

Estabelecidas e modeladas as geometrias das silhuetas que integram a linha de transmissão, as distribuições de impedância de pé de torre associadas a cada uma e as formas de onda de corrente a serem injetadas no sistema, obtém-se as sobretensões típicas às quais os isoladores da linha são submetidos. As simulações foram implementadas como o descrito nas seções 3.2 e 3.3 e as curvas de sobretensões foram obtidas injetando-se as formas de onda de corrente indicadas na Figura 4.8.

A Figuras 4.9 e 4.10 retratam as sobretensões às quais o isolador mais baixo e à esquerda de cada estrutura é submetido em função da incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre. São considerados os três tipos de torres dominantes da linha

de 230 kV em análise (suspensão, ancoragem e estaiada) e as impedâncias impulsivas de pé de torre de 10 Ω , 20 Ω e 40 Ω . As fases inferiores da linha são expostas a condições mais severas de sobretensão, resultando em maiores efeitos disruptivos em seus isoladores em comparação aos efeitos disruptivos em isoladores instalados mais acima na torre de transmissão. É importante destacar aqui que todas as sobretensões, em todas as fases, foram analisadas, no entanto, optou-se por apresentar somente as sobretensões obtidas no isolador de uma das fases inferiores da linha, visto que essas são as mais críticas para o desempenho da LT tendo em vista o fenômeno do *backflashover*.

Como pode ser observado nas Figuras 4.9 e 4.10, as silhuetas de suspensão possuem os maiores valores de pico de sobretensão em comparação com as estruturas estaiadas e de ancoragem que possuem valores de pico de sobretensão similares. A torre de suspensão possui um maior valor de impedância de surto equivalente e isso resulta em maiores valores de sobretensão. É importante salientar que a torre de ancoragem possui valores de altura e comprimento do vão menores em comparação aos outros tipos de torre, como o mencionado na seção 3.2. Essa característica favorece o efeito benéfico das ondas refletidas advindas do sistema de aterramento e de torres adjacentes que atingem o topo da estrutura em um tempo menor em comparação com as outras silhuetas, resultando nos menores valores de sobretensão obtidos nesse tipo de torre. Esse fato impacta diretamente no número de desligamentos da linha em função de *backflashover* e no desempenho da LT como um todo [101].



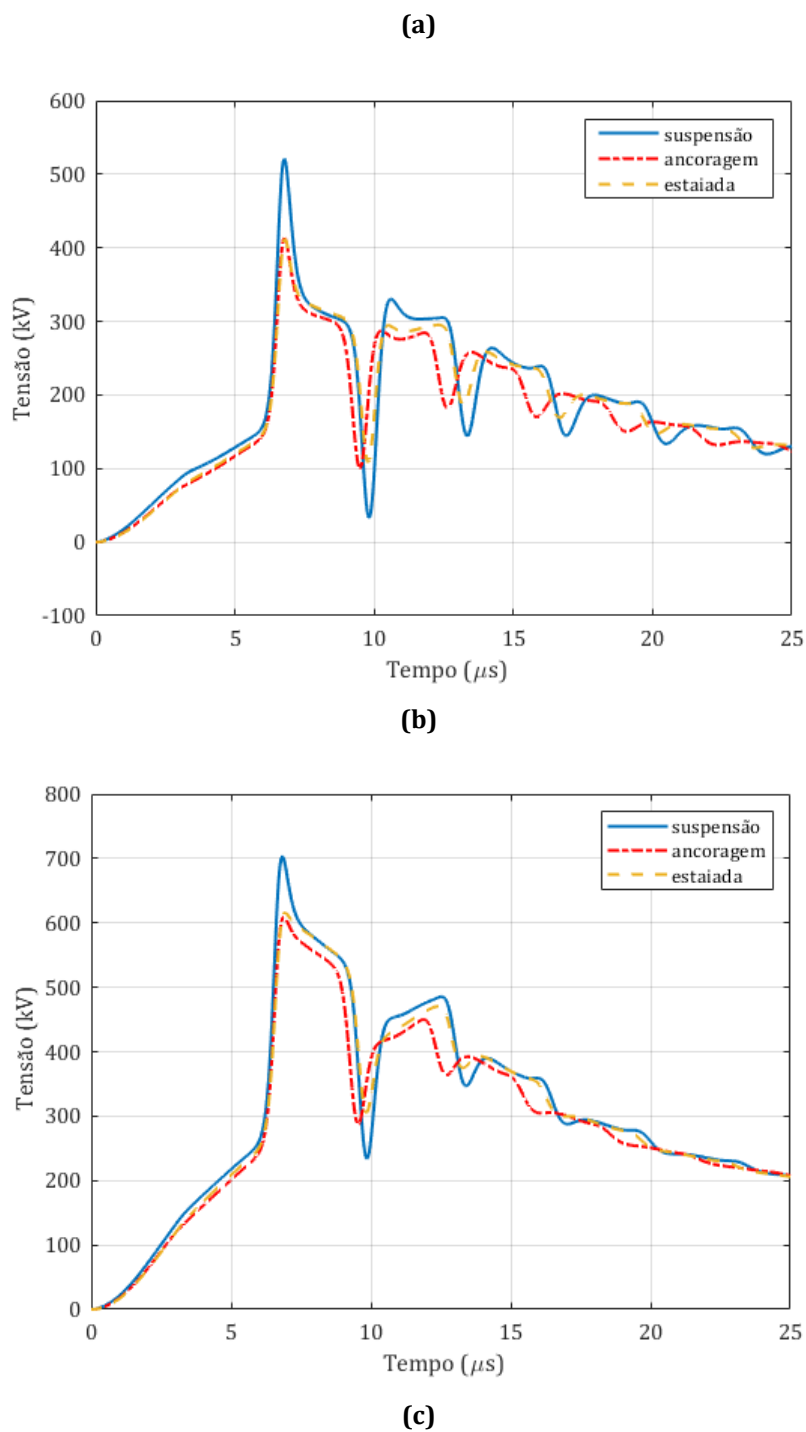
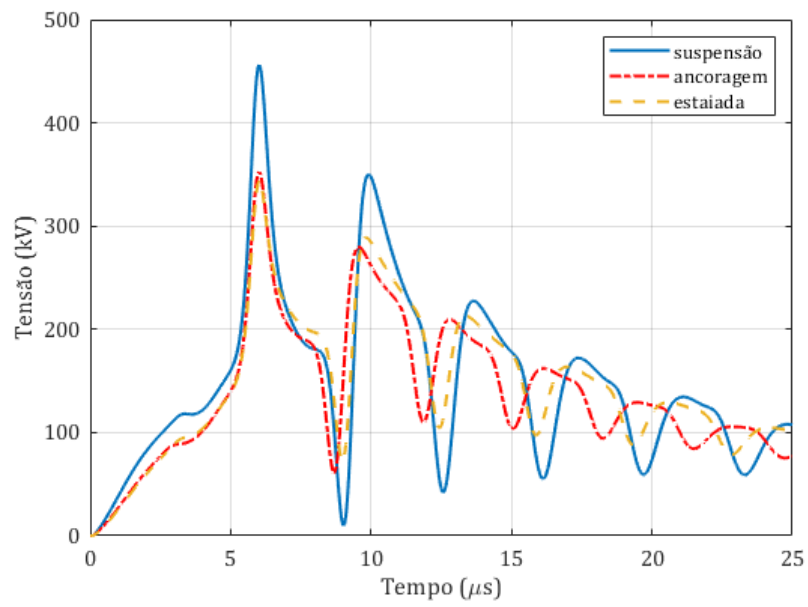
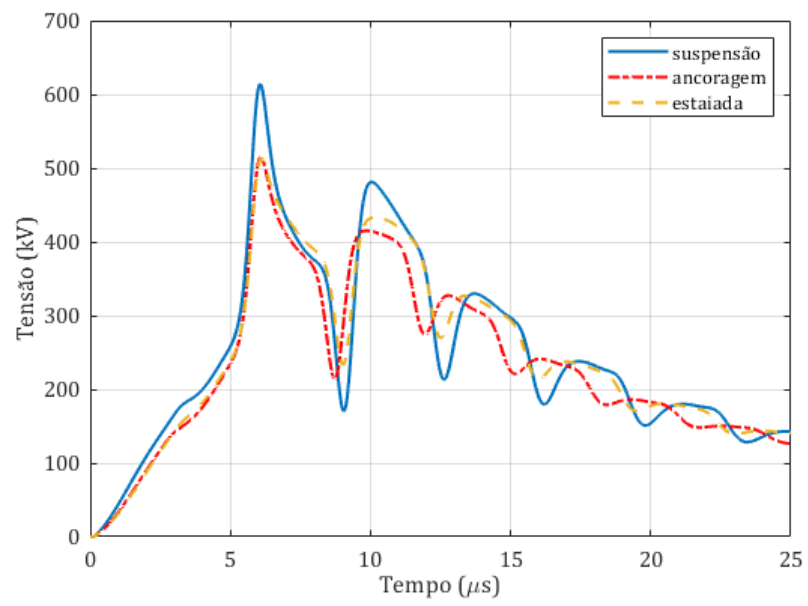


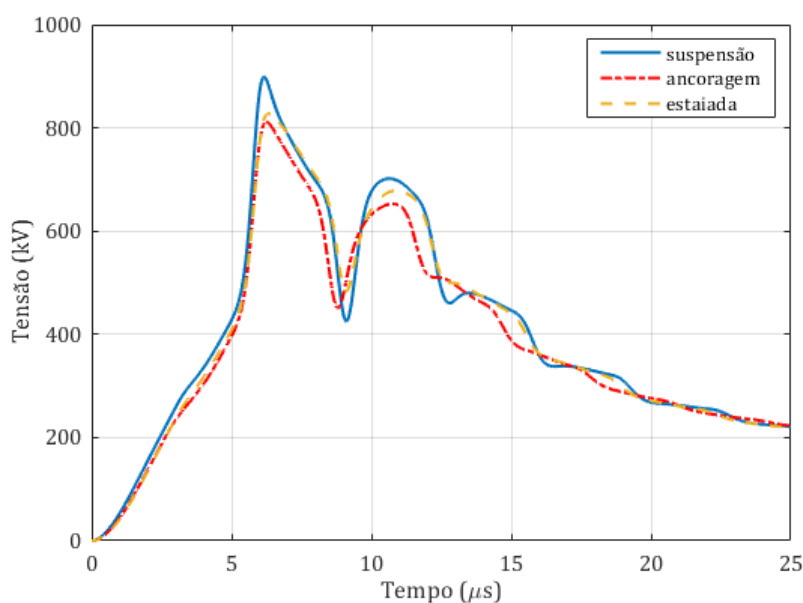
Figura 4.9 – Sobretensões através do isolador da linha mais baixo localizado a esquerda nas torres da LT, considerando as três torres típicas da linha de 230 kV, considerando a forma de onda representativa do Monte San Salvatore e assumindo valores de impedância de pé de torre de 10 Ω (a), 20 Ω (b) e 40 Ω (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.10 - Sobretensões através do isolador da linha mais baixo localizado a esquerda nas torres da LT, considerando as três torres típicas da linha de 230 kV, considerando a forma de onda representativa do Morro do Cachimbo e assumindo valores de impedância de pé de torre de 10 Ω (a), 20 Ω (b) e 40 Ω (c).

Um fato importante a ser ressaltado é a redução das diferenças entre as curvas de sobretensão à medida que o valor da impedância de pé de torre aumenta. Isso ocorre devido ao fato de a impedância de pé de torre se tornar um fator mais relevante na determinação da sobretensão através dos isoladores da linha à medida que os valores de Z_p crescem. Todas as observações explicitadas são válidas tanto para as sobretensões obtidas considerando-se ondas representativas de primeiras descargas do Monte San Salvatore como as obtidas a partir das formas de onda de corrente representativas das medições realizadas na torre instrumentada do Morro do Cachimbo.

Tendo em vista as curvas de sobretensão apresentadas nas Figuras 4.9 e 4.10, foram calculados os valores de corrente crítica (I_c) para os três tipos de torre presentes na linha de transmissão, para cada valor de impedância (10, 20 e 40 Ω) e considerando as formas de onda de corrente do Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 juntamente com as probabilidades de a corrente de descarga exceder os valores críticos (eventos capazes de levar a linha ao *backflashover*). Nessas tabelas, Δ indica as diferenças entre as probabilidades obtidas para torres do tipo estaiada e de ancoragem em comparação com

a silhueta de suspensão. A metodologia utilizada para cálculo do valor das correntes críticas foi o Método do Efeito Disruptivo. Para cada forma de onda foram calculados o efeito disruptivo e a corrente crítica associada a esse efeito e responsável pela falha do isolamento da linha. Nas seções a seguir serão apresentados gráficos elaborados em função do efeito disruptivo para cada forma de onda de sobretensão.

Tabela 4.1 - Correntes críticas para as silhuetas típicas da linha de 230 kV considerando a forma de onda representativa e a distribuição de valores de pico de corrente de descarga atmosférica associadas ao Monte San Salvatore.

$Z_p(\Omega)$	Suspensão		Estaiada			Ancoragem		
	I_c (kA)	$P(I > I_c)$	I_c (kA)	$P(I > I_c)$	$\Delta(\%)$	I_c (kA)	$P(I > I_c)$	$\Delta(\%)$
10	153	1,56	173	1,13	-27,6	178	1,05	-32,7
20	100	4,56	105	3,98	-12,7	110	3,56	-21,9
40	63	13,67	65	12,94	-5,34	68	11,57	-15,4

Tabela 4.2 - Correntes críticas para as silhuetas típicas da linha de 230 kV considerando a forma de onda representativa e a distribuição de valores de pico de corrente de descarga atmosférica associadas ao Morro do Cachimbo.

$Z_p (\Omega)$	Suspensão		Estaiada			Ancoragem		
	I_c (kA)	$P(I > I_c)$	I_c (kA)	$P(I > I_c)$	$\Delta(\%)$	I_c (kA)	$P(I > I_c)$	$\Delta(\%)$
10	164	0,63	184	0,41	-34,9	190	0,36	-42,8
20	105	3,35	110	2,86	-14,6	115	2,41	-28,0
40	65	17,76	66	16,74	-5,74	70	14,19	-20,1

Analisando as tabelas, é possível observar decréscimos da ordem de 5% a 27% e de 15% a 32% para silhuetas do tipo estaiada e de ancoragem respectivamente, considerando ondas de corrente do Monte San Salvatore. Para correntes críticas obtidas a partir de sobretensões associadas de onda de corrente do Morro do Cachimbo são observados decréscimos da ordem de 5% a 34% e de 20% a 42% para estruturas do tipo estaiada e de ancoragem respectivamente. As diferenças observadas entre as probabilidades da corrente ser excedida para cada tipo de torre causam impactos no desempenho da linha de transmissão, dependendo da distribuição de torres considerada (número de estruturas de cada tipo de torre) e da metodologia de cálculo empregada, recomendada pela literatura (seção 3.2) ou a proposta (seção 3.3).

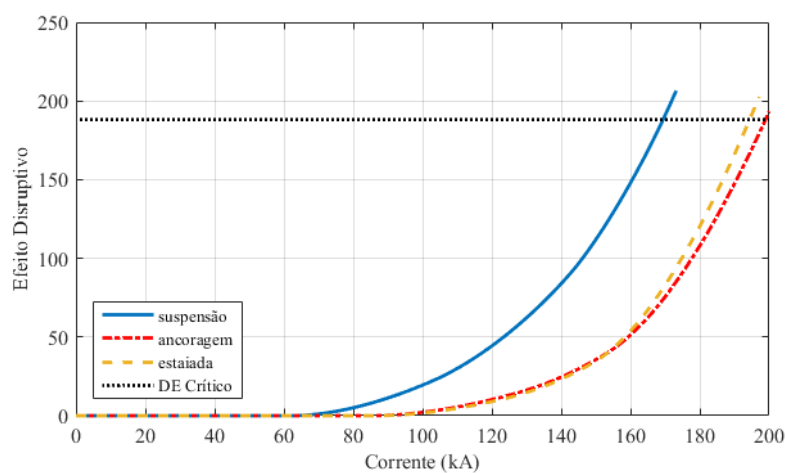
4.2.3. Efeito disruptivo associado

As ondas de sobretensão impactam diretamente o desempenho das linhas de transmissão, uma vez que podem acarretar a disrupção da cadeia de isoladores. É fundamental um critério de avaliação do potencial de falha do isolamento de uma linha em virtude da sobretensão.

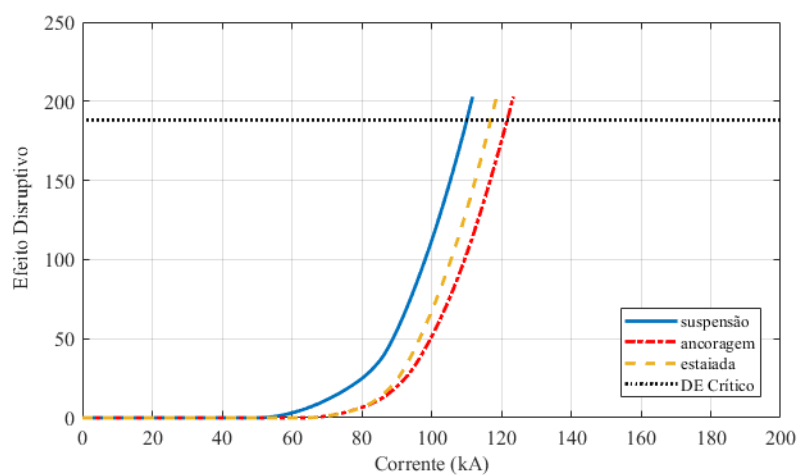
As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os efeitos disruptivos observados na fase inferior esquerda nos três tipos de silhuetas analisadas, considerando os valores de 10 Ω , 20 Ω e 40 Ω para a impedância de pé de torre e ondas de corrente representativas do Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo, respectivamente.

A linha horizontal tracejada corresponde ao efeito disruptivo crítico dos isoladores da LT considerando um valor de CFO de 1095 kV para a linha de transmissão. Comparando-se os dados apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 com as curvas apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12 é possível observar que as correntes críticas obtidas correspondem aos menores valores de corrente capazes de provocar efeitos disruptivos acima do valor crítico, levando a disrupção dos isoladores da linha.

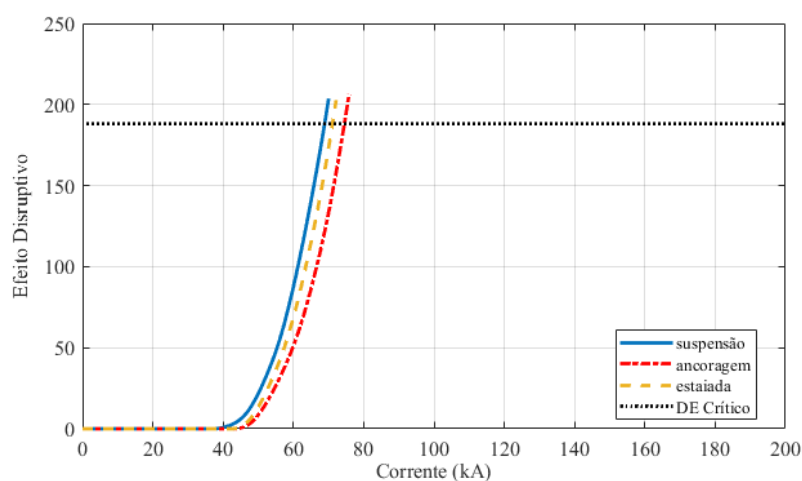
Assim como o observado para as curvas de sobretensão, as sobretensões associadas às torres de suspensão apresentam um maior efeito disruptivo em comparação com as silhuetas de ancoragem e estaiada. Outra similaridade reside no fato de que as diferenças observadas entre as curvas de efeito disruptivo diminuem à medida que a impedância de aterramento da torre aumenta. Isso ocorre por que, à medida que o valor da impedância de aterramento aumenta, ela tem um papel maior na determinação da sobretensão através dos isoladores, e conseqüentemente no efeito disruptivo e na obtenção da corrente crítica, visto que o valor de I_c tende a ficar próximo para as três silhuetas, como pode ser observado nas Tabelas 4.1 e 4.2.



(a)

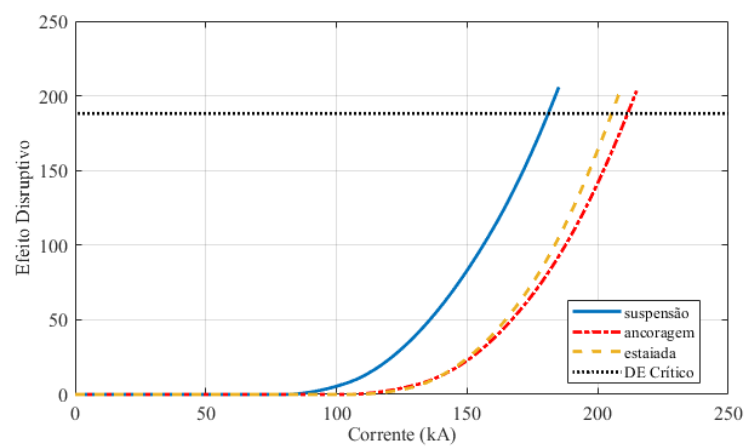


(b)

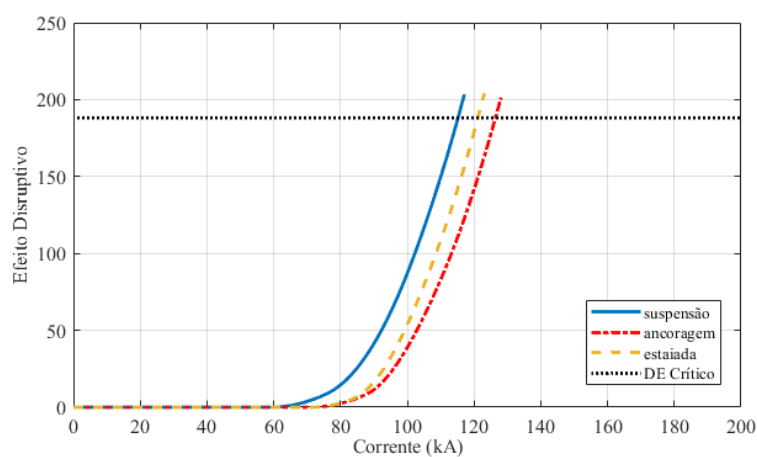


(c)

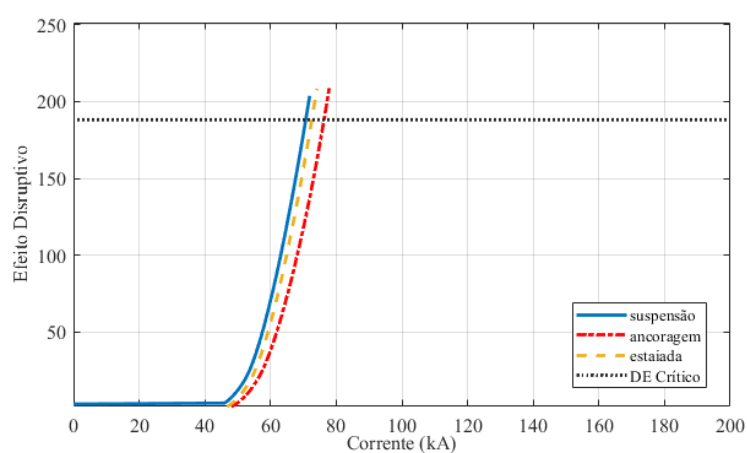
Figura 4.11 – Efeito disruptivo considerando a forma de onda representativa do Monte San Salvatore e as silhuetas de suspensão, ancoragem e estaiada para $Z_p = 10 \Omega$ (a), $Z_p = 20 \Omega$ (b) e $Z_p = 40 \Omega$ (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.12 - Efeito disruptivo considerando a forma de onda representativa do Morro do Cachimbo e as silhuetas de suspensão, ancoragem e estaiada para $Z_p = 10 \Omega$ (a), $Z_p = 20 \Omega$ (b) e $Z_p = 40 \Omega$ (c).

4.2.4. Taxa de *backflashover* da LT

A taxa de desligamentos da linha em função do *backflashover* foi calculada aplicando-se a metodologia convencional e a metodologia proposta descritas nas seções 3.2 e 3.3, respectivamente, e considerando as ondas representativas de descargas do Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo. A tabela 4.3 resume os dados obtidos assumindo uma densidade de descargas para o solo (N_g) de 5 descargas/ km^2 /ano. É importante salientar que os números de descargas incidentes sobre a linha foram calculados segundo as recomendações de brochuras e normas, variando-se apenas a consideração das geometrias, metodologia recomendada pela literatura (1 única torre representativa da LT) versus metodologia proposta (consideração de três estruturas representativas da LT, torres de suspensão, estaiadas e de ancoragem).

Tabela 4. 3 Taxa de *backflashover* considerando a metodologia convencional e proposta para correntes do Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo.

	Monte San Salvatore	Morro do Cachimbo
Suspensão	2,05	1,53
Estaiadas	1,64	1,16
Ancoragem	1,53	1,15
Metodologia Proposta	1,81	1,33
Metodologia recomendada pela literatura	2,04	1,49

As taxas de desligamento devido a *backflashover* obtidas para cada grupo de silhuetas típicas, ou dominantes, estão de acordo com os resultados esperados e o desenvolvido em trabalhos anteriores. As torres de ancoragem possuem a menor taxa de desligamentos, seguidas pelo grupo de silhuetas estaiadas e, finalmente, o grupo relativo a torres de suspensão possui o maior valor de *backflashover*; tanto para ondas representativas do Monte San Salvatore como do Morro do Cachimbo.

De acordo com a Tabela 4.3, a taxa de desligamentos da linha de transmissão estimada pela metodologia proposta são aproximadamente 11,3% e 10,8% menores do que a taxa estimada pela metodologia convencional, para Monte San Salvatore e Morro do

Cachimbo respectivamente. A menor taxa de desligamentos obtida pela metodologia proposta ocorre devido ao melhor desempenho dos grupos de estrutura associados a torres de ancoragem e estaiadas, em comparação com o grupo de silhuetas de suspensão, que é a estrutura considerada como a única silhueta dominante pela metodologia convencional.

É importante enfatizar que as diferenças obtidas entre as duas metodologias (11,3% e 10,8%) é considerável, sendo, por exemplo, da mesma ordem ou magnitude do que a diferença obtida em [104]-[105] para a taxa de desligamentos por *backflashover* considerando ou desconsiderando a dependência da frequência dos parâmetros do solo. Para o estudo de caso sob análise neste trabalho, o uso da metodologia recomendada pela literatura leva a resultados conservativos em termos de taxa de desligamento da linha. No entanto, dependendo da distribuição de torres ao longo do percurso da linha de transmissão, assim como da distribuição de impedâncias de pé de torre, um melhor desempenho da LT pode ser estimado através da metodologia recomendada pela literatura e guias de cálculo de desempenho. Uma distribuição detalhada da distribuição de torres da linha de transmissão permite a identificação de trechos críticos que podem contribuir de maneira significativa para o desempenho da linha inteira, permitindo a implementação de medidas de proteção de maneira mais eficiente e incisiva.

A onda representativa das descargas atmosféricas medidas no Morro do Cachimbo possui um valor de pico aproximadamente 40% maior, 43,3 kA, que o valor de pico da onda representativa do Monte San Salvatore, 31 kA, submetendo os isoladores da linha de transmissão a valores mais elevados de sobretensão, como pode ser observado nas Figuras 4.7 e 4.8. No entanto, as taxas de desligamentos apresentadas na Tabela 4.4 (Morro do Cachimbo) possuem valores menores do que as apresentadas na Tabela 4.3 (Monte San Salvatore). Um estudo a respeito desse fato será desenvolvido na seção 4.4.

4.3. A influência da variação da altura das torres ao longo da linha de transmissão na taxa de desligamentos de LTs

4.3.1. Estudo de Caso

Para avaliar a influência da variação da altura das torres ao longo da linha de transmissão no desempenho da LT frente a descargas atmosféricas, uma linha de 230 kV é considerada. São avaliados dois tipos de estruturas comumente utilizadas em linhas de transmissão, torres autoportantes de suspensão e torres estaiadas. O objetivo é avaliar a influência da variação de altura em diferentes geometrias de torre em linhas. As estruturas selecionadas possuem geometrias bastante distintas, estaiadas e autoportantes de suspensão. As estruturas de ancoragem não são consideradas em função do menor número de estruturas ao longo da linha e menores valores de altura das geometrias sendo estatisticamente menos significativas para cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas [102].

Inicialmente, são avaliadas as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores em função da incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre considerando os dois tipos de silhueta. São considerados nove valores de altura para cada tipo de torre, totalizando dezoito modelos diferentes de estrutura modelados. As alturas selecionadas levam em consideração diferentes dimensões de pés de torre possíveis para torres autoportantes de suspensão e estaiadas e considerando estruturas típicas de uma linha de 230 kV.

As alturas foram selecionadas com base em projetos de torres utilizadas em linhas de transmissão reais. Foram avaliadas as sobretensões resultantes em função da incidência de descargas atmosféricas para cada um dos dezoito modelos construídos. A seguir, avalia-se o desempenho da linha de transmissão considerando a metodologia recomendada pela literatura detalhada no Capítulo 3. A fim de se avaliar exclusivamente a influência da altura adotou-se a metodologia de cálculo de taxa de desligamento por backflashover comumente proposto por normas e brochuras e que considera somente uma estrutura como dominante e representante de toda a LT. Essa metodologia é apresentada e as simulações são implementadas no ATP de acordo com o explicitado nas seções 3.2 e 3.4.

4.3.1.1. Torres da Linha de Transmissão

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os detalhes da geometria da torre autoportante de suspensão e da torre estaiada correspondentes a uma linha típica de 230 kV utilizada nas

simulações. Os detalhes e dados referentes às estruturas são apresentados em detalhes anteriormente na seção 4.2.1.1.

A variação da altura da torre foi implementada através da variação da altura do pé de torre de acordo com valores de comprimento e extensões disponíveis para as geometrias apresentadas. Para cada valor de altura de pé de torre e a respectiva altura total da estrutura, as impedâncias de surto de cada segmento da torre estaiada e da torre autoportante de suspensão ($Z_1, Z_2, Z_{3a}, Z_{3b}, Z_4, Z_{mast}$ e Z_{eqGuy}) foram calculadas utilizando as fórmulas revisadas de Jordan. Para cada valor de altura, os respectivos valores de vãos e flechas dos cabos condutores e de blindagem foram calculados considerando as alturas mínimas cabo-solo recomendadas por brochuras e normas, importante ressaltar que essa altura mínima varia de acordo com o nível de tensão da linha de transmissão. Também são utilizadas fórmulas, recomendadas pela literatura, que consideram as características físicas dos cabos para cálculo da flecha e do vão entre estruturas da LT. Um total de nove valores de altura foram considerados.

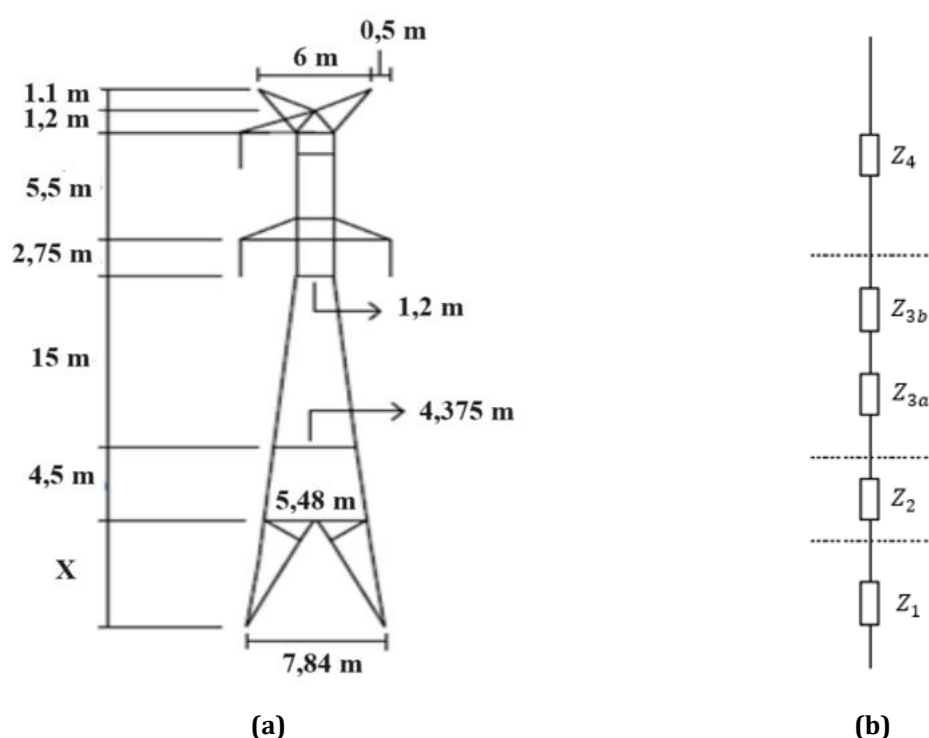


Figura 4.13 - (a) Geometria da torre autoportante de suspensão (b) Modelo da torre no ATP.

As simulações foram realizadas para cada altura com os respectivos valores de impedância de surto de cada trecho da estrutura. Os nove valores considerados para X

variaram de 1 a 13 metros com alturas variando de 31,0 de 43,0 m para torres autoportantes. Para as torres estaiadas, os valores de x variaram entre 21 e 33 m com alturas totais da torre variando de 31,5 a 43,5 m.

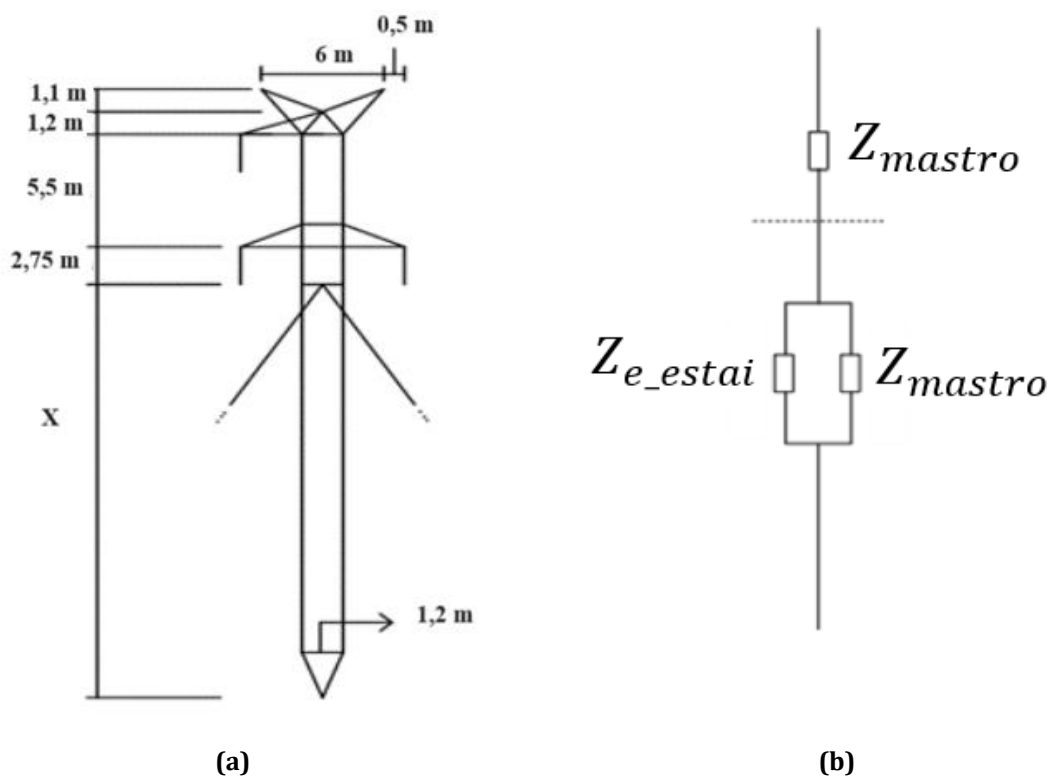


Figura 4.14 - (a) Geometria da torre estaiada (b) Modelo da torre no ATP.

4.3.1.2. Impedância de aterramento da LT

Neste trabalho a representação do sistema de aterramento de linhas de transmissão foi feita através da sua impedância impulsiva (Z_p), visto que em linhas de transmissão sem dispositivo para-raios, Z_p leva a resultados muito próximos aos obtidos utilizando a impedância harmônica [12], [13], [19]. A impedância impulsiva é representada conforme o indicado na seção 4.2.1.2.

Foi considerada uma linha de transmissão com 220 estruturas. Os valores Z_p foram ordenados em ordem ascendente e divididos em 10 grupos, cada um contendo 22 estruturas. Valores médios de impedância foram calculados para cada um dos 10 grupos de valores, colocados em ordem crescente. Os valores foram os mesmos indicados na

Figura 4.5. Estes dez valores correspondem a distribuição de impedância utilizada nas simulações.

A fim de avaliar somente o efeito da variação da altura, as mesmas condições de estudo de caso foram mantidas para as duas estruturas avaliadas, a fim de que o efeito sobre o desempenho da linha pudesse ser atribuído unicamente à variação da altura das torres.

4.3.1.3. Formas de onda de corrente

As formas de onda de descarga atmosférica adotadas nas simulações são as explicitadas e detalhadas na seção 4.2.1.3 e apresentadas na Figura 4.8. As formas de onda reproduzem os principais parâmetros medianos de correntes de primeiras descargas negativas descendentes medidas no Monte San Salvatore e no Morro do Cachimbo.

A corrente de descarga foi injetada no topo de uma torre central. A fim de considerar o efeito das reflexões em torres adjacentes e o efeito de propagação das sobretensões ao longo das alinhas dos condutores, um par de torres adjacentes a atingida, e idêntica a ela, foi incluída nas simulações. O final da linha é perfeitamente casado em todo o espectro de frequência utilizando linhas eletricamente “infinitas”.

4.3.2. Taxa de backflashover da LT

Para cada valor de impedância impulsiva utilizada, as sobretensões de origem atmosférica através dos isoladores são obtidas. Depois de obtidas as ondas de sobretensão às quais os isoladores da linha de transmissão são submetidos, a corrente crítica foi determinada através da aplicação do Método DE assumindo com CFO = 1095 kV. A taxa de desligamentos da linha em função do *backflashover* foi calculada aplicando-se a metodologia descrita na seção 3.2.

As Tabelas 4.4 e 4.5 resumem os resultados obtidos assumindo $N_g = 1$ descarga/ km^2 /ano e considerando torres autoportantes de suspensão e estaiadas. As taxas de backflashover são apresentadas considerando as distribuições associadas com

as medições realizadas no Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo através das equações e parâmetros apresentados em [6] e [50].

Tabela 4.4 - Taxa de desligamento da torre autoportante de suspensão.

BFR (Backflashover/100km/ano)		
Altura (m)	MSS (IEEE)	MCS
31.0	0.36	0.25
32.5	0.39	0.27
34.0	0.42	0.30
35.5	0.45	0.32
37.0	0.48	0.34
38.5	0.51	0.37
40.0	0.55	0.39
41.5	0.59	0.42
43.0	0.63	0.45

Tabela 4.5 - Taxa de desligamento da torre estaiada.

BFR (Backflashover/100km/ano)		
Altura (m)	MSS (IEEE)	MCS
31.5	0.33	0.24
33.0	0.35	0.25
34.5	0.37	0.27
36.0	0.39	0.29
37.5	0.41	0.31
39.0	0.43	0.33
40.5	0.46	0.35
42.0	0.48	0.37
43.5	0.51	0.39

Observando-se a Tabela 4.5 e a Figura 4.15, é possível notar que, considerando as torres autoportantes de suspensão e as distribuições apresentadas, à medida que a altura das estruturas aumenta, as taxas de desligamentos da linha em função do backflashover aumentam. Esse comportamento já era esperado, visto que, à medida que a altura aumenta, a área de exposição da linha (W) também aumenta. Considerando a distribuição recomendada pelo IEEE (MSS (IEEE)) e a distribuição associada com Morro do Cachimbo

(MCS), é possível observar uma diferença entre o maior e o menor valor de BFR de aproximadamente 75% e 80% respectivamente [102].

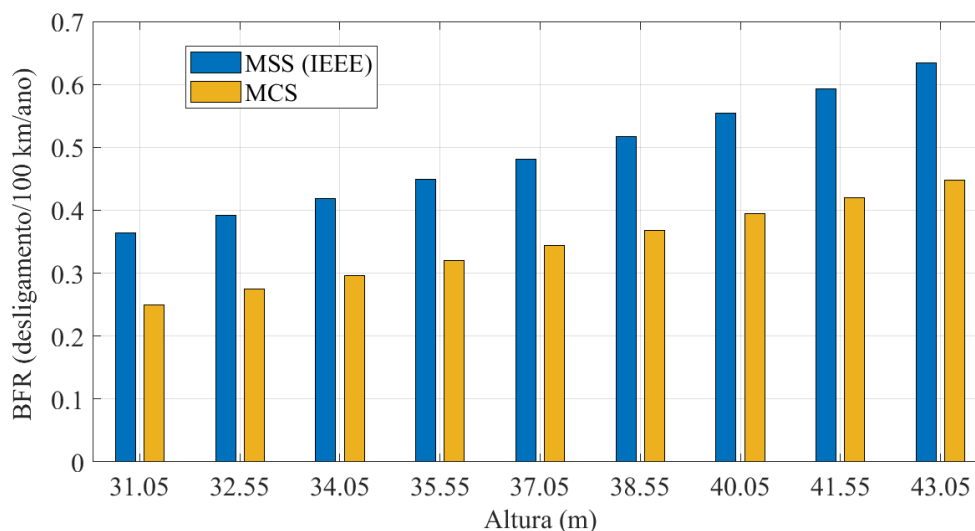


Figura 4.15 – Taxa de desligamento de torres autoportantes de suspensão.

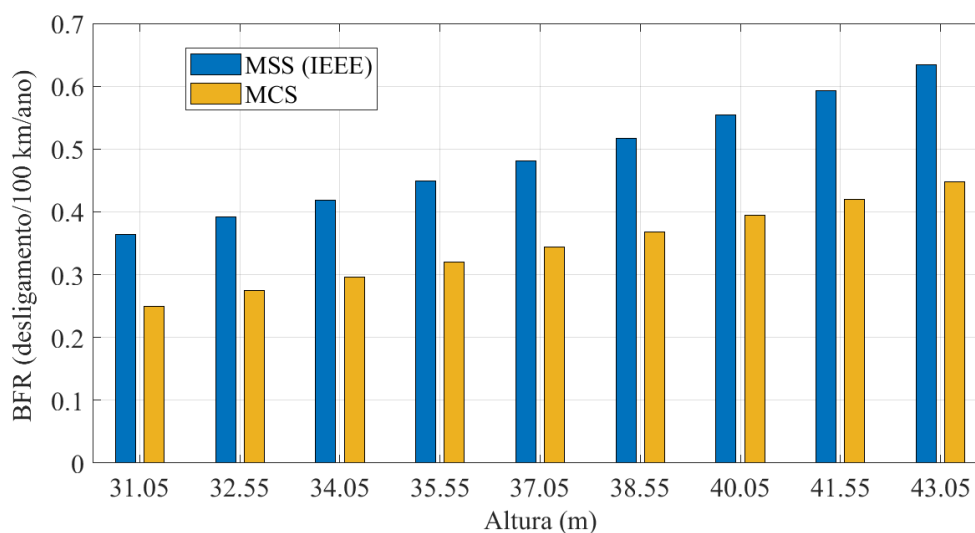


Figura 4.16 – Taxa de desligamento de torres estaiadas.

O mesmo comportamento é observado nos resultados apresentados na Tabela 4.6 e na Figura 4.16, à medida que a altura da estrutura aumenta, a taxa de desligamento em função do backflashover na linha de transmissão também aumenta. Considerando as distribuições MSS (IEEE) e MCS, é possível observar a diferença entre o maior e o menor valor de BFR de aproximadamente 55% e 67% respectivamente.

É importante ressaltar que a distribuição de probabilidade de corrente de descarga utilizada impacta diretamente a variação da taxa de *backflashover* em função da altura da torre. Para uma melhor estimativa do desempenho frente a descargas atmosféricas é muito importante escolher a distribuição de probabilidade que seja o mais representativa possível das atividades atmosféricas características da região onde a LT é instalada.

Em normas publicadas recentemente recomenda-se o uso de distribuições de probabilidade associadas com dados de medições obtidos em torres instrumentadas, em função da maior precisão e melhor caracterização advinda desses dados. Nas seções a seguir o impacto de distribuições cumulativas de corrente de descarga atmosférica no desempenho de linhas de transmissão é explicitado mais detalhadamente.

Nesse contexto, pode haver seções mais críticas que apresentem maiores valores de BFR em função da presença de estruturas com maiores valores de altura, maiores valores de densidade de descargas atmosférica para o solo, etc. Essas seções podem ser consideradas críticas e podem afetar fortemente o desempenho da linha como um todo. Em uma eventual ação para mitigar as causas dos desligamentos e melhorar o desempenho da LT, essas seções podem ser priorizadas para a aplicação de medidas de proteção tais como a instalação de para-raios e melhoria do sistema de aterramento, por exemplo, visto que essas seções podem ser decisivas para o desempenho da linha. Esse tipo de ação focada pode permitir a redução de custos e a melhoria do desempenho da linha inteira, atuando apenas em seções consideradas críticas.

4.4. Influência de diferentes distribuições do valor de pico de corrente de primeiras descargas na taxa de desligamento de LTs

A fim de se determinar o impacto da distribuição do valor de pico no valor da taxa de desligamento da linha por *backflashover*, avalia-se o desempenho da linha considerando-se as ondas de corrente representativas e suas respectivas distribuições de valor de pico associadas a medições realizadas no Monte San Salvatore², na Suíça, no Morro do Cachimbo, no Brasil, e em as medições de corrente realizadas por Takami e

² A partir deste ponto à menção a distribuição de Monte San Salvatore refere-se à distribuição recomendada pelo IEEE, a qual considera as medições realizadas por Berger em Monte San Salvatore e outras medições advindas de outras localidades. A distribuição proposta pelo IEEE é comumente denominada na literatura como distribuição representativa das medições de Monte San Salvatore.

Okabe em linhas de transmissão, no Japão [103]. Os resultados das simulações realizadas são apresentados a seguir.

4.4.1. Estudo de Caso

A fim de apresentar uma avaliação mais abrangente da influência da distribuição cumulativa de corrente adotada no desempenho da linha de transmissão, três diferentes torres de linhas de transmissão são utilizadas nas simulações considerando três níveis de tensão, 138 kV, 230 kV e 500 kV. As estruturas selecionadas para cada nível de tensão são torres tipicamente aplicadas para esses níveis e linhas de transmissão típicas.

As características dos condutores para cada linha de transmissão são indicadas na Tabela 4.6. Os comprimentos de vãos considerados são de 400 m, 450 m e 550 m para respectivamente LTs de 138 kV, 230 kV e 500 kV. As flechas dos condutores fase e dos cabos de blindagem de cada uma das linhas são indicados na legenda da Figura 4.17, para determinação desses valores foram considerados valores típicos de tensão nos cabos e os menores valores de vãos possíveis considerando as respectivas alturas mínimas cabo-solo para cada nível de tensão segundo normas e recomendações utilizadas em linhas no Brasil. Os valores de CFO considerados foram de 650 kV, 1095 kV e 1800 kV considerando linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV, respectivamente.

A fim de se avaliar somente a influência da variação das distribuições cumulativas de valor de pico de corrente de descarga atmosférica na taxa de desligamento da linha a metodologia de cálculo de desempenho de linhas de transmissão utilizada é a metodologia convencional.

Tabela 3.6 - Dados dos cabos condutores.

	Condutores Fase			Cabos de Blindagem (3/8" EHS)	
	Condutores por fase	Raio (cm)	$R_{dc}(\Omega/km)$	Raio (cm)	$R_{dc}(\Omega/km)$
138 kV	1	1,467	0,0718	0,457	3,81
230 kV	1	1,467	0,0718	0,457	3,81
500 kV	4	1,465	0,0711	0,457	3,81

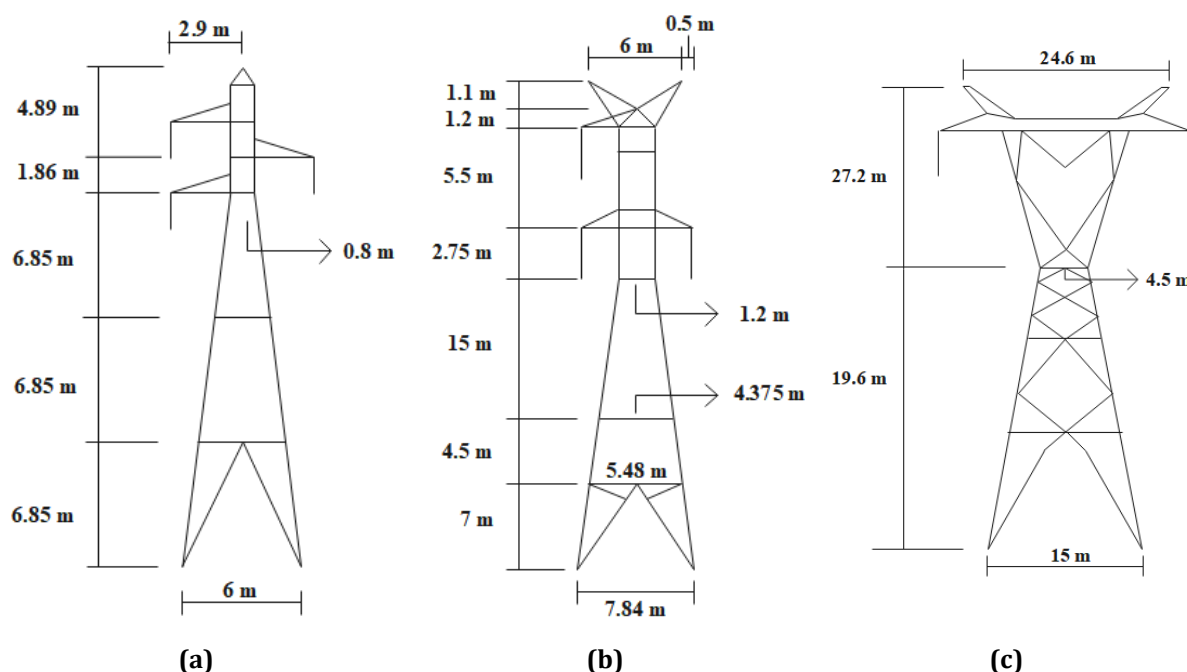


Figura 4.17 - (a) Geometria da torre de 138 kV, as flechas dos cabos fase e de blindagem são respectivamente 11,20 m e 7,2 m e altura da torre equivalente a 27,3 m (b) Geometria da torre de 230 kV, as flechas dos cabos fase e de blindagem são respectivamente 18,165 m e 14,44 m e altura da torre equivalente a 37,05 m (c) Geometria da torre de 500 kV, as flechas dos cabos fase e de blindagem são respectivamente 21,17 m e 13,61 m e altura da torre equivalente a 46,8 m.

4.4.2. Formas de onda de corrente

As formas de onda adotadas nas simulações são apresentadas na Figura 4.18. Essas formas de onda consideram os parâmetros medianos representativos de descargas negativas descendentes de correntes de primeiras descargas medidas no Monte San Salvatore (MSS), Morro do Cachimbo (MCS) e torres de linha de transmissão instrumentadas no Japão (TLJ) [103]. As curvas são modeladas de acordo com a soma de funções de Heidler como o explicitado no Capítulo 2.

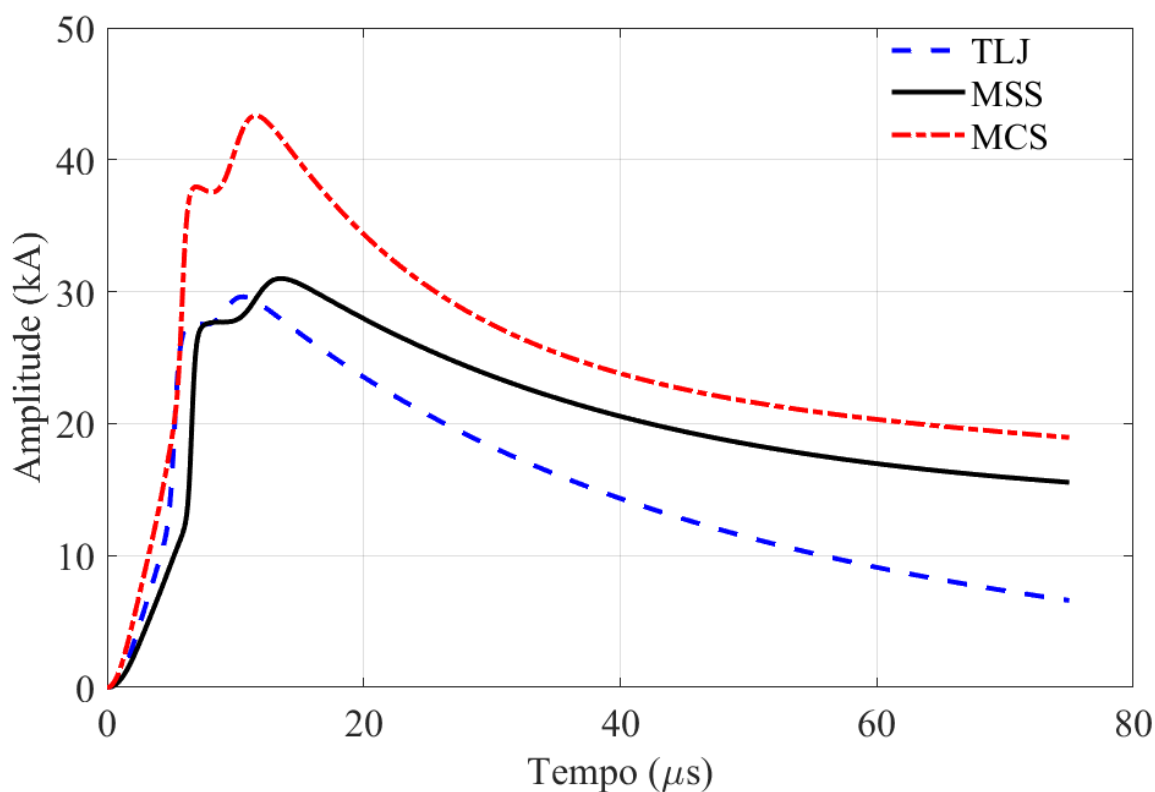


Figura 4.18 - Formas de onda representativas de corrente de primeira descarga utilizadas nas simulações.

A curva MSS é caracterizada por um valor de pico de 31,1 kA e um tempo de frente virtual de 3,8 μs . Assim como a curva MCS é caracterizada por um valor de pico de 43,3 kA e um tempo de frente virtual de 4,2 μs . Essa forma de onda é gerada a partir dos dados apresentados em [50]. A curva associada com as medições realizadas no Japão, apresentadas por Takami e Okabe em [24], com valores de pico de 29,3 kA e um tempo de frente virtual de 3,2 μs .

A qualidade das curvas apresentadas na Figura 4.18 pode ser avaliada na Tabela 4.7, onde os principais parâmetros extraídos das curvas apresentadas são comparadas com os valores medianos (indicados entre parênteses) obtidos através da distribuição log-normal de primeiras descargas descendentes negativas medidas no Monte San Salvatore, Morro do Cachimbo e linhas de transmissão do Japão. A porcentagem dos valores corresponde aos erros obtidos.

Como o visto na Figura 4.18, as formas de onda representativas das medições realizadas no MSS em aquelas realizadas por Takami e Okabe no Japão possuem valores de pico similares, 31,1 kA e 29,3 kA, com um percentual de diferença de aproximadamente

6%. A curva associada com o MCS tem um valor de pico de aproximadamente 40% maior comparado às outras formas de ondas. É importante salientar que a base de dados utilizada para a construção da forma de onda apresentada, MCS, permanece como a única obtida em regiões tropicais com uma representatividade estatística significante.

Tabela 4.7 - Comparação dos parâmetros medianos de correntes de primeiras descargas medidas em torres instrumentadas com dados extraídos das curvas apresentadas na Figura 4.18.

Distribuições	Ip1	Ip2	Td30	S30(kA/μs)	T50	Sm(kA/μs)
MSS	27,8	31,0	3,8	7,2	75	24,4
	(27,7)	(31,1)	(3,8)	(7,2)	(75)	(24,3)
	0,36%	0,32%	0%	0%	0%	4,2%
MCS	37,9	43,3	4,2	-	50	-
	(37,6)	(43,3)	(4,2)	-	(56,2)	-
	0,79%	0%	0%	-	11%	-
TLJ	27,6	29,6	3,2	8,5	38,6	19
	(27,7)	(29,3)	(3,2)	(8,8)	(36,5)	(18,9)
	0,36%	1%	0%	3%	5,7%	0,5%

É importante mencionar que, no presente trabalho, somente ondas de corrente representativas de primeiras descargas são consideradas. Embora as descargas subsequentes sejam tipicamente mais rápidas (tempo de crescimento da frente da onda mais curto), em termos de capacidade de isolamento da linha, a amplitude prevalece. Ondas de corrente subsequente podem ser uma preocupação para linhas de transmissão com níveis de tensão iguais ou abaixo de 138 kV, particularmente, em casos que a primeira descarga não causa uma falha do isolamento. No entanto, até nesses casos, as primeiras descargas ainda permanecem sendo as causas primárias de desligamento de linhas de transmissão [103].

4.4.3. Torres da Linha de Transmissão

As configurações das torres da linha de transmissão para 138 kV e 230 kV são representados por um conjunto de quatro condutores verticais paralelos. A impedância

de surto equivalente foi calculada utilizando a fórmula corrigida de Jordan, como o explicitado no Capítulo 2.

A fim de considerar a variação da geometria das torres, a estrutura de 138 kV foi dividida em quatro seções. Essas seções foram modeladas como linhas monofásicas com parâmetros distribuídos como o indicado no Capítulo 2, resultando nos seguintes valores de impedância de surto da base para o topo da torre: $Z_1 = 121 \Omega$, $Z_2 = 171 \Omega$, $Z_3 = 223 \Omega$ and $Z_4 = 272 \Omega$. Similarmente, para a torre de 230 kV, foi dividida em cinco seções, e os seguintes valores de impedância de surto foram obtidos e apresentados da base para o topo da torre: $Z_1 = 115 \Omega$, $Z_2 = 148 \Omega$, $Z_3 = 187 \Omega$, $Z_4 = 230 \Omega$.

Para as estruturas de 500 kV, a impedância de surto foi calculada utilizando as bem conhecidas expressões para torres do tipo *Waist*. Com as dimensões da torre apresentadas na Figura 4.17 (c) utilizadas para a obtenção da impedância de surto de 128Ω foi obtida. Para este caso, o cálculo da impedância de surto não foi realizado através da metodologia de Jordan estendido, não houve divisão dessa estrutura em seções para cálculo da impedância de surto.

4.4.4. Impedância de aterramento

A impedância de aterramento de pé de torre é representada por uma impedância impulsiva, Z_p , assim como o explicitado nos Capítulos 2 e 3 e com valores variando entre 10Ω e 60Ω , com o objetivo de cobrir uma ampla faixa de condições de solo que afetam o valor da impedância de aterramento e que comumente podem estar presentes ao longo do percurso da linha de transmissão.

4.4.5. Curvas de distribuição do valor de pico

A taxa de desligamentos por *backflashover* é diretamente proporcional ao número de descargas atmosféricas que incidem sobre a linha de transmissão e a probabilidade de ocorrência da corrente crítica, como o apresentado na equação 3.3 no Capítulo 3. A probabilidade de ocorrência de I_c é obtida a partir de curvas de distribuição do valor de pico, essas são derivadas a partir da função densidade de probabilidade e de dados obtidos em estações de medições descargas construídas em diversas partes do mundo.

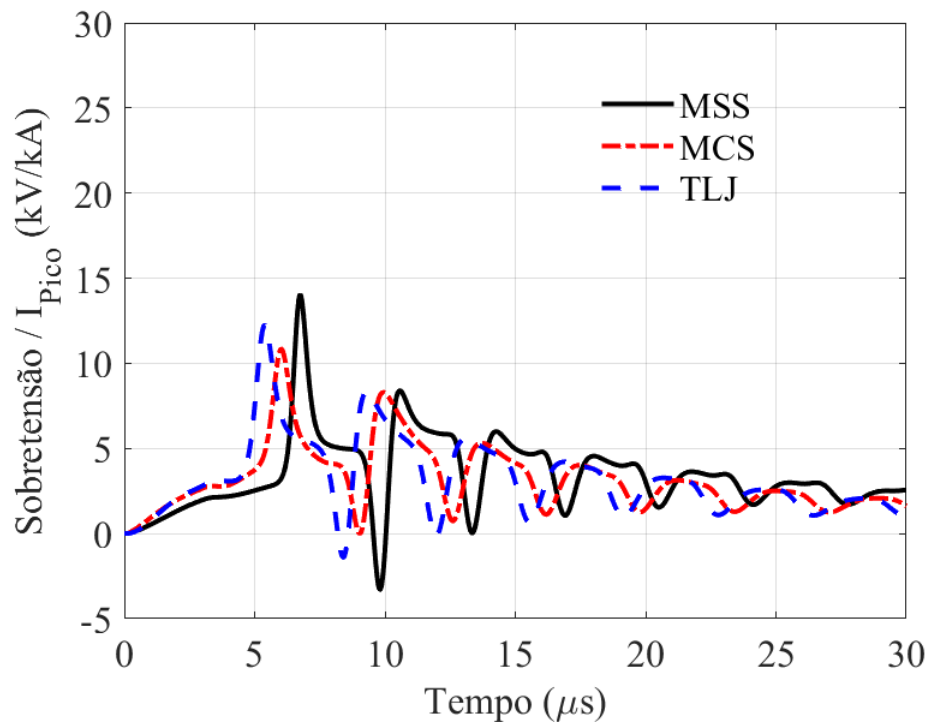
As distribuições comumente utilizadas pela literatura e recomendadas por guias de desempenho de LTs são as obtidas a partir das medições realizadas no Monte San Salvatore, no Morro do Cachimbo e em linhas de transmissão do Japão. Somente as distribuições relativas à incidência de primeiras descargas são consideradas no cálculo, visto que comumente essas correntes possuem valores de pico maiores que os valores de pico das correntes subsequentes.

4.4.5.1. Formas de onda de sobretensão típicas

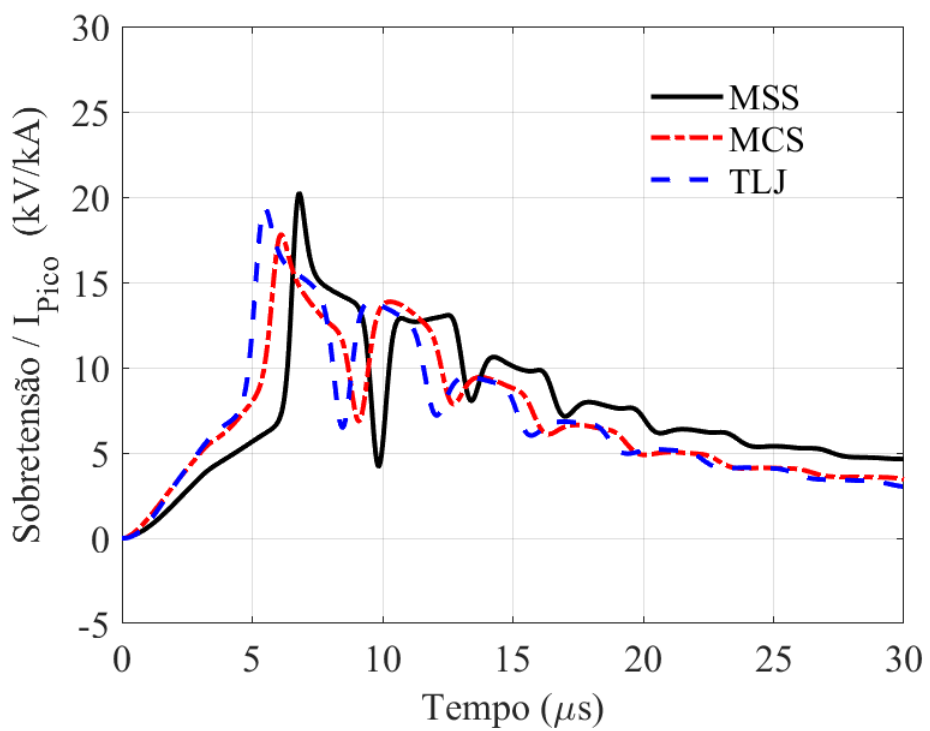
Figura 4.9 mostra formas de onda de sobretensão típicas através dos isoladores externos de uma linha de 230 kV, considerando a injeção de três formas de onda de corrente representativas de correntes de primeiras descargas, apresentadas na Figura 4.18, no topo da torre [103]. Foram considerados três valores diferentes de impedância de pé de torre, (a) 10 Ω (b) 20 Ω e (c) 60 Ω . Para comparar as formas de onda de sobretensão resultantes da injeção de cada corrente de descarga, elas foram normalizadas em relação ao valor de pico de cada corrente respectiva.

De acordo com os resultados apresentados, as sobretensões associadas a cada corrente do raio apresentam formas de onda distintas, notadamente ao longo de sua frente de onda. Isto é algo esperado visto que as formas de onda consideradas são caracterizadas por diferentes parâmetros e, assim sendo, possuem diferentes formas de onda [103].

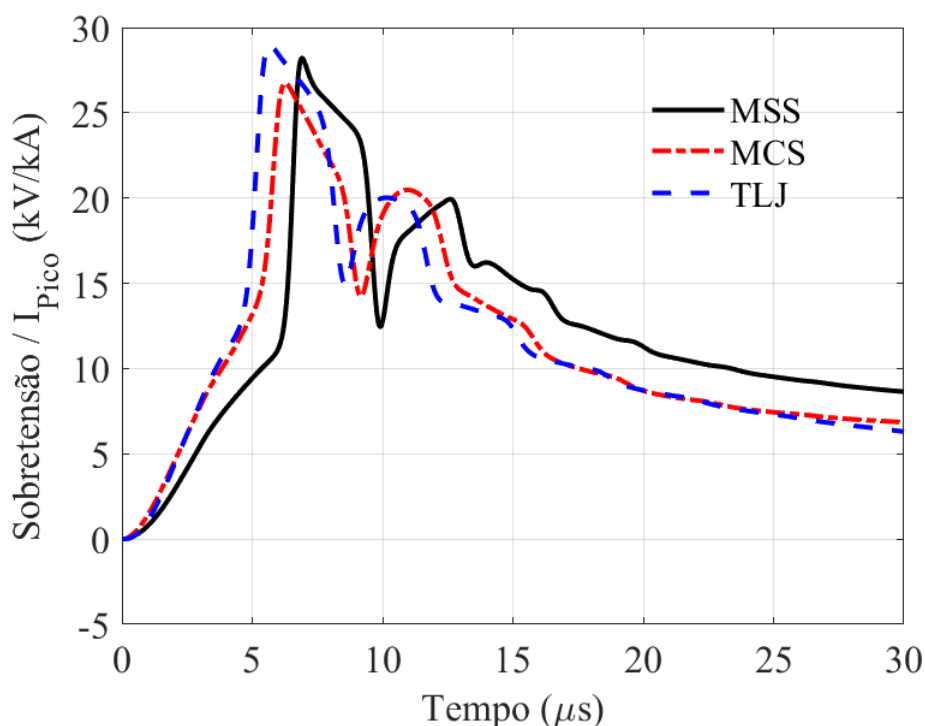
Diferenças nas formas de onda de sobretensão são observadas para os três valores assumidos de impedância de pé de torre. Um ponto importante de se observar, à medida que os valores de pé de torre aumentam, os valores de pico normalizadas das sobretensões também ficam mais próximos. Os resultados aqui apresentados são para uma linha de 230 kV, mas conclusões similares podem ser observadas para as linhas de 138 kV e 500 kV.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.19 – Típicas formas de onda de sobretensão através do isolador externo da linha de 230 kV da linha, considerando a injeção das correntes de descarga no topo da torre e assumindo a impedância de pé de torre de (a) 10Ω (b) 30Ω e (c) 60Ω .

4.4.5.2. Correntes críticas

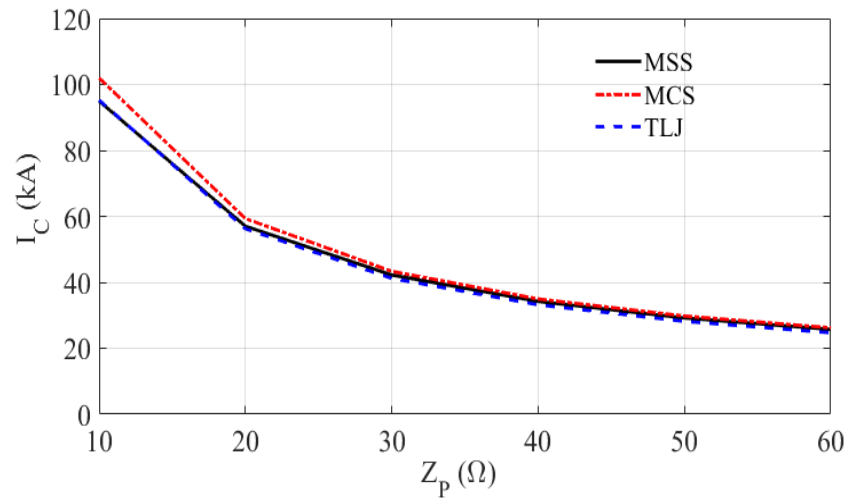
Figuras 4.20(a)-(c) indicam as correntes críticas para impedâncias de pé de torre variando entre 10Ω e 60Ω , para linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV, respectivamente. Os resultados consideram as três formas de onda representativas de correntes de descargas atmosféricas assumindo medições realizadas na Suíça (MSS), no Brasil (MCS) e no Japão (TLJ) [103]. Para cada impedância de pé de torre e forma de onda de corrente, foram determinadas as correntes críticas através da variação da amplitude da corrente de descarga e do efeito disruptivo associado com as sobretensões resultantes através da cadeia de isoladores da fase mais baixa da linha de 138 kV e das cadeias de isoladores externos para linhas de 230 kV e 500 kV.

Como o esperado, os valores de corrente crítica diminuem à medida que os valores de impedância de pé de torre aumentam, independentemente do nível de tensão da linha

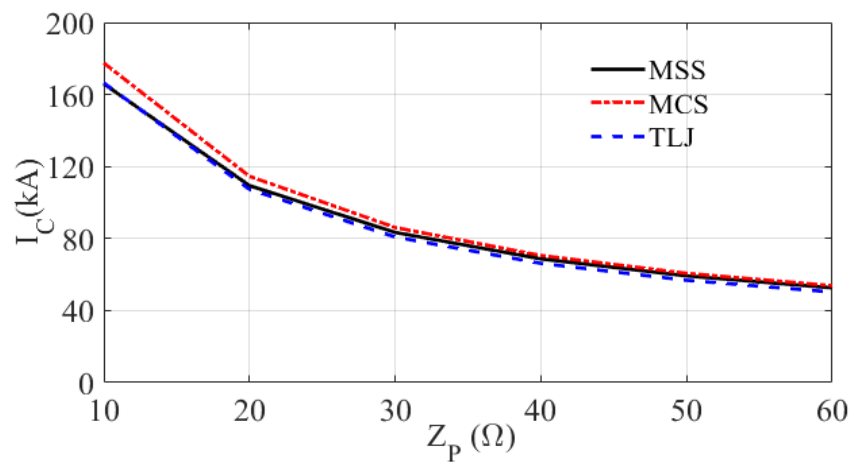
e da forma de onda da corrente de descarga injetada. À medida que os valores de impedância de pé de torre aumentam, sua capacidade de mitigar a taxa de aumento de sobretensões incidentes nos isoladores da linha diminui [103]. Isto resulta em correntes críticas mais baixas, o que significa que correntes de descargas atmosféricas com amplitudes menores podem desencadear desligamentos da linha. Comparativamente, para o mesmo valor de impedância de pé de torre, a linha de 500 kV (seguida pela linha de 230 kV) apresenta correntes críticas mais elevadas do que a linha de 138 kV, principalmente devido aos valores mais elevados de CFO.

É possível observar na Figura 4.20 que as curvas de corrente crítica em função dos valores de impedância de pé de torre obtidas considerando as formas de onda das correntes de primeira descarga, MSS e TLJ possuem comportamentos similares, com a diferença percentual média entre elas não excedendo 3%. Isto é válido para as três LTs analisadas, apesar das diferenças observadas nas sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores para injeção das correntes MSS e TLJ, conforme mostrado na Figura 4.19.

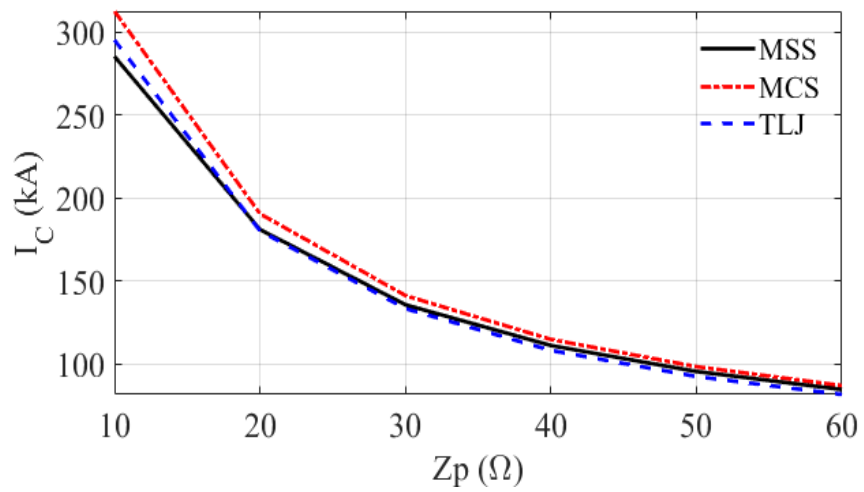
Para os valores do MCS, valores mais altos de corrente crítica são obtidos para valores mais baixos de impedância de pé de torre; entretanto, para valores de Z_p superiores a 20Ω , as formas de onda de corrente crítica obtidas para a corrente MCS aproximam-se daquelas obtidas considerando as correntes MSS e TJJ, não sendo a diferença percentual média entre elas superior a 5%. Este resultado, de que as correntes críticas obtidas não são sensíveis às formas de onda de corrente utilizadas, aumenta a importância da distribuição cumulativa de corrente de pico adotada para o cálculo da taxa de desligamento da linha de transmissão.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.20 - Corrente crítica x impedância de pé de torre para linhas de (a) 138 kV (b) 230 kV e (c) 500 kV.

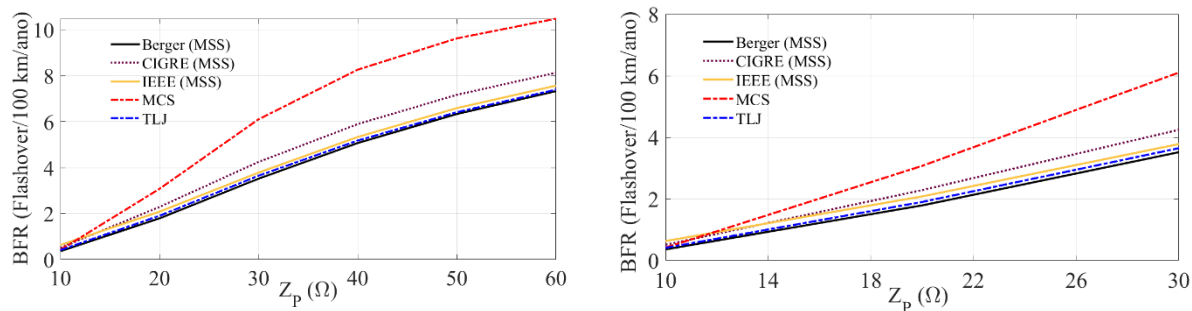
4.4.6. Taxa de Backflashover: Influência da curva de distribuição de corrente adotada para determinar $P(I_p > I_{crit})$

Com base nos valores de corrente crítica obtidos, o número anual de desligamentos por backflashover a cada 100 km para linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV pode ser obtido a partir da equação (3.4) apresentado na seção 3.2. Nas simulações realizadas foram consideradas o largamente utilizada conceito de raio de atração médio para calcular o número de descargas para a linha, N_{TL} . Os resultados de taxa de desligamento por backflashover em função de Z_p são apresentados na Figura 4.21(a)-(c), respectivamente para 138 kV, 230 kV e 500 kV, considerando diferentes distribuições cumulativas de corrente.

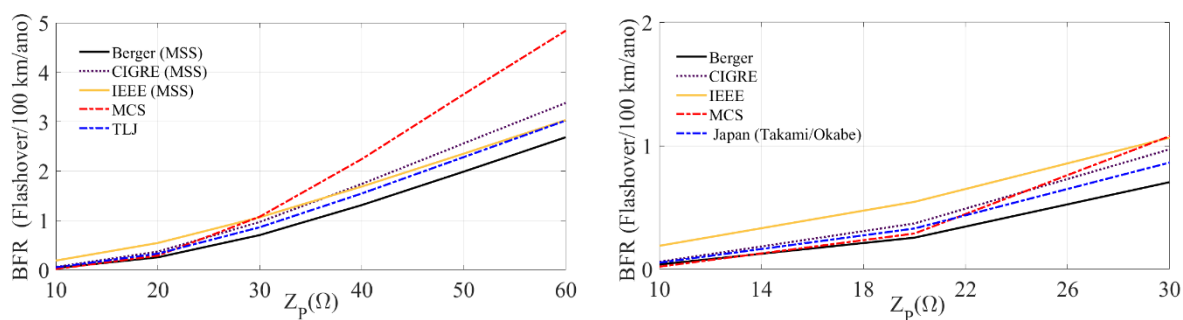
Como visto, independentemente da distribuição de corrente acumulada, o BFR geralmente aumenta com o aumento da impedância de pé de torre, e taxas de desligamento ainda mais altas são observadas para a linha de 138 kV devido ao seu menor CFO.

Por outro lado, para um determinado valor de impedância de pé de torre, a relação entre as taxas de desligamento determinadas considerando as diferentes distribuições cumulativas de correntes depende do nível de tensão da linha de transmissão. Isto está principalmente ligado às variações nas probabilidades de superação da corrente crítica, que dependem da curva de distribuição assumida, uma vez que o número de flashes na linha é independente da curva de distribuição quando se utiliza o conceito de raio médio de atração.

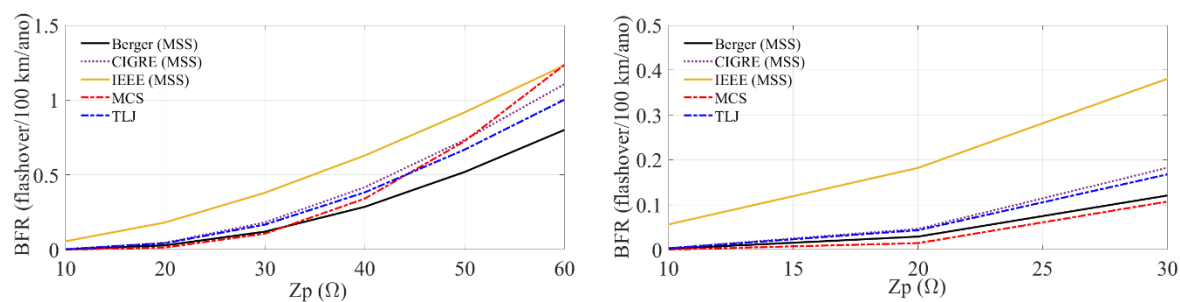
Para explorar ainda mais esses resultados, a Figura 4.22(a)-(c) representa as diferenças nas taxas de backflashover estimados para cada valor de impedância da base da torre, tomando a distribuição IEEE como referência, respectivamente, para as linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV.



(a)

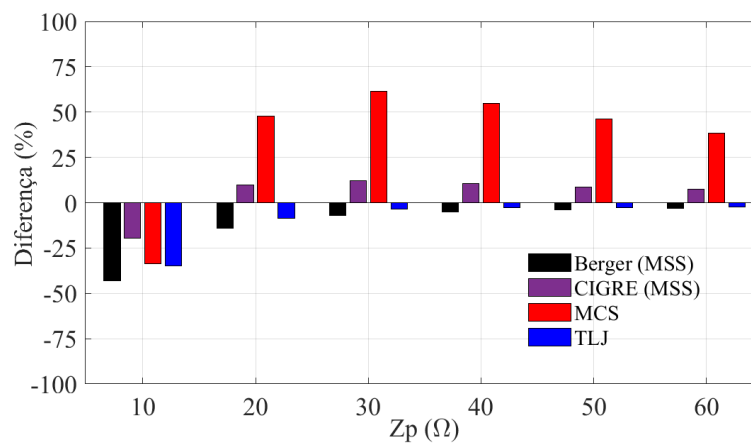


(b)

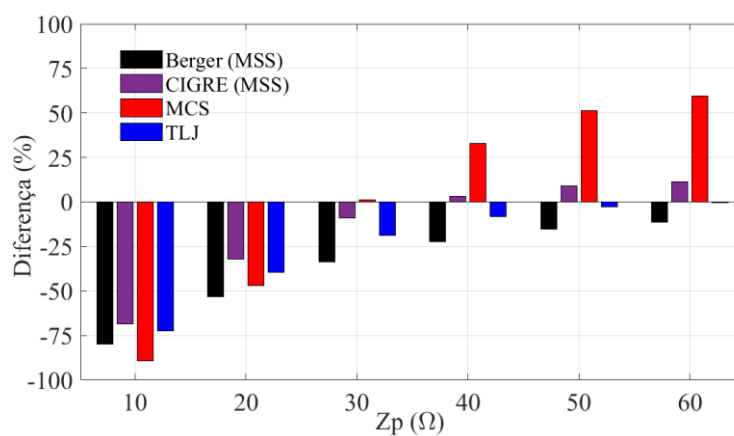


(c)

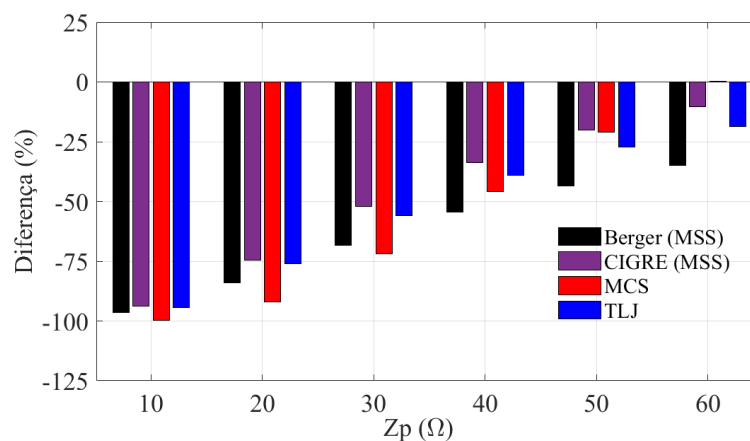
4.21 - Taxa de backflashover para as linhas de transmissão (a) 138 kV, (b) 230 kV, (c) 500 kV, considerando o conceito de raio de atração médio e diferentes curvas de distribuição de corrente. Na esquerda, o gráfico considerando as impedâncias de 10 a 60 Ω , na direita um zoom nas impedâncias de 10 a 30 Ω .



(a)



(b)



(c)

Figura 4.22 – Diferenças entre as taxas de backflashover estimadas considerando a distribuição do IEEE como referência comparado ao uso de diferentes curvas de distribuição de corrente para (a) 138 kV, (b) 230 kV e (c) 500 kV.

Para a linha de 138 kV, observa-se que para o valor Z_p de 10 Ω , a distribuição IEEE leva a valores de BFR mais elevados em comparação com todas as outras distribuições de corrente de pico. Isso ocorre porque para este valor de impedância de pé de torre, a corrente crítica é de aproximadamente 100 kA e para correntes superiores a cerca de 90 kA a distribuição IEEE leva a probabilidades mais elevadas em comparação com as outras distribuições.

Para valores de impedância da base da torre entre 20 Ω e 60 Ω , os valores de BFR estimados utilizando as distribuições MCS e CIGRE são superiores aos obtidos utilizando a distribuição IEEE, uma vez que as correntes críticas variam entre cerca de 60 kA e 25 kA e, nesta gama de correntes, ambas as distribuições MCS e CIGRE preveem maiores probabilidades de a corrente ser excedida em comparação com a distribuição IEEE.

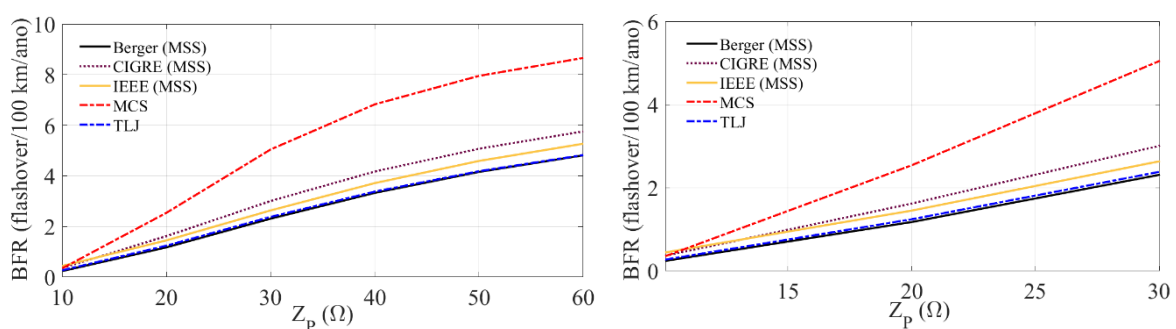
Diferenças de até 60% na BFR estimada são observadas quando se utiliza a distribuição MCS. Uma lógica similar explica as menores taxas de indisponibilidade obtidas com a utilização das distribuições Berger (MSS) e TLJ, embora as diferenças em comparação com os resultados obtidos com a distribuição IEEE sejam menos significativas, especialmente para valores mais elevados de impedância da base da torre. É importante mencionar que em [106] os autores também observaram que para determinados valores de impedância de aterramento, a distribuição de MCS levava a menores valores de desligamento mesmo a respectiva forma de onda representativa de MSS possuindo um valor de pico menor, 43,3 kA e 31 kA respectivamente.

Considerando a linha de 500 kV, observa-se um comportamento bastante diferente. Vê-se que os valores de BFR estimados usando a distribuição IEEE são maiores do que aqueles estimados usando todas as outras distribuições na faixa considerada de valores de impedância da base da torre [103]. Em função de, dado o maior CFO da linha de 500 kV, as correntes críticas serem conseqüentemente maiores e localizadas na faixa onde a distribuição IEEE prevê maior probabilidade de serem ultrapassadas. Conforme Figura 4.22(c), embora as diferenças tendam a diminuir com o aumento da impedância da base da torre, elas apresentam valores elevados e permanecem acima de 50% para valores de Z_p entre 10 Ω e 30 Ω .

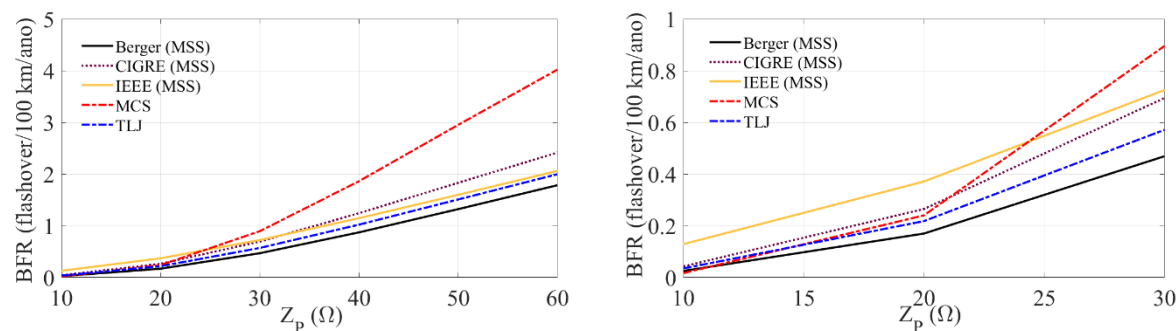
Os resultados encontrados para a linha de 230 kV mostram um comportamento intermediário entre aqueles observados para as linhas de 138 kV e 500 kV e por isso não foram aqui indicados.

4.4.7. Taxa de Backflashover: Influência da curva de distribuição de corrente adotada para determinar $P(I_p > I_{crit})$ e N_{TL}

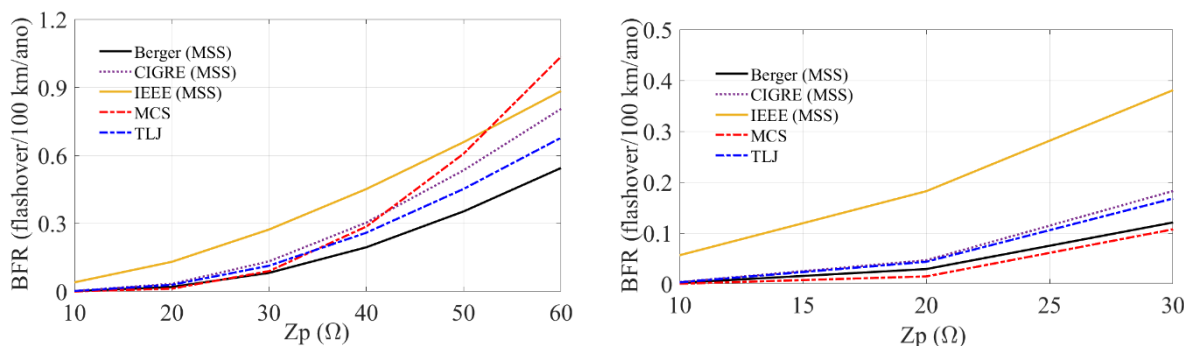
Nesta seção, avalia-se as taxas de backflashover das três linhas de transmissão enquanto consideramos o impacto da curva de distribuição de corrente adotada na determinação da probabilidade de a corrente crítica ser excedida e no número anual de descargas na linha. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 4.23 para as linhas (a) 138 kV, (b) 230 kV e (c) 500 kV.



(a)



(b)



(c)

4.23 - Taxa de backflashover para as linhas de transmissão (a) 138 kV, (b) 230 kV, (c) 500 kV, considerando o conceito de raio de atração equivalente e diferentes curvas de distribuição de

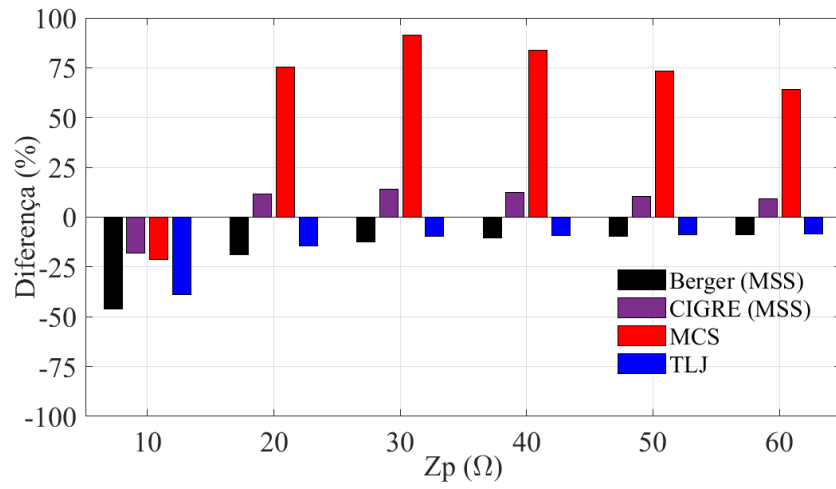
corrente. Na esquerda, o gráfico considerando as impedâncias de 10 a 60 Ω , na direita um zoom nas impedâncias de 10 a 30 Ω .

O comportamento geral dos resultados da Figura 4.23 é semelhante aos resultados mostrados na Figura 4.21, que foram obtidos utilizando o conceito de raio de atração médio, ou seja, o BFR aumenta com a impedância de pé de torre, e as taxas de desligamento da linha são maiores para a linha de 138 kV devido ao seu menor CFO. Por outro lado, considerar a influência da curva de distribuição de corrente no número de descargas incidentes na linha leva a valores mais baixos de BFR em comparação com o raio de atração médio, em linha com os resultados detalhados na seção anterior.

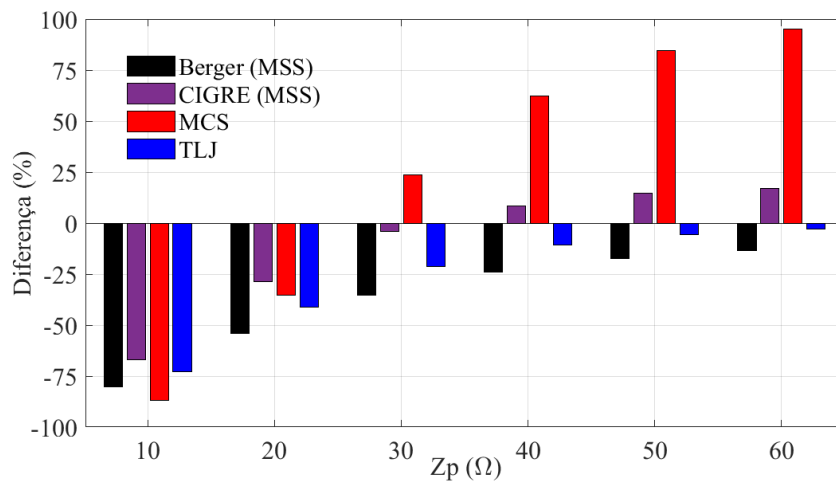
A Figura 4.24 ilustra as variações nos valores de backflashover estimados para cada valor de impedância de pé de torre, tendo a distribuição IEEE servindo como referência. A análise é realizada para as linhas (a) 138 kV, (b) 230 kV e (c) 500 kV. Ao comparar os resultados obtidos para as linhas de 138 kV e 230 kV (Figura 4.24(a), (b)) com a Figura 4.22(a), (b), observa-se uma tendência geral semelhante. No entanto, surgem diferenças mais significativas entre os resultados obtidos utilizando a distribuição IEEE e os obtidos a partir das distribuições CIGRE e MCS quando se leva em conta a influência da curva de distribuição de valor de pico de corrente no número de descargas incidentes sobre a linha.

Considerando os resultados obtidos para a linha de 500 kV, comparando as Figuras 4.22(c) e 4.24(c), observa-se novamente um comportamento semelhante, embora com uma diferença importante. Utilizando o conceito de raio de atração médio, os valores de BFR estimados utilizando a distribuição IEEE são maiores em comparação com todas as outras distribuições de corrente consideradas.

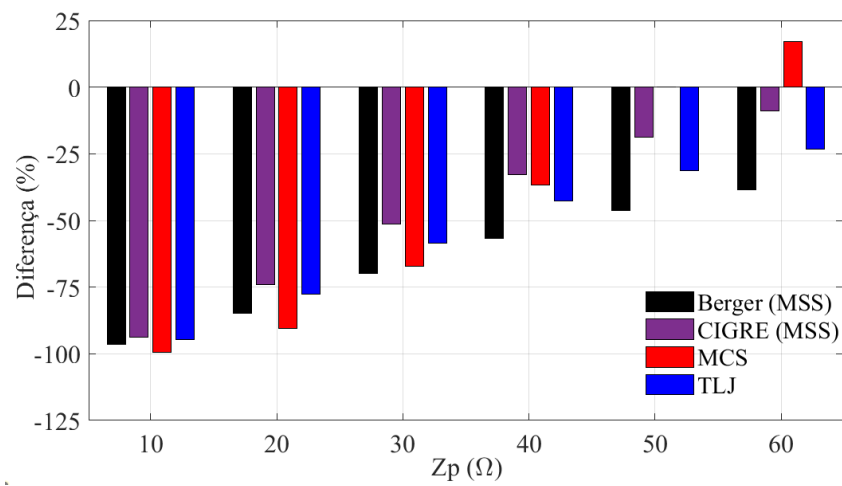
Por outro lado, considerando o impacto da distribuição de corrente no número anual de descargas incidentes na linha, o uso da distribuição MCS leva a maiores taxas de *backflashover* no caso de maiores valores de impedâncias de aterramento de pé de torre maiores que 50 Ω . Embora não se preveja que esta situação prevaleça ao longo da rota da linha de transmissão, poderá ocorrer em determinados trechos. Isto afetará o cálculo da taxa de desligamento da LT e é considerado dividindo a linha em seções de distribuição log-normal dos valores de impedância de pé de torre.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.24 – Diferenças entre as taxas de desligamento estimadas considerando a distribuição do IEEE comparada ao uso de diferentes curvas de distribuição de corrente para as linhas de (a) 138 kV, (b) 230 kV e (c) 500 kV.

4.5. Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos considerando a metodologia convencional (consideração de uma única torre) e a metodologia proposta pelo trabalho (consideração de três silhuetas típicas). A metodologia proposta obteve estimativas 11,3% e 10,8% menores do que a convencional, considerando ondas representativas do Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo respectivamente. Uma diferença da mesma magnitude da obtida considerando ou desconsiderando a dependência da frequência dos parâmetros do solo.

Neste trabalho também foi investigado o efeito da variação das alturas de geometrias típicas de torres de 230 kV no desempenho da descarga atmosférica. Duas distribuições de probabilidade diferentes foram consideradas para ambas as geometrias das torres, autoportante de suspensão e estaiada.

As diferenças obtidas considerando a torre de suspensão e as distribuições recomendadas pelo IEEE [2] e a distribuição de corrente associada às medições realizadas no Morro do Cachimbo [11], MSS (IEEE) e MCS, foram de 75% e 80% respectivamente. Considerando a torre estaiada, as diferenças obtidas foram de 55% e 67% para MSS(IEEE) e MCS respectivamente.

É importante ressaltar que a distribuição de probabilidade utilizada impacta diretamente na variação do BFR em função da altura da torre. Para uma representação realista do desempenho atmosférico da linha de transmissão, é muito importante escolher uma distribuição de probabilidade que seja o mais representativa possível das características da atividade atmosférica da região onde a linha está instalada. Já a distribuição de probabilidade impacta diretamente no cálculo do desempenho da LT.

Numa eventual ação para mitigar as causas dos desligamentos e melhorar o desempenho da LT, esses trechos devem ser priorizados para a aplicação de medidas de proteção como instalação de pára-raios e melhoria do sistema de aterramento, por

exemplo, pois são os trechos decisivos para o desempenho da linha. Este tipo de ação focada permite a redução de custos e a melhoria global do desempenho da LT frente a descargas atmosféricas.

Um fator fundamental na obtenção de estimativas assertivas a respeito do desempenho da linha de transmissão, é a caracterização da atividade atmosférica da região onde a linha está instalada. Os parâmetros de descargas atmosféricas possuem uma natureza aleatória e variam em função da localização geográfica. Diante disso, é fundamental a avaliação do efeito da distribuição de probabilidade cumulativa dos picos de corrente sobre a taxa de desligamento da linha.

Para isso, foram realizadas simulações considerando linhas de transmissão de 138, kV, 230 kV, 500 kV e as distribuições associadas às medições realizadas no Monte San Salvatore, Morro do Cachimbo e as linhas de transmissão do Japão e as distribuições recomendadas em brochuras e standards, IEEE e CIGRÉ.

Foi realizada uma avaliação abrangente de como a distribuição cumulativa de corrente de pico influencia a avaliação do desempenho de descargas atmosféricas em termos da taxa de desligamento de backflashover para linhas de transmissão. Consideraram-se uma variedade de distribuições, incluindo dados de torres instrumentadas de MSS, MCS e TLJ, bem como distribuições padrão de IEEE e CIGRE. A análise abrangeu três linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão: 138 kV, 230 kV e 500 kV. As taxas de backflashover foram calculadas analisando as sobretensões através dos isoladores de linha resultantes da incidência das primeiras correntes de retorno negativas representativas medidas em torres instrumentadas. Com base nos resultados obtidos, as seguintes conclusões podem ser tiradas.

Os valores estimados da corrente crítica que levam ao desligamento da linha a partir de simulações considerando a incidência de três formas de onda representativas da primeira corrente de retorno negativa, assumindo medições realizadas na Suíça (MSS), Brasil (MCS) e Japão (TLJ) foram razoavelmente semelhantes, apesar das diferenças observadas em as formas de onda de sobretensão associadas a cada corrente de raio. Isto reforça a importância de escolher a distribuição apropriada para calcular a probabilidade de a corrente crítica ser excedida e, em última análise, estimar a taxa de backflashover.

Normalmente, no cálculo da taxa de interrupção de backflashover da linha, a curva de distribuição é considerada apenas no cálculo da probabilidade de a corrente crítica ser excedida. Contudo, a distribuição adotada também influencia a determinação do número

anual de descargas para a linha. Portanto, na análise precisa do desempenho de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas, a curva de distribuição deve ser considerada.

O conceito de raio atração médio, amplamente utilizado para calcular o número de descargas incidentes na linha, assume um valor médio de corrente de pico e desconsidera a natureza estatística deste parâmetro. A utilização deste conceito superestima o número de descargas anuais na linha em comparação com a abordagem que considera a influência da distribuição de corrente acumulada. Este resultado manteve-se verdadeiro para todas as distribuições atuais cumulativas consideradas neste artigo.

Considerando as três linhas analisadas, o uso das distribuições padrão IEEE e CIGRE leva a maiores valores de BFR em comparação com distribuições de torres instrumentadas MSS e TLJ. Este resultado é válido para a LT de 500 kV considerando a distribuição MCS e assumindo impedâncias de aterramento da base da torre de até cerca de 40 Ω . No entanto, para as linhas de 138 kV e 230 kV, a distribuição MCS leva a taxas de backflashover mais elevadas à medida que a impedância da base da torre aumenta, nomeadamente no caso da linha de 138 kV. Dependendo do nível de tensão da LT e do valor da impedância da base da torre, as diferenças entre o BFR estimado utilizando torre instrumentada ou distribuições padrão pode ser superiores a 50%. Isto reforça fortemente a importância de utilizar, sempre que disponíveis, distribuições locais cumulativas de corrente de pico obtidas a partir de medições em torres instrumentadas para obter taxas de indisponibilidade mais realistas e consistentes com a região em que a LT está instalada.

Se a LT não estiver localizada em uma região tropical e as distribuições locais cumulativas de correntes de pico não estiverem disponíveis, recomenda-se o uso das distribuições padrão IEEE e CIGRE, pois elas levam a estimativas conservadoras da taxa de backflashover.

Para linhas de transmissão de nível de tensão mais alto, a corrente crítica pode frequentemente exceder 100 kA. Neste caso, especial cuidado deve ser tomado nas premissas adotadas para o cálculo do desempenho da LT, uma vez que, das três distribuições de torres instrumentadas consideradas nesta tese, apenas as distribuições MCS e TLJ contêm valores medidos acima de 100 kA. Isto reforça a necessidade de um maior número de medições em torres instrumentadas em todo o mundo, visando reduzir a incerteza em ambas as extremidades das distribuições cumulativas de correntes de pico.

Capítulo 5

Conclusão

5.1 Conclusões

O trabalho apresentou os passos, principais técnicas e metodologias disponíveis na literatura acerca do cálculo de desempenho de linhas de transmissão frente a fenômenos impulsivos de origem atmosférica. Avaliou-se aspectos muito relevantes no desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas: o impacto da consideração de uma distribuição de torres detalhada, da variação de altura de estruturas ao longo da linha e da utilização de diferentes distribuições de valor de pico de corrente de descarga no cálculo do desempenho.

Uma linha de transmissão comumente possui longas extensões e vários tipos de silhuetas ao longo do seu percurso, podendo atravessar regiões com diversas características de relevo, solo e até mesmo de atividade atmosférica. A metodologia usualmente recomendada pela literatura para o cálculo do número de desligamentos da linha em função da incidência de descargas atmosféricas considera apenas uma estrutura típica, em geral o tipo de silhueta com o maior número de estruturas em comparação com o número total de torres da linha. No entanto, como apresentado no trabalho, essa consideração pode levar a desvios nas estimativas realizadas.

Foi proposta uma nova metodologia de cálculo de desempenho de LTs, na qual considera-se uma distribuição detalhada das silhuetas presentes ao longo da extensão da linha. Foram calculadas e comparadas as taxas de *backflashover* obtidas para as duas metodologias considerando-se uma linha de 230 kV e silhuetas de suspensão, ancoragem e estaiada e as ondas de corrente representativas do Monte San Salvatore e do Morro do Cachimbo. Foram comparadas também as sobretensões as quais as cadeias de isoladores dos condutores mais baixos de cada tipo de torre são submetidos e as correntes críticas para cada silhueta.

Tendo em vista as duas ondas de corrente utilizadas nas simulações, a metodologia proposta obteve taxas de *backflashover* aproximadamente 11,3% e 10,8% menores do que as estimadas pela metodologia recomendada pela literatura para Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo respectivamente. É importante salientar que no caso avaliado pelo trabalho a metodologia levou a resultados mais conservativos, no entanto, dependendo da distribuição das silhuetas e das impedâncias de aterramento o oposto pode ocorrer. A metodologia proposta permite uma visão mais detalhada a respeito do comportamento da linha frente a descargas atmosféricas, permitindo a identificação de trechos críticos da linha onde as medidas de melhoria do desempenho podem ser mais eficientemente implementadas.

Em função da extensão e da variabilidade do solo na qual a linha é construída pequenos trechos podem ser responsáveis por parcelas bastante relevantes do número de desligamentos da linha em função do *backflashover*. É possível ter uma visão mais ampla da linha e reconhecer a representatividade de cada trecho para o desempenho da LT, o que não é possível quando considerado somente uma estrutura representativa.

Neste trabalho também foi investigado o efeito da variação das alturas de geometrias típicas de torres de 230 kV no desempenho da LT frente a descargas atmosféricas. Duas distribuições de probabilidade diferentes foram consideradas para ambas as geometrias das torres, autoportante de suspensão e estaiada. Foram considerados projetos de torres e valores de pé de torres reais. Variaram-se as alturas dos pés de torre, e conseqüentemente a altura das estruturas, e avaliou-se o efeito desta variação sobre a taxa de desligamento da linha para ambas as estruturas, autoportantes de suspensão e estaiada.

As diferenças obtidas considerando a torre de suspensão e as distribuições recomendadas pelo IEEE [2] e a distribuição de corrente associada às medições realizadas no Morro do Cachimbo [11], MSS (IEEE) e MCS, foram de 75% e 80% respectivamente. Considerando a torre estaiada, as diferenças obtidas foram de 55% e 67% para MSS(IEEE) e MCS respectivamente. É importante ressaltar aqui as variações de resultados entre as duas estruturas em função das especificidades de cada uma delas, geometria, número de descargas incidentes, etc.

Numa eventual ação para identificar as causas dos desligamentos e melhorar o desempenho da LT, esses trechos devem ser priorizados para a aplicação de medidas de proteção como instalação de pára-raios e melhoria do sistema de aterramento, por

exemplo, pois são os trechos decisivos para o desempenho da linha. É importante salientar que se combinados a fatores como valores maiores de impedância de aterramento, região com maior densidade de descargas para o solo essas estruturas serão ainda mais relevantes para o bom desempenho da linha. Este tipo de ação focada permitiria a redução de custos e a melhoria global do desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Outro aspecto importante avaliado no trabalho foi o impacto de diferentes distribuições de valor de pico sobre a estimativa da taxa de desligamento da linha de transmissão por *backflashover*. Essa avaliação é fundamental visto que os parâmetros associados a descargas atmosféricas podem variar em função da localização geográfica. Para uma avaliação assertiva a respeito do comportamento da linha é importante considerar uma distribuição que represente as características das ondas de descarga e da atividade atmosférica da região onde a linha de transmissão está instalada.

Foi realizada uma avaliação abrangente de como a distribuição cumulativa de corrente de pico influencia a avaliação do desempenho de descargas atmosféricas em termos da taxa de desligamento de *backflashover* para linhas de transmissão. Consideraram-se uma variedade de distribuições, incluindo dados de torres instrumentadas de MSS, MCS e TLJ, bem como distribuições padrão de IEEE e CIGRE. A análise abrangeu três linhas de transmissão de diferentes níveis de tensão: 138 kV, 230 kV e 500 kV.

Foram avaliadas as formas de onda de sobretensão de origem atmosférica para cada nível de tensão, valores de correntes críticas para valores de impedância de pé de torre e foram avaliadas duas metodologias de cálculo para determinação da área de exposição da linha, Raio de Atração Equivalente e Raio de Atração Médio. A primeira considera o efeito da distribuição de valores de pico de correntes de descarga atmosférica e a segunda apenas um único valor de pico representativo, 35 kA.

Dependendo do nível de tensão da LT e do valor da impedância da base da torre, as diferenças entre o BFR estimado utilizando torre instrumentada ou distribuições padrão são superiores a 50%. Isto reforça fortemente a importância de utilizar, sempre que disponíveis, distribuições locais cumulativas de corrente de pico obtidas a partir de medições em torres instrumentadas para obter taxas de indisponibilidade mais realistas e consistentes com a região em que a LT está instalada.

5.2 Contribuições da Tese

A tese contribui para a melhoria de procedimentos e metodologias de cálculo do desempenho de linhas de transmissão. É avaliada a consideração de diferentes geometrias de torres presentes ao longo da linha e não somente a escolha de uma única estrutura representativa como é usualmente feito hoje. Isto permite a representação mais realística e fidedigna da linha levando a resultados mais precisos.

Avalia-se também o efeito da variação da altura das estruturas sobre o desempenho da linha, em função do relevo as estruturas ao longo da LT possuem diferentes alturas, sendo pontos de atração e de maior incidência de descargas atmosféricas. Esses trechos críticos, podem ser responsáveis, e em geral o são, pela maior parcela de desligamentos da linha, a aplicação de medidas de proteção mais assertiva nesses trechos certamente irá contribuir para uma melhoria do desempenho da linha com custos mais baixos.

Por fim, analisa-se a influência da consideração de diferentes distribuições de valor de pico de descargas atmosféricas sobre a taxa de desligamentos da linha por *backflashover*. São comparadas distribuições advindas de medições realizadas por torres instrumentadas e linhas de transmissão e distribuições recomendadas pelo IEEE e por CIGRÉ. A utilização de distribuições advindas de medições representa de forma mais fidedigna a característica atmosférica das regiões por onde as LTs são construídas. A distribuição escolhida como representativa e também a metodologia de cálculo da área de exposição da linha tem efeitos diretos sobre o desempenho da linha.

Estes três pontos contribuem de maneira significativa para a construção de uma metodologia de avaliação e cálculo de estimativas de desligamentos da linha muito mais assertivas e fidedignas.

5.3 Propostas de Continuidade

Como propostas de continuidade da tese pode-se listar:

- Avaliação do efeito de geometrias de torre distintas sobre a taxa de desligamento da linha por *backflashover*.
- Avaliar diferentes distribuições de geometria ao longo da linha de transmissão.
- Avaliar diferentes distribuições de valor de pico para correntes de descarga atmosférica.
- Avaliar de forma conjunta, simultânea, o efeito da variação de altura das estruturas, da representação de diferentes geometrias da linha e da distribuição de valor de pico para correntes de descarga.
- Avaliar o efeito de diferentes distribuições de valor de pico utilizando metodologias diferentes para o cálculo da área de exposição da linha, como o Modelo Eletrogeométrico.

Referências Bibliográficas

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão aéreas,” 2009.
- [2] R. Alipio and S. Visacro, “Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139, 2013, doi: 10.1109/TEMC.2012.2210227.
- [3] R. Alipio and S. Visacro, “Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, 2014.
- [4] CIGRE Working Group C4.33, “Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems (WG C4.33),” CIGRE, 2019.
- [5] V. Bourscheidt, O. Pinto, and K. P. Naccarato, “Improvements on Lightning Density Estimation Based on Analysis of Lightning Location System Performance Parameters: Brazilian Case,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 52, no. 3, pp. 1648–1657, 2014.
- [6] CIGRE, “Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines - New Aspects (WG C4.23).” CIGRÉ, pp. 1–111, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-44484-6_13.
- [7] ONS, “Indicadores de Desempenho do SIN (Sistema Interligado Nacional) - Distúrbios na Rede Básica,” 2020.
- [8] Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Sumário Executivo 2020 - Plano da Operação Elétrica de Médio Prazo do SIN (2021-2025),” 2020.
- [9] EMTP User Group, *Alternative Transients Program (ATP): Rule Book*. Leuven, Belgium: Leuven EMTP Center, 1987.
- [10] IEEE Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, “A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines A Report Prepared by the Working Group on Lightning Performance of

- Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 4, pp. 919–932, 1985, doi: 10.1109/MPER.1985.5528828.
- [11] J. C. Salari, "A methodology for computing transmission-line short circuits caused by direct and nearby ground lightning incidence - Part I: Methodological aspects," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1578–1585, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2325857.
- [12] A. S. Miranda, "Avaliação da Influência dos Modelos de Aterramento e Linhas de Transmissão na Análise de Sobretensões em Linhas Aéreas Submetidas a Descargas Atmosféricas Diretas utilizando plataformas do tipo ATP/EMTP (Dissertação de Mestrado)," Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, Belo Horizonte, 2019.
- [13] M. H. R. Duarte, "Impacto da Representação de Sistemas de Aterramento no Desempenho de Para-Raios de linhas de transmissão (Dissertação de Mestrado)," Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, Belo Horizonte, 2018.
- [14] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, and M. A. O. Schroeder; "Revision, extension, and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 3, pp. 530–536, 2006, doi: 10.1109/TEMC.2006.879345.
- [15] B. R. Gupta and B. Thapar, "Impulse Impedance of Grounding Systems," *IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting*, pp. 1–6, 1978.
- [16] R. Alípio, "Modelagem Eletromagnética De Aterramentos Elétricos nos Domínios Do Tempo E Da Freqüência (Dissertação de Mestrado)," Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2008.
- [17] F. M. S. Borges, "Metodologia para determinação da impedância impulsiva para arranjos típicos de aterramentos elétricos" (Dissertação de Mestrado)," Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, Belo Horizonte, 2017.
- [18] R. Alipio and S. Visacro, "Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 716–723, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2278817.

- [19] S. Visacro and F. H. Silveira, "Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1524–1532, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2015.2494520.
- [20] A. De Conti and M. Emídio, "Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, pp. 120–130, 2016, doi: 10.1016/j.epsr.2016.02.032.
- [21] A. C. S. Lima, M. P. Pereira, "Análise Comparativa dos Modelos de Linha de Transmissão para o EMTP," in *XVI SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Campinas, 2001. doi: 10.48011/asba.v2i1.1328.
- [22] K. Berger, "Lightning-Currents Parameters of Upwards Strokes Measured at Mount San Salvatore, Lugano.," *C. E. Transactions*, vol. 69, pp. 353–359, 1978.
- [23] F. H. Silveira, S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 4, p. 1369, 2020, doi: 10.1109/TEMC.2020.3000945.
- [24] J. Takami and S. Okabe, "Observational results of lightning current on transmission towers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 547–556, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.883006.
- [25] H. R. Armstrong, E. R. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, no. 1, pp. 270–281, 1968, doi: 10.1109/TPAS.1968.291999.
- [26] R. H. Golde, "The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines," *AIEE Transactions*, vol. 64, pp. 902–910, 1945.
- [27] IEEE, *Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*. New York, 1997.
- [28] L. Deller, E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model: Part I: Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 2009–2022, 1990, doi: 10.1109/61.103696.
- [29] F. A. M. Rizk, "Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part I: Theory," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 1, pp. 162–171, 1994, doi: 10.1109/61.277673.

- [30] R. Alípio, R. N. Dias, S. Visacro, and F. H. Silveira, "Analysis of shielding failure in transmission lines considering both first and subsequent strokes," *2015 International Symposium on Lightning Protection, XIII SIPDA 2015*, pp. 215–220, 2015, doi: 10.1109/SIPDA.2015.7339314.
- [31] J. G. Anderson *et al.*, "IEEE Working Group Report Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1254–1267, 1993, doi: 10.1109/61.252651.
- [32] J. G. Anderson, "Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above," EPRI-Electric Power Research Institute, Ed., Second. California, 1982.
- [33] A. J. Eriksson, "The Incidence of Lightning Strikes to Power Lines," no. July, pp. 66–67, 1987.
- [34] F. A. M. Rizk, "Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1983–1990, 1990.
- [35] F. H. Silveira and S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 4, p. 1369, 2020, doi: 10.1109/TEMC.2020.3000945.
- [36] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes," *Electra*, vol. 180, pp. 223–237, 1975.
- [37] A. de Conti; S. Visacro, "Analytical Representation of Single-and Double-Peaked Lightning Current Waveforms," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, 2007, doi: 10.1007/s10072-004-0214-7.
- [38] A. de Conti; S. Visacro, "Analytical Representation of Single-and Double-Peaked Lightning Current Waveforms," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, 2007, doi: 10.1007/s10072-004-0214-7.
- [39] D. G. Pechir, "Cálculo de Sobretensões Causadas por Descargas Atmosféricas Diretas em Linhas de Transmissão de SIL Elevado (Dissertação de Mestrado)," 2020.
- [40] CIGRE TB 63, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines (WG 01 - SC 33)," *CIGRE Report 63*, vol. 01. pp. 1–64, 1991.
- [41] A. J. Oliveira, M. A. O. Schroeder, R. A. R. Moura, M. T. Correia de Barros, and A. C. S. Lima, "Adjustment of Current Waveform Parameters for First Lightning Strokes," in

- International Symposium on Lightning Protection - XIV SIPDA*, SIPDA, Ed., Natal: International Symposium on Lightning Protection - XIV SIPDA, 2017, pp. 121–126.
- [42] A. J. Oliveira, M. A. O. Schroeder, R. A. R. Moura, M. T. Correia de Barros, and A. C. S. Lima, “Adjustment of Current Waveform Parameters for First Lightning Strokes,” in *International Symposium on Lightning Protection - XIV SIPDA*, SIPDA, Ed., Natal: International Symposium on Lightning Protection - XIV SIPDA, 2017, pp. 121–126.
- [43] F. A. Diniz, “Impacto da Representação do Efeito do Solo no Estudo Transitório em Linhas de Transmissão Aéreas (Dissertação de Mestrado),” Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFSJ/CEFET-MG, Belo Horizonte, 2019.
- [44] L. C. T. Eraso, “Análise de Modelos de Linhas de Transmissão considerando Parâmetros Dependentes da Frequência,” São Paulo, 2019.
- [45] J. R. Marti, “Accurate Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations,” *IEEE Power Engineering Review*, no. 1, pp. 29–30, 1982.
- [46] M. Emídio, “Uma Abordagem para o Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Linhas de Transmissão Aéreas no Domínio do Tempo Considerando uma Representação mais Detalhada dos Efeitos do Solo (Dissertação de Mestrado).” Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE UFMG, Belo Horizonte, pp. 1–99, 2015.
- [47] B. Gustavsen, G. Irwin, R. Mangelrød, D. Brandt, and K. Kent, “Transmission line models for the simulation of interaction phenomena between parallel AC and DC overhead lines,” *International Conference on Power System Transients (IPST)*. pp. 61–67, 1999.
- [48] A. Morched, B. Gustavsen, and M. Tartibi, “A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1032–1038, 1999.
- [49] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Rational approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitt,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, 1999. doi: 10.1016/0001-8708(78)90008-7.
- [50] F. H. Silveira, S. Visacro, and R. E. De Souza Filho, “Calculation of backflashover outage rate of transmission lines: A discussion on traditional methodologies and

- recent advances," *2015 International Symposium on Lightning Protection, XIII SIPDA 2015*, pp. 226–230, 2015, doi: 10.1109/SIPDA.2015.7339303.
- [51] S. Visacro and A. Soares, "HEM: A model for simulation of lightning-related engineering problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2 I, pp. 1206–1208, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839743.
- [52] L. Grcev and F. Rachidi, "On tower impedances for transient analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1238–1244, 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2004.829878.
- [53] C. F. Wagner, "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 75, no. 3, pp. 1233–1256, 1956, doi: 10.1109/AIEEPAS.1956.4499430.
- [54] M. A. Sargent and M. Darveniza, "Tower Surge Impedance," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, no. 5, pp. 680–687, 1969, doi: 10.1109/TPAS.1969.292357.
- [55] H. Motoyama and H. Matsubara, "Analytical and experimental study on surge response of transmission tower," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, vol. 2, no. 2, p. 855, 2000, doi: 10.1109/pess.2000.867466.
- [56] A. Ametani, Y. Kasai, J. Sawada, A. Mochizuki, and T. Yamada, "Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, no. 4, pp. 339–345, 1994, doi: 10.1049/ip-gtd:19949988.
- [57] M. Ishii and Y. Baba, "Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 17, no. 1, p. 69, 1997, doi: 10.1109/MPER.1997.560718.
- [58] J. A. Gutiérrez *et al.*, "Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 490–496, 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.823210.
- [59] W. A. Chisholm, Y. L. Chow, and K. D. Srivastava, "Surge Response of Transmission Towers.," *Canadian electrical engineering journal*, vol. 7, no. 4, pp. 34–36, 1982, doi: 10.1109/CEEJ.1982.6592216.

- [60] M. T. De Correia Barros, M. E. Almeida, "Computation of electromagnetic transients on nonuniform transmission lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 1082–1087, 1996, doi: 10.1109/61.489371.
- [61] W. A. Chisholm, W. Janischewskyj, "Lightning Surge Response of Ground Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 04, no. 2, pp. 1329–1337, 1989.
- [62] M. Ishii and Y. Baba, "Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 17, no. 1, p. 69, 1997, doi: 10.1109/MPER.1997.560718.
- [63] T. Narita, H. Ota, E. Zaima, and M. Ishii, "Experimental evaluation of UHV gantry tower model for lightning surge analysis," *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 133, no. 9, pp. 716–722, 2013, doi: 10.1541/ieejpes.133.716.
- [64] F. A. Fisher, J. G. Anderson, and J. H. Hagenguth, "Determination of Lightning Response of Transmission Lines by Means of Geometrical Models," *AIEE Transactions*, no. February, pp. 1725–1734, 1960.
- [65] A. De Conti and S. Visacro, "Uso da Fórmula de Jordan no Cálculo da Impedância de Surto de Torres," *XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, 2009.
- [66] J. A. Martínez-Velasco, *Power Systems Transients: Parameter Determination*. Boca Raton: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2010.
- [67] De Conti, Alberto; Visacro, S.; Silva, "XIX International Conference on Electromagnetic Disturbances - EMD 2009," *Signals*, pp. 299–304, 2009.
- [68] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, and M. A. O. Schroeder, "Revision, extension, and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, no. 3, pp. 530–536, 2006, doi: 10.1109/TEMC.2006.879345.
- [69] AIEE Committee Report. A Method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 1950, 69, 1187-1196.
- [70] E. D. Sunde, "Earth Conduction Effects in Transmission Systems." Dover Publications, New York, 1968.
- [71] R. Alípio, M. A. D. O. Schroeder, M. M. Afonso, T. A. S. De Oliveira, and S. D. C. Assis, "Resposta impulsiva de eletrodos de aterramento," *Revista Controle & Automação*, vol. 23, no. 4, pp. 476–488, 2012, doi: 10.1590/S0103-17592012000400008.

- [72] R. Alípio and S. Visacro, "Time-Domain Analysis of Frequency-Dependent Electrical Parameters of Soil," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 59, no. 3, pp. 873–878, 2017, doi: 10.1109/TEMPC.2016.2631892.
- [73] R. Alípio, "Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos (Tese de Doutorado)," Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- [74] S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 381–386, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.876707.
- [75] R. Alípio and S. Visacro, "Frequency dependence of soil parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, 2012, doi: 10.1109/TEMPC.2012.2210227.
- [76] B. Gustavsen and A. Semlyen, "A robust approach for system identification in the frequency domain," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 3, pp. 1167–1173, 2004, doi: 10.1109/TPWRD.2003.822530.
- [77] D. Deschrijver, M. Mrozowski, T. Dhaene, and D. De Zutter, "Macromodeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 6, pp. 383–385, 2008, doi: 10.1109/LMWC.2008.922585.
- [78] B. Gustavsen, "Computer code for rational approximation of frequency dependent admittance matrices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1093–1098, 2002, doi: 10.1109/TPWRD.2002.803829.
- [79] B. Gustavsen, A. Semlyen, "Enforcing passivity for admittance matrices approximated by rational functions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 97–104, 2001, doi: 10.1109/59.910786.
- [80] B. Gustavsen, "Improving the pole relocating properties of vector fitting," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1587–1592, 2006, doi: 10.1109/TPWRD.2005.860281.
- [81] R. Alípio and S. Visacro, "Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 716–723, 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2278817.

- [82] S. Visacro, R. Alípio, C. Pereira, M. Guimarães, and M. A. O. Schroeder, "Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 57, no. 1, pp. 121–127, 2015, doi: 10.1109/TEMC.2014.2362091.
- [83] R. Alípio, M. H. R. Duarte, and S. de C. Assis, "Comportamento de linhas de transmissão parcialmente protegidas por dispositivos para-raios frente a descargas atmosféricas," in *XXV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Belo Horizonte, 2019, pp. 1–10.
- [84] J. He and B. Zhang, "Progress in Lightning Impulse Characteristics of Grounding Electrodes With Soil Ionization.," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 6, pp. 4924–4933, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2427124.
- [85] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, vol. 17, no. 2. 2001. doi: 10.1109/MEI.2001.917540.
- [86] CIGRE WG01 SC33, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines," *CIGRE Report 63*, vol. 01, no. October, p. 64, 1991.
- [87] W. A. Chisholm, "New Challenges in Lightning Impulse and Insulators," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 26, no. 2, pp. 14–25, 2010.
- [88] CIGRE, "Lightning Parameters for Engineering Applications (WG C4.407)," *CIGRÉ*, pp. 1–118, 2013. doi: 10.1109/APEMC.2010.5475697.
- [89] R. de O. Pedrosa, "Estudo da absorção de energia de para-raios de ZnO instalados em linhas de transmissão de 138 kV (Dissertação de Mestrado)," Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.
- [90] IEEE, *Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines*, vol. 2010. 2011. doi: 10.1109/IEEESTD.2011.5706451.
- [91] F. Popolansky, "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents," *Electra*, vol. 22, pp. 139–147, 1972.
- [92] M. A. de O. Schroeder, "Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro do Cachimbo.," Universidade Federal de Minas Gerais, 2001.
- [93] K. Berger, "Novell Observations on Lightning Discharge: Results of Research on Mount San Salvatore," *Journal of the Franklin Institute*, vol. 283, no. 6, 1967.
- [94] F. Popolansky, "Frequency Distribution of Amplitudes of Lightning Currents," *Electra*, no. 22, pp. 139–147, 1972.

- [95] P. Chowdhuri *et al.*, "Parameters of lightning strokes: A review," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 346–358, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.835039.
- [96] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes," *Electra*, vol. 180, pp. 223–237, 1975.
- [97] H. Kroninger, "Further Analysis of Prof. Berger's San Salvatore Lightning Current Data," Pretoria, South Africa, 1974.
- [98] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning Parameters for Engineering Application," *Electra*, vol. 69, pp. 65–102, 1980.
- [99] A. J. Eriksson, "Lightning and Tall Structures," *Transactions South African Institute of Electrical Engineering*, vol. 69, pp. 238–252, 1978.
- [100] J. G. Anderson, "Lightning Performance of Transmission Lines," in *Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above/ Second Edition*, Electric P. Palo Alto, California, 1982, pp. 545–597.
- [101] Conceição, D., Alipio, R., Chisholm, W. e Lopes, I. J. S. "Lightning Performance Calculation of Transmission Lines Considering a Detailed Modeling of the Tower Geometries Distribution". International Conference on Grounding & Lightning Physics and Effects, Belo Horizonte, Brasil, 2021.
- [102] Conceição, D.; Lopes, I.J.S.; Alipio, R.."An investigation into the impact of tower height variation on transmission line's backflashover rate considering different probability distributions" in International Conference on Lightning Protection (36th ICLP), Cape Town, Africa do Sul, 2022, pp. 1–6.
- [103] Conceição, D.; Alipio, R.; Lopes, I.J.S.; Chisholm, W. "A Comprehensive Analysis on the Influence of the Adopted Cumulative Peak Current Distribution in the Assessment of Overhead Lines Lightning Performance." *Energies* 2023, 16, 5836. <https://doi.org/10.3390/en16155836>.
- [104] R. Alipio, M. H. R. Duarte, J. C. A. Dias, and A. S. de Miranda, "Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical brazilian conditions," in *International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, Natal, Brazil, 2017, pp. 1–5.
- [105] S. Visacro and F. H. Silveira, "The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines," *IEEE*

Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 3, pp. 434–441, 2015, doi: 10.1109/TEMC.2014.2384029.

- [106] C. G. C. Alvarez, “Um Ambiente Computacional para Análise de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente às Descargas Atmosféricas (Dissertação de Mestrado),” Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEEL UFSJ/CEFET MG, Belo Horizonte, 2011.