

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

ROBES SILVÉRIO DE JESUS JÚNIOR

**MODELAGEM DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUA INFLUÊNCIA
NA SUPORTABILIDADE ELÉTRICA DOS ARRANJOS ISOLANTES
SOLICITADOS POR SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS**

FORMIGA-MG

2025

ROBES SILVÉRIO DE JESUS JÚNIOR

**MODELAGEM DE TORRES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E SUA INFLUÊNCIA
NA SUPORTABILIDADE ELÉTRICA DOS ARRANJOS ISOLANTES
SOLICITADOS POR SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal
de Minas Gerais como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: André Roger Rodrigues, Dr.

FORMIGA-MG

2025

Jesus Júnior, Robes Silvério de
J58m Modelagem de torres de linhas de transmissão e sua influência na suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes solicitados por sobretensões atmosféricas / Robes Silvério de Jesus Júnior – Formiga : IFMG, 2025.
121 p. :il. color.

Orientador: Prof. Dr. André Roger Rodrigues
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Formiga.

1. Descargas atmosféricas. 2. Impedância de surto. 3. Sobretensões impulsivas. 4. Suportabilidade elétrica de arranjos isolantes. 5. Transmissão de energia elétrica. 6. Modelagem computacional. 7. Models. 8. ATPDraw. I. Rodrigues, André Roger.
II. Título.

CDD 621.3

Robes Silvério de Jesus Júnior

**Modelagem de torres de linhas de transmissão e sua influência na
suportabilidade elétrica de arranjos isolantes solicitados por
sobretensões atmosféricas**

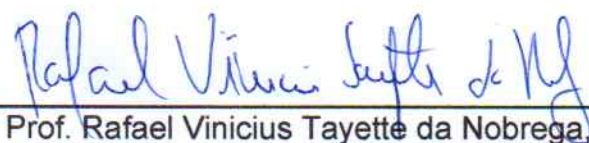
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Minas
Gerais como requisito para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.


Avaliado em: 31 de Janeiro de 2025.

Nota: 91

BANCA EXAMINADORA


Prof. André Roger Rodrigues, Dr.


Prof. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega, Dr.


Prof. Renan Souza Moura, Dr.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**. Toda honra e toda glória lhe sejam dadas eternamente, Senhor! Apesar de todas as dificuldades, medos e insegurança o Senhor sempre esteve comigo me sustentando e me ajudou a finalizar essa etapa. Muito obrigado Senhor!

À **Nossa Senhora das Graças**, que intermediou a graça e levou minhas súplicas ao Teu filho Jesus. Obrigado mãezinha do céu!

A minha amada esposa **Laiany**, que com seu companheirismo me ajudou de todas as formas possíveis, fazendo tudo ao seu alcance para que eu conseguisse finalizar este trabalho. Sou muito abençoado por ter você em minha vida.

Ao meu pai **Robes** e minha mãe **Patrícia** pelo amor, orações, carinho e principalmente pelo apoio indelével durante toda a caminhada. As minhas irmãs **Janaína** e **Jennifer** por serem companheiras e apoio sempre presente,

Ao professor **Dr. André Roger Rodrigues**, por sua inestimável orientação e apoio ao longo do desenvolvimento desta monografia. Obrigado pela paciência e entusiasmo com que enfrentou as minhas dúvidas e dificuldades no percurso. Sou profundamente grato por tudo. Que Deus lhe recompense em dobro.

Ao **IFMG campus Formiga e todos seus funcionários**, lugar que vivi ótimas experiências e que guardarei sempre em meu coração.

RESUMO

As descargas atmosféricas são fenômenos da natureza responsáveis pela ocorrência de distúrbios de elevada magnitude nos sistemas elétricos. A incidência de descargas elétricas nos sistemas de transmissão de energia elétrica resulta na injeção de uma corrente elétrica de surto com elevada magnitude percorrendo os componentes destes sistemas, tais como torres, cabos para-raios, cabos fases e sistema de aterramento. O produto da corrente elétrica atmosférica pela impedância dos componentes do sistema produz sobretensões de elevadas amplitudes que devem ser suportadas pelos sistemas isolantes, particularmente, as cadeias de isoladores. Nesse sentido, é de grande importância representar com precisão a impedância de surto das torres de linhas de transmissão tanto para a realização de projetos de coordenação de isolamento quanto para estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão perante sobretensões atmosféricas. Dessa forma, a utilização de modelos capazes de representar com precisão a impedância de surto de linhas de transmissão são necessários para reduzir o número de desligamentos em sistemas de transmissão. A partir desta motivação, este trabalho apresenta estudos investigativos acerca dos principais modelos matemáticos para determinação da impedância de surto de torres de linhas de transmissão, quer sejam baseados em métodos eletromagnéticos quer em ensaios experimentais. Para tanto, foi desenvolvido um modelo computacional capaz de realizar cálculos de impedância de surto de torres para cada modelo identificado na revisão bibliográfica, empregando-se o *software ATPDraw* e a linguagem *MODELS*. Os resultados obtidos foram validados utilizando-se valores de impedância de surto de torres em escala reduzida e também de torres reais. Adicionalmente, foram realizadas análises para avaliar as influências tanto da velocidade de propagação da descarga atmosférica na torre quanto do posicionamento dos arranjos isolantes na silhueta das torres na ocorrência do fenômeno de *backflashover*. As constatações são relevantes para obtenção de resultados mais realísticos e precisos em estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas, Impedância de surto, Sobretensões impulsivas, Suportabilidade elétrica de arranjos isolantes, Transmissão de Energia Elétrica, Modelagem computacional. *Models. ATPDraw.*

ABSTRACT

Atmospheric discharges are natural phenomena responsible for the occurrence of high-magnitude disturbances in electrical systems. The incidence of electrical discharges in power transmission systems results in the injection of a high-magnitude surge current through the components of these systems, such as towers, lightning protection wires, phase conductors, and grounding systems. The product of the atmospheric electric current and the impedance of the system components produces high-amplitude overvoltages that must be withstood by insulation systems, particularly insulator strings. In this context, it is of great importance to accurately represent the surge impedance of transmission line towers both for carrying out insulation coordination projects and for studies of the electrical performance of transmission lines under atmospheric overvoltages. Thus, the use of models capable of accurately representing the surge impedance of transmission lines is necessary to reduce the number of outages in transmission systems. Motivated by this need, this work presents investigative studies on the main mathematical models for determining the surge impedance of transmission line towers, whether based on electromagnetic methods or experimental tests. To this end, a computational model capable of performing surge impedance calculations for towers, based on each model identified in the literature review, was developed using the ATPDraw software and the MODELS language. The results obtained were validated using surge impedance values from scaled-down tower models and real towers. Additionally, analyses were conducted to evaluate the influences of both the propagation speed of the atmospheric discharge along the tower and the positioning of the insulating arrangements on the silhouette of the towers during the occurrence of the backflashover phenomenon. The findings are relevant for obtaining more realistic and accurate results in studies of the electrical performance of transmission lines.

Keywords: Atmospheric discharges, Surge impedance, Impulsive overvoltages, Electrical withstand capability of insulating arrangements, Power transmission, Computational modeling, MODELS, ATPDraw.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ilustração dos diferentes tipos de descargas atmosféricas, sendo : (a) Relâmpago nuvem-solo negativo; (b) Relâmpago nuvem-solo positivo; (c) Descarga dentro da própria nuvem e entre nuvens.	21
Figura 2 – Tipos de descargas às quais uma linha de transmissão está suscetível.	22
Figura 3 – Exemplo esquemático de ruptura por <i>flashover</i>	23
Figura 4 – Representação esquemática de ruptura por <i>backflashover</i>	24
Figura 5 - Ocorrência de <i>backflashover</i> em torres reais de linhas de transmissão.	25
Figura 6 – Diferentes tipos de silhuetas de torres de transmissão.	27
Figura 7 – Torre analisada por ZHANG <i>et al.</i> (2004) e impedâncias de surto obtidas por diferentes métodos.	28
Figura 8 – (a) Silhueta de torre de alta tensão; (b) Aproximação cilíndrica; (c) Aproximação cônica; (d) Aproximação por combinação de sólidos.	29
Figura 9 – Aplicação do método das imagens em um cilindro vertical.	30
Figura 10 – Configuração utilizada para determinação da impedância de surto de uma torre cilíndrica.	33
Figura 11 – Configuração utilizada para determinação da impedância de surto de uma torre cônica.	38
Figura 12 – (a) Silhueta de torre de linha de transmissão. (b) Representação cônica com corrente incidindo horizontalmente. (c) Representação cilíndrica com corrente incidindo horizontalmente.	42
Figura 13 – (a) Silhueta de torre de linha de transmissão. (b) Exemplificação da representação da torre pela combinação de dois cones truncados.	43
Figura 14 – Representação de sistema multicondutor.	44
Figura 15 – Representação da torre de transmissão por um sistema multicondutor vertical. ..	45
Figura 16 – Configuração utilizada para experimento de resposta a surto em condutores verticais.	47
Figura 17 – Sistema elétrico modelado para avaliação da influência da variação da altura da cadeia de isoladores e da velocidade de propagação do surto quando a torre é submetida a diferentes tipos de descargas atmosféricas.	54
Figura 18 – Configuração geométrica da torre típica para sistemas de transmissão trifásicos de 500 kV.	55
Figura 19 – Configuração dos cabos implementada no LCC.	56

Figura 20 – Representação da torre empregando dois trechos de linha de transmissão <i>Transposed Lines (Clarke type)</i> conectados em série.	57
Figura 21 – Curva de suportabilidade implementada para o arranjo isolante da linha de transmissão.	59
Figura 22 – Sistema de controle de disrupção da primeira torre do sistema implementado utilizando componentes <i>TACS</i> do <i>ATPDraw</i>	59
Figura 23 – Interface gráfica e dados de entrada dos atributos do <i>Model Lynce</i> que produz uma fonte de corrente do tipo dupla exponencial.	62
Figura 24 – Forma de onda de corrente de descarga do tipo dupla exponencial gerada no <i>software ATPDraw</i>	63
Figura 25 – Forma de onda dupla rampa gerada no <i>software ATPDraw</i>	64
Figura 26 – Ícone representativo do model criado para o valor da impedância de surto de torres por diferentes métodos de cálculo implementado no <i>ATPDraw</i>	64
Figura 27 – <i>Layout</i> da interface do model <i>ZTOWER</i> para determinação da impedância de surto de torres de linhas de transmissão a partir dos dados de entrada do usuário.	65
Figura 28 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa.	70
Figura 29 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial.	71
Figura 30 – Silhuetas e medidas das torres (dimensões em pés e polegadas) S-11, S-12, S-13, S-14, S-15, S-16, S-17, S-18 e S-19.	72
Figura 31 – Silhuetas e medidas das torres (em pés e polegadas) S-20, S-21, S-22, S-23, W-1, W-2, W-3, W-4 e W-5 e W-6.	73
Figura 32 – Silhuetas e medidas das torres (em pés e polegadas) S-51, S-52, S-53, S-54, S-55, S-56, S-57, S-58 e S-59.	73
Figura 33 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 60,5% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa.	77
Figura 34 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 60,5% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial.	77
Figura 35 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 79,4% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa.	78
Figura 36 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 79,4% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial.	79

Figura 37 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.	82
Figura 38 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.	83
Figura 39 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.	83
Figura 40 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.	84
Figura 41 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.	84
Figura 42 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.	85
Figura 43 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.....	86
Figura 44 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.....	87
Figura 45 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.....	87
Figura 46 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.....	88
Figura 47 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.....	88

Figura 48 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.....	89
Figura 49 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.	91
Figura 50 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.	91
Figura 51 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.	92
Figura 52 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.	92
Figura 53 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.	93
Figura 54 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.	93
Figura 55 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.	94
Figura 56 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.	95
Figura 57 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.	95
Figura 58 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.	96

Figura 59 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.	96
Figura 60 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.	97
Figura 61 – Esquema utilizado para realização do experimento utilizado na análise do caso 5.1.	99
Figura 62 – Torre em escala reduzida utilizada em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017).	102
Figura 63 – Torre 400 kV utilizada em Martinez-Velasco e Castro-Aranda (2005).....	106
Figura 64 – Configuração e dimensões da torre 500 kV utilizada em Hara, Yamamoto e Hayashi (1993).	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados médios das interrupções dos sistemas de geração e transmissão relativos ao sistema elétrico brasileiro.	16
Tabela 2 – Dados elétricos e geométricos dos cabos.....	55
Tabela 3 – Posicionamento dos cabos na torre modelada.	57
Tabela 4 – Equações vinculadas a cada saída do model ZTOWER.....	68
Tabela 5 – Análise do posicionamento da cadeia de isoladores dos perfis de torre em análise.	74
Tabela 6 – Análise do posicionamento da cadeia de isoladores dos perfis das torres com silhueta similar às torres da LT investigada neste trabalho.	76
Tabela 7 – Comparação dos valores de sobretensão, corrente crítica de descarga e tempo de disrupção na cadeia de isoladores posicionada à 60,5% da altura da torre para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.....	78
Tabela 8 – Comparação dos valores de sobretensão, corrente crítica de descarga e tempo de disrupção na cadeia de isoladores posicionada à 79,4% da altura da torre para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.....	79
Tabela 9 – Comparação entre parâmetros de desempenho elétrico da LT obtidos em cada cenário analisado quando a corrente de descarga é do tipo dupla rampa.	80
Tabela 10 – Comparação entre parâmetros de desempenho elétrico da LT obtidos em cada cenário analisado quando a corrente de descarga é do tipo dupla exponencial.....	80
Tabela 11 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de backflashover para isoladores instalados à 2/3 da altura da torre (dupla exponencial).....	85
Tabela 12 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de <i>backflashover</i> para isoladores instalados na altura real do perfil da torre (dupla exponencial).	89
Tabela 13 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de <i>backflashover</i> para isoladores instalados em 2/3 da altura da torre (dupla rampa).	94
Tabela 14 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de <i>backflashover</i> para isoladores instalados na altura real do perfil da torre (dupla rampa).	97
Tabela 15 – Parâmetros utilizados para o estudo computacional do caso 5.1.....	100
Tabela 16 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.1.	100
Tabela 17 – Parâmetros utilizados para o estudo computacional do caso 5.2.....	103

Tabela 18 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.2.	104
Tabela 19 – Parâmetros de entrada do usuário ao ZTOWER - Estudo do caso 5.3.	106
Tabela 20 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.3.	107
Tabela 21 - Parâmetros geométricos adicionados ao ZTOWER para estudo computacional do caso 5.4.	110
Tabela 22 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.4.	110

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. VISÃO GERAL.....	15
1.2. OBJETIVOS GERAIS	16
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.4. MOTIVAÇÃO	17
1.5. METODOLOGIA	18
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	20
2.2. TIPOS DE DESLIGAMENTOS NÃO PROGRAMADOS RESULTANTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO.....	21
2.2.1. O flashover.....	23
2.2.2. O backflashover	23
2.3. A IMPEDÂNCIA DE SURTO EM TORRES DE TRANSMISSÃO.....	26
2.3.1. Modelos matemáticos para cálculo da impedância de surto de torres de transmissão	28
2.3.2. Método de elementos finitos para obtenção da impedância de surto de torres.	48
2.4. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA DE DESCARGA NAS ANÁLISES DE DESEMPENHO ELÉTRICO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	50
3. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DO TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO INVESTIGADO.....	52
3.1. MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO.....	53
3.2. MODELAGEM COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE DISRUPÇÃO NOS ARRANJOS ISOLANTES	58
3.3. FONTES DE CORRENTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	61
3.3.1. Forma de onda de corrente de descarga do tipo dupla exponencial	61
3.3.2. Descarga tipo dupla rampa	63
3.4. MODEL ZTOWER.....	64
3.4.1. Atribuições e breve detalhamento do Model ZTOWER.....	65
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69

4.1.	ESTUDO 01 – ANÁLISE DE DESEMPENHO ELÉTRICO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO MODELADO PERANTE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS CONSIDERANDO CORRENTES DE DESCARGA DO TIPO DUPLA RAMPA E DUPLA EXPONENCIAL.	69
4.2.	ESTUDO 02 – INVESTIGAÇÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DA ALTURA DA CADEIA DE ISOLADORES NO DESEMPENHO ELÉTRICO DE L _{TS}	72
4.3.	ESTUDO 03 –ESTUDO DE DESEMPENHO ELÉTRICO DA LINHA DE TRANSMISSÃO ACOMETIDA POR <i>BACKFLASHOVER</i> COM ANÁLISE COMPARATIVA DE RESULTADOS OBTIDOS COM AS CADEIAS DE ISOLADORES POSICIONADAS A 2/3 DA ALTURA TOTAL DA TORRE E COM CADEIAS DE ISOLADORES À ALTURA IDENTIFICADA EM SILHUETAS DE TORRES REAIS.	75
4.4.	ESTUDO 04 – INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DA ONDA ELETROMAGNÉTICA NO DESEMPENHO ELÉTRICO DE L _{TS}	81
4.5.	ESTUDO 05 – APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODEL ZTOWER	98
4.5.1.	<i>CASO 5.1: Análise comparativa considerando valores de impedâncias de surto obtidas através de experimento com cilindro vertical de alumínio, baseadas nos resultados de Araújo, Piantini e Kurokawa (2017).....</i>	99
4.5.2.	<i>CASO 5.2: Análise comparativa com impedâncias de surto obtida através de experimento utilizando uma torre em escala reduzida realizados por Araújo, Piantini e Kurokawa (2017)</i>	102
4.5.3.	<i>CASO 5.3: Análise comparativa com impedâncias de surto de torre real 400Kv com base nos resultados obtidos por Martinez-Velasco e Castro-Aranda (2005).....</i>	105
4.5.4.	<i>CASO 5.4: Análise comparativa com impedâncias de surto de torre real 500 kV determinadas por Hara, Yamamoto e Hayashi (1993).....</i>	109
4.5.5.	<i>CONCLUSÕES GERAIS - ESTUDO 05.....</i>	111
5.	CONCLUSÕES.....	113
6.	TRABALHOS FUTUROS	114
7.	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE	121

1. INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem a finalidade de introduzir o tema central deste estudo. Aqui, são apresentadas as razões que fundamentaram a escolha desse tópico específico, sendo também descritos os objetivos estabelecidos para orientar o desenvolvimento do presente trabalho.

1.1. Visão Geral

As redes elétricas enfrentam dois tipos principais de sobretensões, que podem ser internas ou externas. As sobretensões internas são geradas por chaveamentos, como por exemplo, a energização de grandes bancos de capacitores, enquanto que as sobretensões externas são originadas por descargas atmosféricas. Esse último tipo de sobretensão é especialmente perigosa, pois dependendo da resposta dos sistemas de proteção, pode causar danos significativos aos equipamentos de transmissão e até riscos à segurança de seres humanos. Além disso, as descargas atmosféricas podem apresentar como consequências longos períodos de interrupção no fornecimento de energia elétrica.

Dados compilados sobre interrupções no sistema elétrico brasileiro revelam que as linhas de transmissão são os principais alvos destes tipos de desligamentos, com cerca de 68% das falhas ocorrendo nesse segmento, sendo os fenômenos naturais responsáveis por quase metade dessas interrupções. A Tabela 1, adaptada de Mamede Filho e Mamede (2016), apresenta uma comparação entre as causas, origens e duração dessas interrupções.

A análise desses dados mostra que as descargas atmosféricas, quando incidem sobre linhas de transmissão, são as principais responsáveis pelas falhas no fornecimento de energia. No sistema elétrico da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), essas interrupções não programadas representam cerca de 70% dos desligamentos, conforme estudo de Assis (2005). Além disso, um levantamento realizado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em 2007, em conjunto com empresas de diversos setores, entre eles o setor elétrico e de telecomunicações, estimou que os prejuízos anuais causados por descargas atmosféricas chegam a aproximadamente um bilhão de dólares.

Tabela 1 – Dados médios das interrupções dos sistemas de geração e transmissão relativos ao sistema elétrico brasileiro.

Causa das interrupções	Origem das interrupções	Duração das interrupções
Fenômenos naturais 48%	Linhas de Transmissão 68%	1-3 min 57%
Falhas em equipamentos 12%	Redes de distribuição 10%	3-15 min 21%
Falhas humanas 9%	Barramentos das subestações 7%	15-30 min 6%
Falhas diversas 9%	Transformadores 6%	30-60 min 4%
Falhas operacionais 8%	Geradores 1%	60 a 120 min 3%
Condições ambientais 6%	Próprio sistema 4%	> 120 min 9%
Falhas na proteção 4%	Consumidores 4%	
Objetos estranhos na rede 4%		

Fonte: Adaptada de Mamede Filho e Mamede (2016, p. 4).

Diante da gravidade dos impactos gerados por descargas atmosféricas, torna-se essencial o desenvolvimento de métodos e ferramentas mais precisas para modelar estes fenômenos e prever a resposta das linhas de transmissão e suas estruturas frente a esses eventos. Nesse processo, diversos aspectos do sistema elétrico são investigados, dentre eles a impedância de surto da linha e da torre de transmissão, a velocidade de propagação da onda eletromagnética, a quantidade e tipos de cabos de blindagem, os sistemas de aterramento e também o posicionamento dos arranjos isolantes nas torres. Portanto, este trabalho busca contribuir com estes estudos, propondo a validação de uma nova ferramenta computacional que visa otimizar a determinação da impedância de surto em torres de linhas de transmissão, bem como avaliar a influência de diferentes fatores na suportabilidade elétrica dessas estruturas, tais como a velocidade da descarga atmosférica e o posicionamento dos arranjos isolantes na torre.

1.2. Objetivos gerais

Esta monografia tem como objetivo geral validar, por meio de simulações computacionais, um novo modelo computacional desenvolvido empregando a linguagem *Models* do software *Alternative Transients Program - ATP* para determinar a impedância de surto em torres de linhas de transmissão, além de avaliar a influência da velocidade de descarga atmosférica e do posicionamento dos arranjos isolantes em um sistema de transmissão acometido por sobretensões atmosféricas.

1.3. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, como etapas intermediárias (objetivos específicos) citam-se:

1. Estudar os conceitos teóricos referentes a descargas atmosféricas e impedância de surto;
2. Desenvolver, utilizando o *software EMTP/ATP (Alternative Transient Program)* um modelo computacional para um sistema elétrico de transmissão de energia elétrica para estudos de casos acerca do desempenho elétrico de linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas;
3. Identificar a influência da variação da velocidade de propagação da onda eletromagnética na torre da LT e também do posicionamento dos arranjos isolantes quando o sistema elétrico é submetido a um evento de *backflashover*.
4. Desenvolver um modelo computacional que permita o cálculo automático da impedância de surto de uma torre de linha de transmissão empregando os principais métodos eletromagnéticos utilizando a linguagem *Models* do *software EMTP/ATP (Alternative Transient Program)*.

1.4. Motivação

As descargas atmosféricas são uma das principais causas de falhas em linhas de transmissão aéreas. Estima-se que entre 5% a 10% das falhas causadas por raios resultam em danos permanentes aos equipamentos do sistema de energia (SHORT, 1999). As extensas dimensões das linhas de transmissão implicam em uma probabilidade considerável de serem atingidas pela ocorrência direta de descargas atmosféricas, podendo resultar em desconexões devido às solicitações impostas aos isoladores pelas sobretensões associadas (VISACRO, 2005).

Para determinação de uma proteção racional e também econômica de equipamentos elétricos a serem usados em sistemas de energia e telecomunicação contra raios e seus efeitos, é de suma importância prever com precisão a tensão disruptiva nas cadeias de isoladores, provocadas pelas descargas atmosféricas. Em especial, a impedância de surto da torre emerge como um elemento crítico para a previsão das máximas sobretensões que podem estressar eletricamente as cadeias de isoladores, sendo que, se subdimensionada, pode cooperar para a ocorrência de uma falta fase-terra durante um surto atmosférico. Nesse contexto, este parâmetro desempenha um papel muito relevante na avaliação do desempenho das linhas de transmissão

atingidas por descargas atmosféricas, e sua determinação requer um enfoque criterioso (MOTA, 2017a).

De forma a obter melhores resultados de desempenho elétrico evitando-se a ocorrência de desligamentos e otimizar o dimensionamento dos sistemas isolantes das linhas de transmissão (LTs), estudos têm sido historicamente desenvolvidos procurando analisar a influência da impedância de surto e determinar sua magnitude por meio de diferentes métodos e técnicas eletromagnéticas (HARID; GRIFFITHS; HADDAD, 2006) (COSTA *et al.*, 2020) (STRACQUALURSI *et al.*, 2022). Assim, dado o impacto direto da impedância de surto na confiabilidade e na continuidade no serviço de transmissão de energia elétrica nas linhas aéreas, torna-se evidente a necessidade de desenvolver e empregar modelos computacionais que permitam determinar com maior precisão a impedância de surto para diferentes silhuetas de torres presentes no sistema de transmissão de energia brasileiro, contribuindo para a obtenção de resultados mais confiáveis em estudos de desempenho elétrico perante sobretensões atmosféricas, reduzindo desligamentos e tornando o sistema interligado nacional mais robusto e confiável.

1.5. Metodologia

Nos estudos computacionais realizados neste trabalho, um modelo para cálculo da impedância de surto das torres de LTs será apresentado. Também foi analisado se o posicionamento dos isoladores nas torres de linha de transmissão e a velocidade de propagação da onda eletromagnética oriunda de descargas atmosféricas exercem influência significativa no desempenho das linhas de transmissão, avaliando seu impacto na resposta transitória do sistema e na severidade das sobretensões que atingem os isoladores. Para isso, cinco estudos foram desenvolvidos: No primeiro estudo, foi realizada uma análise de desempenho do sistema de transmissão modelado com o posicionamento das cadeias de isoladores à $2/3$ da altura total da torre, abordagem comumente utilizada em estudos computacionais (RODRIGUES, 2017) (MOTA, 2011). No segundo, foi realizado uma análise comparativa do posicionamento da cadeia de isoladores à $2/3$ da altura da torre com o posicionamento em torres reais, sendo utilizadas 28 silhuetadas de torres para análise. Através das silhuetas com maior similaridade daquela modelada no sistema de transmissão deste trabalho, foram utilizados os valores críticos do posicionamento da cadeia de isoladores, ou seja, o posicionamento em que o arranjo isolante está instalado na maior altura em relação a altura total da torre, e também na menor altura, e assim foi avaliada a influência do posicionamento dos arranjos isoladores em um estudo de

desempenho frente ao *backflashover*, sendo este o terceiro estudo. No quarto estudo, realizou-se uma análise de sensibilidade variando a velocidade de propagação da onda eletromagnética na torre, de forma a avaliar a influência dessa velocidade no desempenho das LTs.

Por fim, no quinto estudo, de posse dos principais modelos teóricos e experimentais para cálculo da impedância de surto de torres obtidos na revisão bibliográfica, foi desenvolvido o *model* capaz de realizar o cálculo da impedância de surto utilizando esses diferentes métodos, validando seu funcionamento por meio de quatro estudos de caso.

1.6. Estrutura do trabalho

A fim de alcançar os objetivos estabelecidos, além do capítulo abordado, este trabalho de conclusão de curso possui a seguinte estrutura:

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os conceitos e princípios físicos e de eletromagnetismo aplicado ao estudo de sistemas de transmissão, os quais são essenciais para a compreensão do trabalho desenvolvido. É realizada uma revisão bibliográfica procurando identificar o estado da arte sobre o tema deste trabalho.

- Capítulo 3 – Modelagem matemática e computacional

O terceiro capítulo é dedicado à metodologia aplicada para o desenvolvimento deste trabalho científico, apresentando toda a modelagem matemática e computacional desenvolvida para os principais componentes de um sistema de transmissão em corrente alternada, com detalhamento de métodos e parâmetros eletromecânicos dos sistemas de transmissão de energia necessários para a realização de todo o trabalho.

- Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através da aplicação da modelagem computacional desenvolvida aos estudos de casos definidos, os quais foram utilizados para validação dos modelos desenvolvidos e empregados.

- Capítulo 5 – Conclusões

Este capítulo contém as considerações finais e as análises sintetizadas dos resultados obtidos, ressaltando as principais contribuições obtidas com o desenvolvimento deste trabalho.

- Capítulo 6 – Trabalhos futuros

Ao final, no sexto capítulo, são apresentadas sugestões e diretrizes para a continuidade do estudo em trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos fundamentais para o desenvolvimento do trabalho, oferecendo uma base teórica necessária para a compreensão do tema. Dentre os tópicos abordados, destacam-se: Descargas atmosféricas, velocidade de propagação da onda eletromagnética, *flashover* e *backflashover* e os métodos de obtenção da impedância de surto de torres de linha de transmissão.

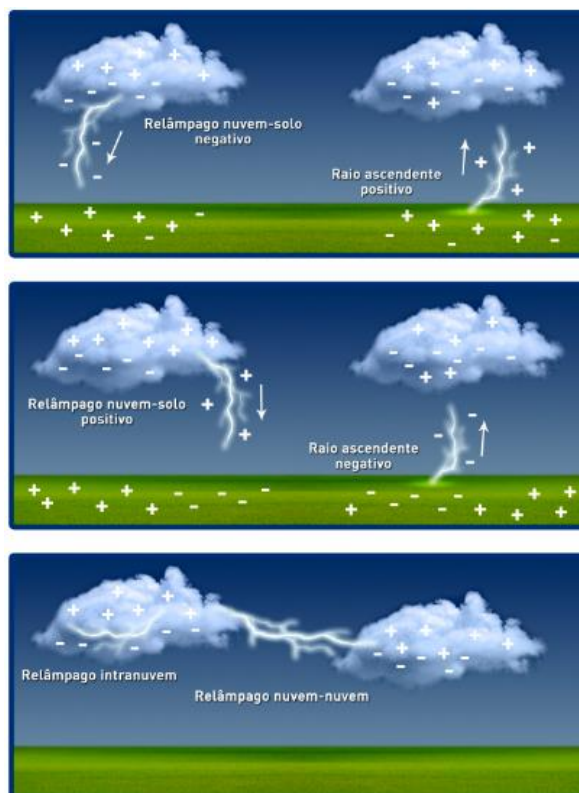
2.1. Descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas, comumente conhecidas como raios, são fenômenos naturais de descarga elétrica, tendo como características a alta intensidade de corrente, grande extensão e curta duração. Tais descargas acontecem quando nuvens em uma região da atmosfera acumulam uma quantidade de carga elétrica suficiente para criar campos elétricos tão intensos que ultrapassam a rigidez dielétrica do ar, ocorrendo assim a ruptura elétrica do mesmo e gerando o fenômeno, acompanhado do som característico, identificado popularmente como trovão. A ocorrência da descarga se dá mediante condições climáticas específicas, e sua propagação pode ser classificada em três tipos: Descargas nuvem-solo, descargas entre nuvens (nuvem-nuvem), descargas dentro da própria nuvem (intranuvem) (ELAT, 2019). A Figura 1 apresenta os tipos de descargas descritos.

No que diz respeito aos tipos de descargas, a que é especialmente relevante para a análise de desempenho em sistemas elétricos são as que ocorrem entre nuvens e o solo, podendo ser classificadas como descendente e ascendente, de acordo com o sentido empregado pelo canal que estabelece o trajeto ionizado, e positiva e negativa, de acordo com a polaridade da carga no momento da descarga (ELAT, 2019).

Quando atingem diretamente objetos, como estruturas e sistemas elétricos, as descargas atmosféricas têm o potencial de gerar diversos prejuízos, como incêndios e danos permanentes em equipamentos. O fenômeno é ainda mais crítico devido à complexidade na determinação das grandezas relacionadas a descarga, como exemplo a intensidade, que depende de diferentes fatores. Juntamente a isso, as características das correntes e sobretensões resultantes das descargas atmosféricas exibem amplas variações associadas a seus parâmetros, incluindo tempos de frente e de cauda, derivada máxima, amplitude e a presença de um ou mais picos, evidenciando sua natureza totalmente aleatória (RODRIGUES, 2017).

Figura 1 – Ilustração dos diferentes tipos de descargas atmosféricas, sendo : (a) Relâmpago nuvem-solo negativo; (b) Relâmpago nuvem-solo positivo; (c) Descarga dentro da própria nuvem e entre nuvens.



Fonte: Extraída de (ELAT, 2019).

Nesse sentido, é de grande relevância que análises de desempenho avaliando a suportabilidade das linhas de transmissões mediante sobretensões oriundas de descargas atmosféricas sejam realizadas utilizando modelos matemáticos que possam reproduzir, com a máxima precisão possível, os parâmetros distintivos presentes em correntes de descargas atmosféricas reais. No âmbito deste trabalho, foram utilizados os modelos de corrente de descarga dupla exponencial e também dupla rampa.

2.2. Tipos de desligamentos não programados resultantes de descargas atmosféricas em linhas de transmissão

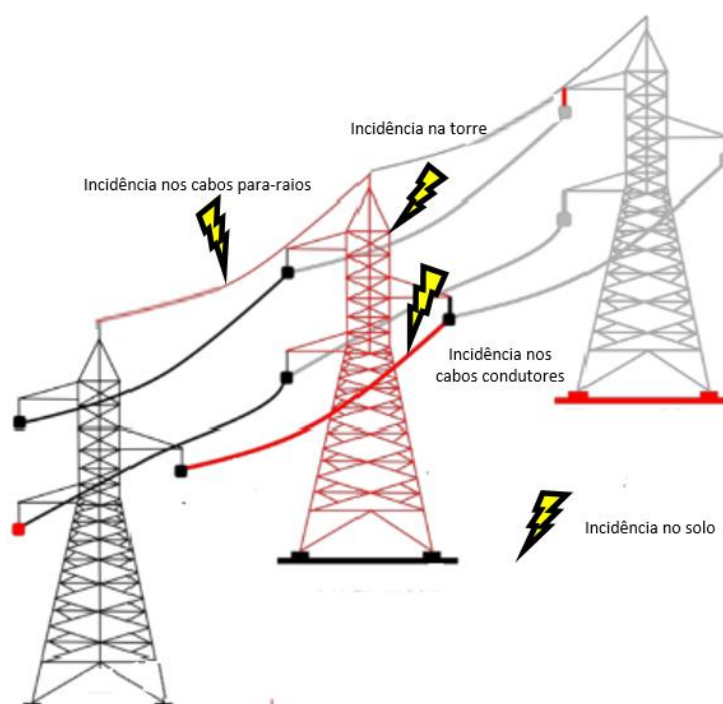
As descargas atmosféricas são as principais causas de desligamentos não programados em sistemas de transmissão de energia elétrica. Nos desligamentos provenientes de descargas em linhas aéreas, ocorre a formação de sobretensões nos arranjos isoladores ou indução de tensões entre seus condutores, fase-fase e/ou fase-para-raios, resultando na

superação do sistema isolante, podendo ser devido a uma descarga com incidência direta ou indireta (CUNHA, 2010).

Descargas indiretas referem-se aos eventos que se manifestam nas proximidades das linhas elétricas, gerando sobretensões induzidas nos condutores, com amplitudes que não atingem níveis muito elevados, sendo no máximo algumas centenas de quilovolts. Devido aos valores máximos das sobretensões alcançadas, esse tipo de incidência deve ser considerado em análises de sistemas de baixa e média tensão (RODRIGUES, 2017). Em virtude disso, as descargas indiretas não serão consideradas nesse estudo.

Já as descargas diretas são aquelas com incidência nos cabos para-raios, na torre ou nos cabos condutores, sendo esta a que apresenta a maior probabilidade de causar desligamentos não programados em linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 230 kV, que compõem a Rede Básica do Sistema Interligado Nacional - SIN. Dois mecanismos de disrupção elétrica podem ser destacados nesse tipo de incidência de descarga atmosférica: O *flashover*, que é a ruptura do isolamento nos cabos condutores pela incidência da descarga direta nos cabos das fases e o *backflashover*, que é quando a disrupção ocorre ao longo do contorno de uma ou mais cadeias de isoladores, originando uma falta fase-terra, e possível desligamento no sistema de transmissão. O *backflashover* ocorre por incidência de descargas diretas que incidem nos cabos para-raios ou na torre (CUNHA, 2010). A Figura 2 ilustra os fenômenos descritos.

Figura 2 – Tipos de descargas às quais uma linha de transmissão está suscetível.

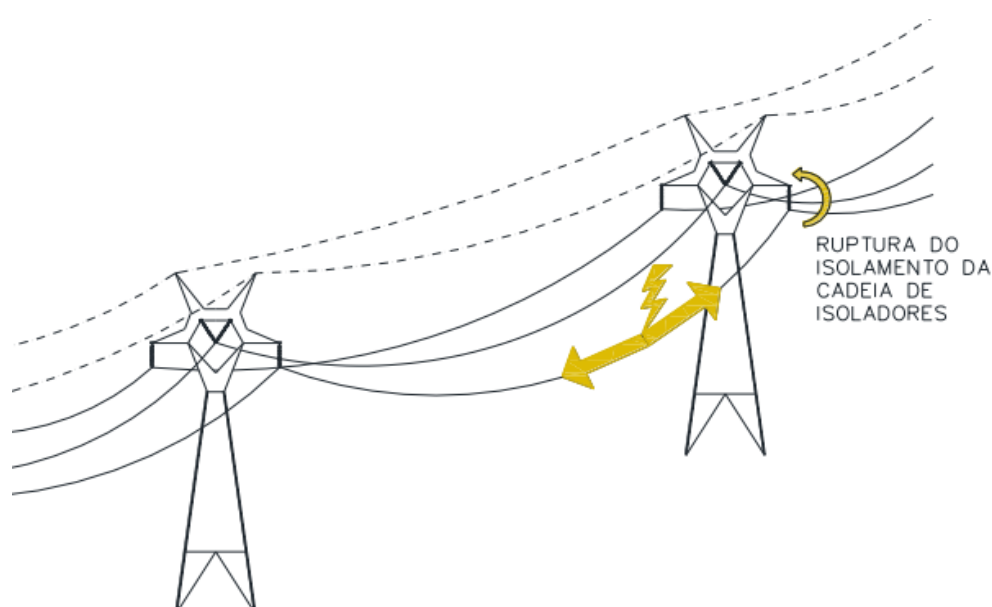


Fonte: Adaptado de (LUEJAI, SUWANASRI e SUWANASRI, 2021).

2.2.1. O *flashover*

O fenômeno do *flashover* manifesta-se quando uma descarga elétrica atinge diretamente o condutor energizado. Essa disrupção resulta de uma deficiência na blindagem fornecida pelos cabos guardas, podendo ser desencadeada por descargas laterais, pela quantidade insuficiente de cabos de blindagem ou ainda por sua localização não otimizada, gerando um arco elétrico entre o condutor e a terra e causando a perda do isolamento da linha de transmissão.

Figura 3 – Exemplo esquemático de ruptura por *flashover*.



Fonte: Extraído de (LIMA, 2020).

Na Figura 3 é representada uma incidência direta no meio do vão. Ao ocorrer a descarga, juntamente a onda de corrente injetada no sistema de transmissão, também ocorre a propagação simultânea ao longo do condutor uma onda de tensão cuja magnitude pode ser muito elevada. Caso a resistência dielétrica do isolador for ultrapassada devido a essa sobretensão externa gerada, há a possibilidade de uma descarga disruptiva, resultando no estabelecimento de um arco elétrico que conecta o condutor fase à torre. Esse evento pode provocar danos significativos aos componentes da linha e, em situações extremas, levar a curtos-circuitos e interrupções no fornecimento de energia (VISACRO, 2005).

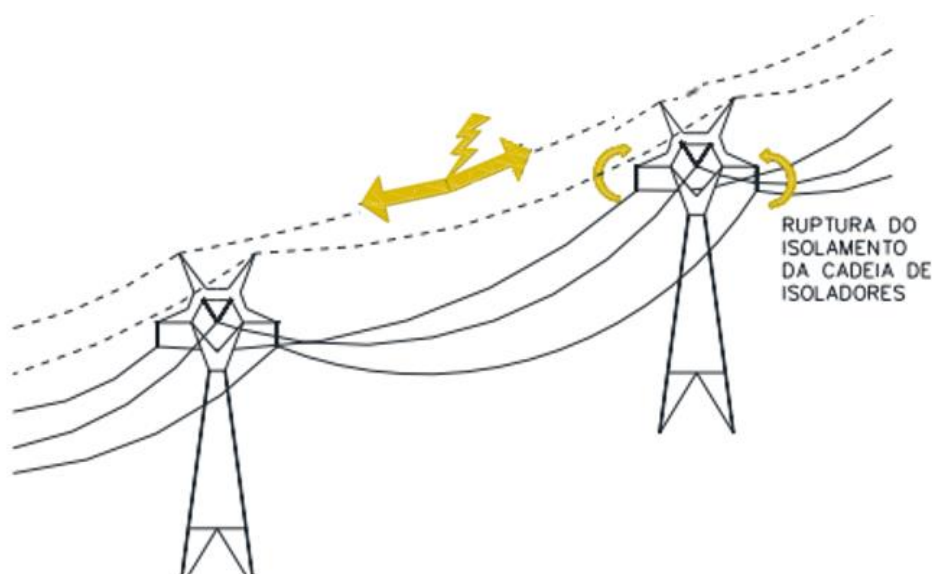
2.2.2. O *backflashover*

Para a proteção das linhas de transmissão, o uso de cabos para-raios ou cabos de blindagem é uma estratégia de proteção que diminui a probabilidade de descargas atmosféricas

atingirem diretamente os condutores de fase. A ocorrência do *backflashover* se dá quando descargas atmosféricas atingem tais cabos ou mesmo a torre diretamente. As sobretensões resultantes têm o potencial de originar a formação de um arco elétrico em uma ou mais cadeias de isoladores, dispostas entre a torre e uma fase específica da linha de transmissão (VISACRO,2005).

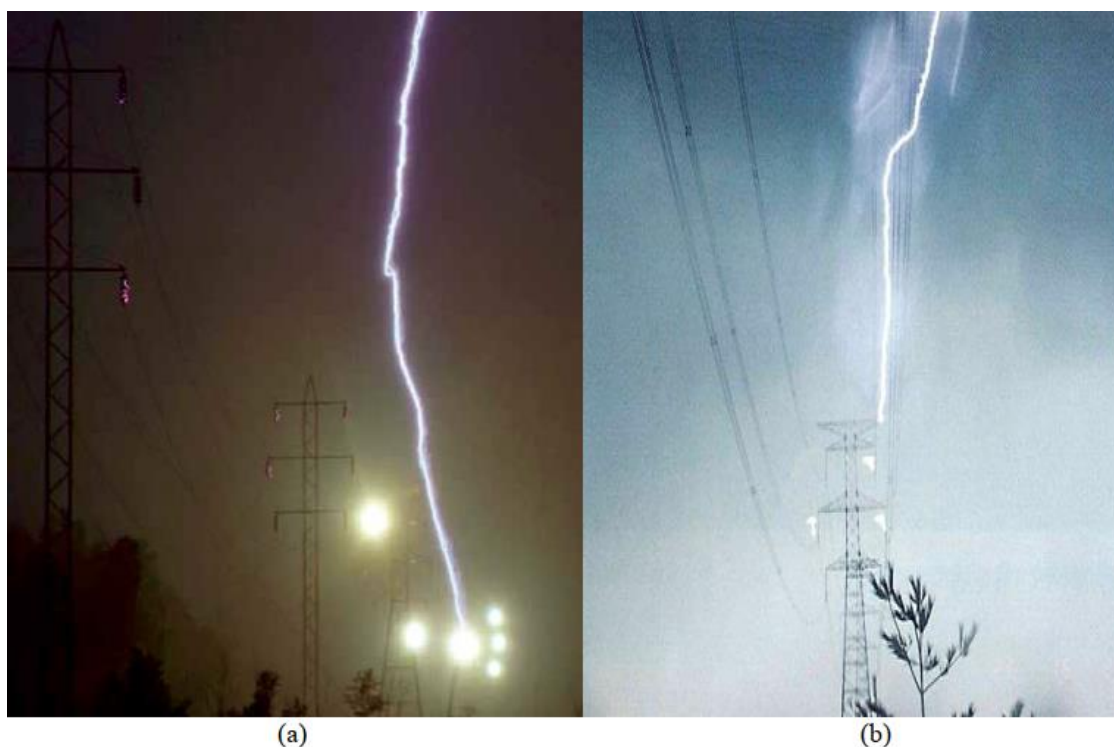
A silhueta da torre, a impedância de surto da torre e também do aterramento, os elementos dispostos em sua estrutura (posição dos cabos fase e de blindagem), a quantidade de condutores em cada fase e o tipo da linha de transmissão (circuito simples ou duplo) afetam diretamente a forma como o sistema responderá e também nas sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores quando ocorre uma descarga atmosférica (LIMA, 2020). O comportamento decorrente da descarga atmosférica atingindo os cabos de blindagem é representado na Figura 4.

Figura 4 – Representação esquemática de ruptura por *backflashover*.



Fonte: Extraído de (LIMA, 2020).

A Figura 5-(a) ilustra uma torre trifásica de circuito duplo sendo atingida por uma descarga atmosférica, coincidindo com o instante em que ocorre *backflashover* nos conjuntos de isoladores de várias torres subsequentes. Já na Figura 5-(b) a descarga atmosférica atinge a estrutura da torre e o mesmo fenômeno é observado na cadeia de isoladores da torre atingida.

Figura 5 - Ocorrência de *backflashover* em torres reais de linhas de transmissão.

Fonte: Extraído de (ARAÚJO, 2018).

Na situação onde a descarga atinge os cabos para-raios, a corrente do surto se propaga, sendo direcionada até as torres adjacentes do local de incidência, que estão aterradas. Ao chegar na torre, a corrente se divide em três componentes devido a diferença das impedâncias de surto da torre, do cabo de blindagem e de seu prolongamento até a torre subsequente. Ou seja, parte da corrente é refletida na direção do ponto de origem da descarga nos cabos, outra parte prossegue pelo cabo de blindagem até a torre seguinte e a última parcela de corrente desloca-se pela torre em direção ao solo. Ao se deslocar pela torre em direção ao solo, essa corrente encontra novamente uma descontinuidade entre a impedância da torre (Z_T) e a impedância de aterramento (Z_A), dividindo-se novamente. Parte da corrente elétrica de surto é dissipada no solo, enquanto outra fração percorre a torre, ascendendo em direção ao seu topo devido a reflexão sofrida. Ao atingir o ponto de conexão entre a cadeia de isoladores e a torre, a parte ascendente da corrente de surto gera uma sobretensão transitória com amplitude capaz de superar a suportabilidade do arranjo isolante, resultando na ruptura do isolamento, criando uma situação de curto-circuito entre a fase e a terra, sendo que este mecanismo de interrupção no arranjo isolante é definido pelo termo *backflashover* (VISACRO, 2005; RODRIGUES, 2017).

A onda refletida, que causa o fenômeno de ruptura dielétrica nos isoladores e é produzida no ponto de descontinuidade, é definida matematicamente nas equações (2.1) e (2.2).

$$\Gamma = \frac{Z_A - Z_T}{Z_A + Z_T} \quad (2.1)$$

$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad (2.2)$$

Onde:

Γ é o coeficiente de reflexão.

Z_A e Z_T são, respectivamente, a impedância de aterramento e a de surto da torre.

V_R e V_I são, respectivamente, onda de tensão refletiva e onda de tensão incidente.

Observa-se pelas equações dispostas acima que a obtenção do valor correto da impedância de surto da torre tem fundamental importância na análise do fenômeno de *backflashover*, uma vez que, em conjunto com a impedância de aterramento da torre, é determinante da amplitude da sobretensão que solicita à cadeia de isoladores. Dessa forma, vê-se que a relação adequada entre a impedância de surto da torre, a impedância do solo e outras impedâncias do sistema é crucial para evitar reflexões excessivas que poderiam desencadear o *backflashover*.

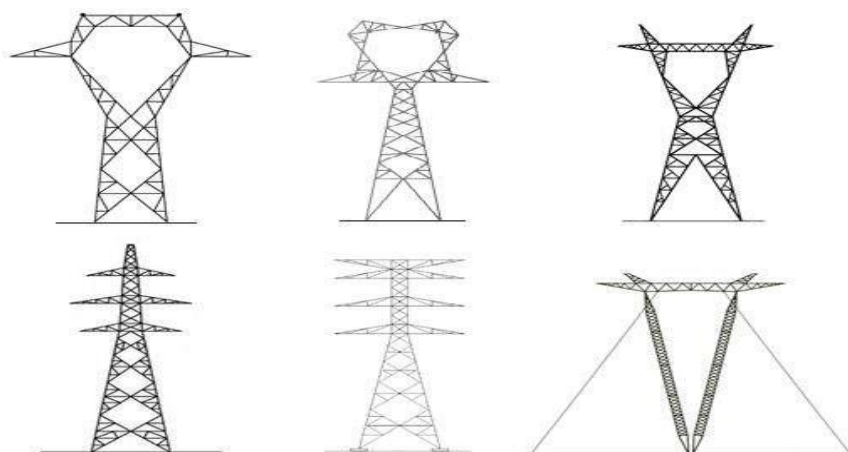
2.3. A impedância de surto em torres de transmissão

A impedância de surto de torres é a medida da oposição oferecida por uma torre de transmissão à propagação de surtos eletromagnéticos, representando um dos parâmetros cruciais para a determinação da capacidade da torre em controlar e atenuar os efeitos de sobretensões, como as provenientes de descargas atmosféricas (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017). Esta grandeza desempenha um importante papel na modelagem de linhas de transmissão, exercendo influência direta sobre o comportamento dinâmico do sistema durante eventos de surto atmosférico, sendo essencial para a determinação da capacidade de uma torre em resistir e amortecer os efeitos adversos de surtos elétricos, fomentando a integridade e o desempenho das linhas de transmissão. Uma impedância de surto adequada é fundamental para garantir a estabilidade operacional e a confiabilidade do sistema elétrico como um todo (MARTINEZ-VELASCO, 1997).

A determinação da impedância de surto pode ser realizada através de métodos teóricos e matemáticos, que abrangem procedimentos analíticos e numéricos, assim como o emprego de abordagens experimentais. Historicamente, diversas abordagens têm sido sugeridas a fim de se determinar a impedância de surto de torres. Contudo, devido à grande variação de

silhuetas, configurações, alturas, seções retas e número de circuitos suportados pelas estruturas existentes, exemplificados na Figura 6, os resultados provenientes de diferentes métodos analíticos apresentam variações consideráveis e de modo geral, apresentam discordâncias em relação aos valores obtidos por métodos experimentais. Esse fenômeno ocorre devido à estreita vinculação entre a impedância de surto e as características geométricas, tanto em forma quanto em dimensões, das torres de linhas de transmissão. Outro fator determinante para elevadas discrepâncias nos resultados obtidos com diferentes métodos de estimativa da impedância de surto da torre é o fato de que muitos métodos foram baseados em uma silhueta específica de torre para uma tensão definida, incorrendo em limitações de cada modelo para outras geometrias de torres. A imprecisão no cálculo dos valores desse parâmetro resulta em previsões erroneamente estimadas das tensões na torre, podendo acarretar equívocos nos projetos de proteção e de coordenação do isolamento. Essa inadequação pode ter um impacto negativo significativo no desempenho elétrico da linha de transmissão, uma vez que alterações de 10% nos valores calculados da impedância de surto resultam em uma mudança de até 20% nas taxas de interrupção devido descargas atmosféricas (ZHANG *et al*, 2004; MOTA, 2017a).

Figura 6 – Diferentes tipos de silhuetas de torres de transmissão.

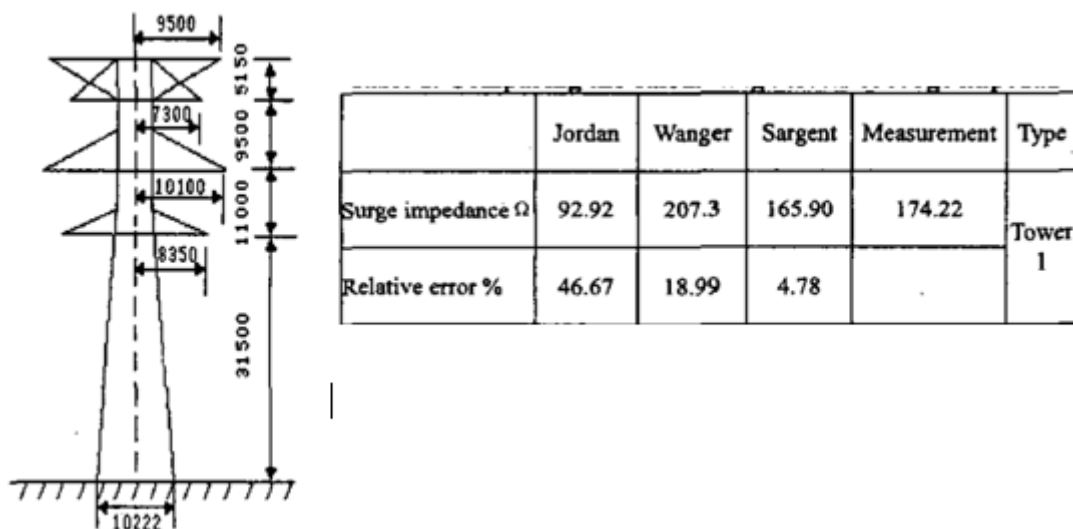


Fonte: Extraído de (MOTA, 2017a).

No trabalho de ZHANG *et al.* (2004), foi obtida a impedância de surto por três diferentes métodos para a torre apresentada na Figura 7, sendo que o erro percentual variou de 4,78% até 46,67% do valor efetivamente medido, evidenciando que mediante uma descarga atmosférica, a determinação adequada do parâmetro é fundamental na previsão de ocorrência ou não de *backflashover*, visto a variação significativa na estimativa da sobretensão de solicitação na cadeia de isoladores.

Baseado no que foi disposto, nota-se que a determinação da impedância de surto por uma metodologia única e genérica é algo de difícil obtenção, não havendo uma resolução matemática geral que se adeque a qualquer silhueta ou configuração geométrica de torre. Dessa forma, muitas pesquisas foram desenvolvidas e diversas metodologias de equacionamento foram propostas, sendo apresentadas nesse trabalho as principais formas de obtenção da impedância de surto.

Figura 7 – Torre analisada por ZHANG *et al.* (2004) e impedâncias de surto obtidas por diferentes métodos.



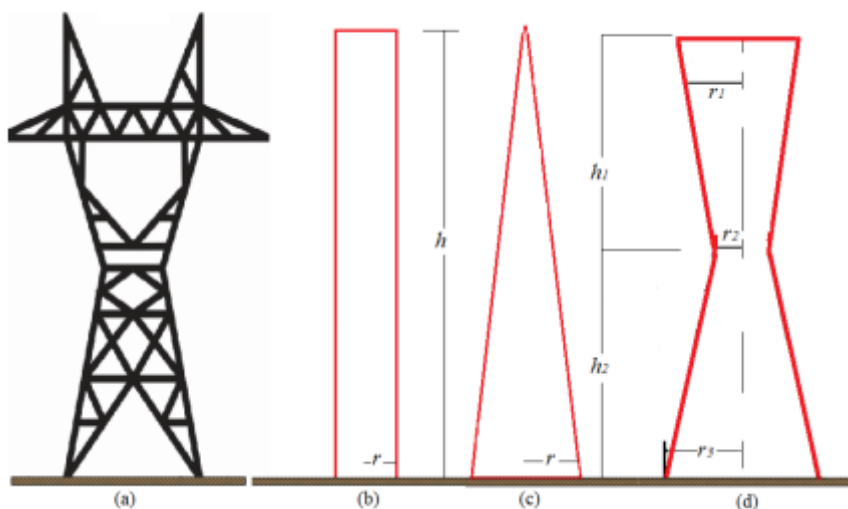
Fonte: Extraído de (ZHANG *et al.*, 2004).

2.3.1. Modelos matemáticos para cálculo da impedância de surto de torres de transmissão

A impedância de surto de torres guarda uma estreita relação com as formas e dimensões geométricas dessas estruturas. Entretanto, a presença de contornos complexos nas torres dificulta a realização precisa do cálculo da impedância de surto (MOTA, 2011).

Dentre as formas de obtenção da impedância de surto, se destacam: Medição real, desenvolvimento de protótipos de torres em escala reduzida, e o equacionamento por aproximação de sólidos geométricos. Neste último, as silhuetas das torres são representadas por modelos cilíndricos, cônicos ou combinações entre estes, como exemplificado na Figura 8. Essa abordagem parte do pressuposto de que a corrente se distribui de forma uniforme sobre a estrutura, indo da base ao topo da torre, e que a velocidade de propagação ao longo dela é igual à velocidade da luz (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017).

Figura 8 – (a) Silhueta de torre de alta tensão; (b) Aproximação cilíndrica; (c) Aproximação cônica; (d) Aproximação por combinação de sólidos.



Fonte: Extraído de (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017).

A seguir, serão apresentados os principais métodos teóricos e que serão posteriormente utilizados para implementação do *model* desenvolvido neste trabalho.

2.3.1.1. Formulação de Jordan

Jordan foi o responsável pela primeira formulação teórica da impedância de surto de torres e suas análises se mantiveram como referência por quase três décadas para determinação desse parâmetro. Ao realizar sua pesquisa, foi adotada a abordagem de representar a torre de transmissão como um cilindro vertical, com altura igual à da torre real e raio equivalente médio igual ao da base da torre. Em resumo, foi obtida por meio da teoria de campo eletromagnético a expressão (2.3) para determinação do valor da impedância de surto de torres (JORDAN, 1934).

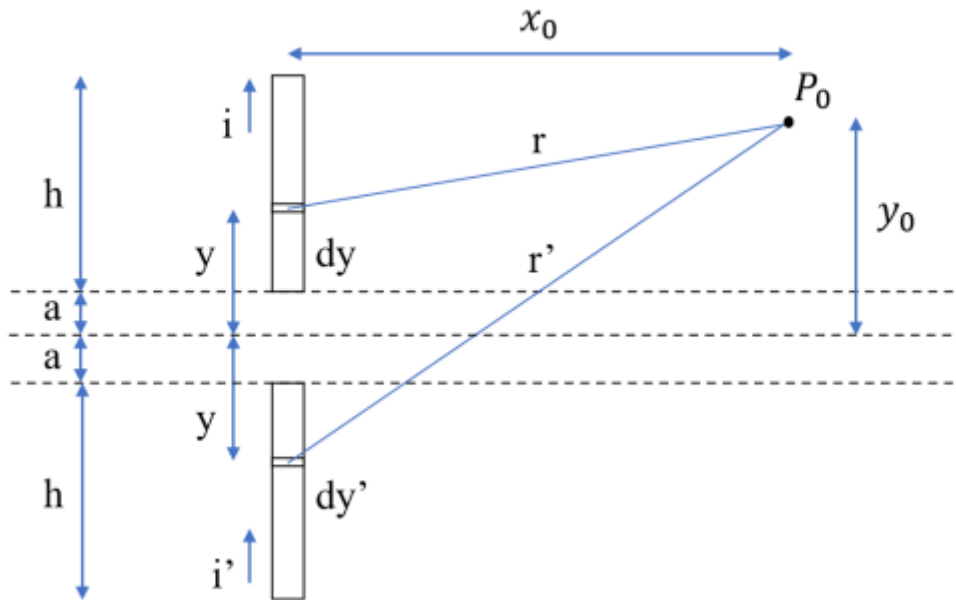
$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{h}{r} \right) + 90 \left(\frac{r}{h} \right) - 60 \quad (2.3)$$

Sendo h a altura e r o raio do cilindro que representa a torre.

Descobriu-se mais tarde que a equação desenvolvida por Jordan apresentava uma inconsistência. O problema identificado na abordagem de Jordan está relacionado à orientação da corrente no condutor vertical de imagem, a qual foi selecionada em oposição à direção da corrente real. Isso resulta em uma contribuição subtrativa ao vetor potencial magnético, ao invés da contribuição aditiva que seria esperada para a correta aplicação do método das imagens,

resultando em uma subestimação da impedância de surto da torre (DE CONTI *et al.*, 2006). No trabalho de Takahashi (1994) a equação foi revista e o erro foi corrigido, chegando a uma nova equação, que é detalhada em Conti *et al.* (2006). A seguir, são apresentados os passos utilizados para realizar a adequação da abordagem.

Figura 9 – Aplicação do método das imagens em um cilindro vertical.



Fonte: Extraído de (DA SILVA, 2022).

Neste cenário, apresentado na Figura 9, a torre é representada por um cilindro vertical, com raio r e altura h . A corrente i é a corrente no condutor real, i' a corrente da imagem, tendo a mesma direção e sinal. O vetor do potencial magnético total no ponto (x_0, y_0) deve ser determinado pela soma algébrica dos vetores gerados pelas correntes i e i' , sendo obtido pela equação (DE CONTI *et al.*, 2006):

$$\vec{A} = \vec{A}_r + \vec{A}_i \quad (2.4)$$

Onde:

- \vec{A}_r representa o potencial magnético vetorial vinculado ao condutor real.
- \vec{A}_i denota o potencial magnético vetorial relacionado ao condutor de imagem.

Por conseguinte, baseado nos sistemas de coordenadas apresentados, é proposta por De Conti *et al.* (2006) a equação (2.5).

$$\vec{A} = \frac{\mu i}{4\pi} \left[\int_a^{h+a} \frac{dy}{\sqrt{(y_o - y)^2 + x_o^2}} + \int_a^{h+a} \frac{dy}{\sqrt{(y_o - y)^2 + x_o^2}} \right] \hat{y} \quad (2.5)$$

Onde:

- \hat{y} trata-se do potencial magnético vetorial do condutor real.
- μ é a permeabilidade magnética do material que constitui a torre.

Para a resolução da integração, é requerida a aplicação do método de substituição.

Sendo a primeira integral correspondente ao termo \vec{A}_r e a segunda a \vec{A}_i da equação (2.4).

Após a obtenção da solução e sabendo que $dL = \vec{A} dy/i$ pode ser determinada a expressão (2.6) (DE CONTI *et al.*, 2006).

$$dL = \frac{\mu}{4\pi} \left\{ \ln \left[\frac{(h + a - y_o) + \sqrt{(h + a - y_o)^2 + x_o^2}}{(a - y_o) + \sqrt{(a - y_o)^2 + x_o^2}} \right] + \ln \left[\frac{(h + a + y_o) + \sqrt{(h + a + y_o)^2 + x_o^2}}{(a + y_o) + \sqrt{(a + y_o)^2 + x_o^2}} \right] \right\} dy_o \quad (2.6)$$

Para a obtenção da indutância L por unidade de comprimento do condutor vertical, é necessário efetuar a integração por partes da equação (2.6) no intervalo $a \leq y_o \leq a + h$, com $x_o = r$, seguido pela divisão do resultado por h . A condutividade do solo é considerada infinita, logo $a = 0$ (DE CONTI *et al.*, 2006). É obtido, portanto, a expressão (2.7).

$$L = \frac{h\mu}{4\pi} \left[2 \ln \left(\frac{2h + \sqrt{4h^2 + r^2}}{r} + \frac{r}{h} - \frac{\sqrt{4h^2 + r^2}}{h} \right) \right] [H/m] \quad (2.7)$$

A multiplicação da equação (2.7) pela velocidade da luz proporciona a obtenção da impedância de surto da torre. Notavelmente, ao levar em conta a condição da altura da torre ser muito maior que o seu raio ($h \gg r$), a simplificação da equação resulta na forma mais concisa, representada pela equação (2.8) (DE CONTI *et al.*, 2006).

$$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{h}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Onde:

- h é a altura.
- r o raio do cilindro que representa a torre.

2.3.1.2. Formulação de Wagner e Hileman

No final da década de 50, Wagner e Hileman (1959) desenvolveram um trabalho acerca da resposta transitória de uma torre de formato cilíndrico diante de um surto de corrente caracterizado por uma forma de onda do tipo degrau. Os pesquisadores apresentaram uma formulação que descreve a impedância de surto da torre considerando a ação do tempo. A velocidade com que o surto se propagava ao longo da torre foi considerada equivalente à velocidade da luz.

Na Figura 10, é ilustrada a configuração eletrogeométrica para a determinação da impedância de surto. Considerou-se uma torre com formato cilíndrico de altura h e raio r em uma superfície perfeitamente condutora, tendo dS como o elemento diferencial da superfície do cilindro, β sendo o ângulo formado entre dS e o eixo horizontal, $d\beta$ o elemento diferencial do ângulo, e r' a distância entre o ponto P e dS (MOTA, 2017a).

Baseado nas informações dispostas, pode-se definir o campo elétrico no ponto P pela equação (2.9).

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\oint \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} d\vec{S} \quad (2.9)$$

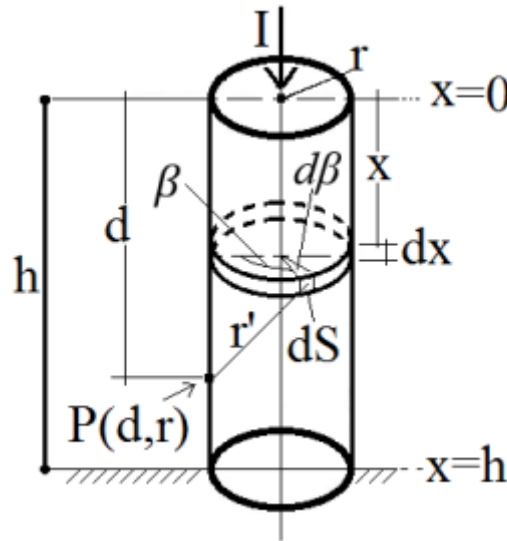
Onde:

- \vec{E} é o campo elétrico no ponto P;
- \vec{A} é o vetor potencial magnético;
- t é o tempo.

Aplicando então a forma de onda retangular quando $x = 0$ e no tempo $t = 0$, a densidade de corrente superficial (J_s) pode ser determinada pela equação (2.10) (MOTA, 2017a).

$$J_s = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.10)$$

Figura 10 – Configuração utilizada para determinação da impedância de surto de uma torre cilíndrica.



Fonte: Extraído de (MOTA, 2017).

Ao considerar o fragmento dx do modelo, a descrição do vetor potencial magnético no ponto (d, r) pode ser formulada como (2.11) (MOTA, 2017a):

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \iiint \frac{J_s(x, \beta, t - \frac{r'}{c})}{r'} dS \quad (2.11)$$

Definindo os termos:

- c é a velocidade da luz ;
- r' é a distância entre e dS o ponto (d, r) ;
- dS é o elemento diferencial de superfície $(dx \cdot r \cdot d\beta)$;

Com isso, a distância r' é definida como:

$$r' = \sqrt{(x - d)^2 + r^2} \quad (2.12)$$

Assim, ao aplicar a atribuição de J_s (2.10) e r' (2.12) na equação (2.11) e substituindo os termos definidos, é obtida a expressão (2.13) (MOTA, 2017a):

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{I}{2\pi r} \frac{r dx \cdot d\beta}{\sqrt{(x - d)^2 + r^2}} \quad (2.13)$$

Ao qual os limites de integração são determinados pela expressão (2.13), incorporando os efeitos de atraso da onda de corrente durante a propagação pela torre, resultando em (2.14) (MOTA, 2017a).

$$y = \frac{1}{2}(d + ct) + \frac{r^2}{2(d - ct)} \quad (2.14)$$

Realizando a integração da equação (2.13), com o limite y , é encontrada a expressão (2.15) (MOTA, 2017a):

$$\vec{A} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\log(ct - d) - \log\left(-d + \sqrt{d^2 - x^2}\right) \right] \quad (2.15)$$

Ao derivar o termo (2.15) em relação ao tempo, é obtida a expressão (2.16) (MOTA, 2017a):

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{c}{(ct - d)} \quad (2.16)$$

Dessa forma, é possível reformular a equação (2.9) para obtenção da equação (2.17) conforme Mota (2017a):

$$\int_0^d \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\frac{\mu_0 I c}{4\pi} \ln\left(\frac{ct}{ct - d}\right) \quad (2.17)$$

Aplicando a atribuição de valores de altura do cilindro – que é a representação da torre – muito maiores que o raio do mesmo ($h \gg r$) e que $h = ct$ (com velocidade do surto igual a velocidade da luz) é obtida a equação (2.18) (MOTA, 2017a).

$$\int_0^d \vec{E} \cdot d\vec{S} = -I \left[60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{ct}{r}\right) \right] \quad (2.18)$$

A impedância de surto transitória é finalmente determinada pelo termo entre colchetes da equação (2.18). Para a retirada da abordagem temporal, os autores determinaram o valor da impedância no instante de tempo com valor máximo de tensão, que pela forma de onda em degrau considerada para as análises é obtida no tempo $t = \frac{2h}{c}$, resultando na equação (2.19) (MOTA, 2017a).

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) \quad (2.19)$$

Utilizando a abordagem de multicondutores proposta por Hara e Yamamoto (1996), também é possível definir (2.20):

$$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_e} \right) \quad (2.20)$$

Onde:

- $r_e = r_t^{\frac{1}{3}} r_b^{\frac{2}{3}}$ sendo que r_t e r_b são os raios no topo e na base da torre cilíndrica, respectivamente.

2.3.1.3. Formulação de Sargent e Darveniza para torres cilíndricas

Essa abordagem de determinação da impedância de surto é uma variação do trabalho de Wagner e Hileman (1959). Foi identificado que esse método, quando utilizado para a obtenção da impedância em modelos reais, determina valores significativamente mais elevados do que aqueles obtidos em medições. Devido a tais discrepâncias, em Sargent e Darveniza (1969) duas características quanto a formulação foram destacadas:

- O equacionamento proposto por Wagner e Hileman (1959) determina a resposta da torre variante no tempo, indicando que a resposta a outras formas de onda de corrente pode ser diferente da resposta à onda retangular.
- A utilização de um cilindro equivalente para determinar a impedância de todos os modelos de torres é inadequada, sugerindo que seja necessário buscar outras representações.

Também duas propostas foram implementadas. A primeira é a obtenção da impedância de surto a partir de uma corrente com forma de onda em rampa utilizando formulação semelhante a implementada em Wagner e Hileman (1959).

Considerando a configuração disposta na Figura 10, a aplicação de uma onda de corrente em rampa na torre em $x = 0$ e no instante $t = 0$ atrasa a resposta da densidade de corrente superficial, sendo determinada por (2.21) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$J_S \left(x, t - \frac{r'}{c} \right) = \frac{K}{2\pi r} \left(t - \frac{x}{c} - \frac{r'}{c} \right) \quad (2.21)$$

Onde:

- K representa a magnitude da forma de onda da corrente em rampa.

Usando a mesma nomenclatura definida na Figura 10, o vetor de potencial magnético no ponto (d, r) é definido empregando-se (2.22) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{K}{2\pi r} \left(t - \frac{x}{c} - \frac{r'}{c} \right) \frac{r dx d\beta}{r'} \quad (2.22)$$

Como anteriormente, deve-se considerar nos limites de integração o efeito de atraso da onda de corrente durante a propagação pela torre, de forma que ao se resolver a integração é obtida a equação (2.23) (SARGENT; DARVENIZA, 1969).

$$A = \frac{\mu_0 K}{4\pi} [(ct - d) \ln(ct - d) - ct - (ct - d) \times \ln(-d + \sqrt{d^2 + r^2}) - \sqrt{d^2 + r^2}] \quad (2.23)$$

A expressão (2.24) é obtida derivando (2.23) em relação ao tempo (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\mu_0 K}{4\pi} \left[\ln(ct - d) - \ln(-d + \sqrt{d^2 + r^2}) \right] \quad (2.24)$$

Integrando a equação 2.24 considerando a altura do cilindro muito maior do que o raio ($h \gg r$) é obtida a expressão (2.25) (SARGENT; DARVENIZA, 1969).

$$\int_0^d \vec{E} d\vec{S} = -Kt \left[60 \cdot \left\{ \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) - 1 + \frac{r}{2ct} + \left(\frac{r}{2ct} \right)^2 \right\} \right] \quad (2.25)$$

Novamente o termo entre colchetes refere-se a impedância de surto transitória, e assim como na abordagem anterior, com o objetivo de estabelecer um valor constante de impedância de surto, escolhe-se o instante em que ocorre a tensão máxima ($t = \frac{2h}{c}$). Portanto,

a impedância de surto de uma torre cilíndrica, quando sujeita a uma corrente com forma de onda em rampa, pode ser expressa pela equação (2.26) (SARGENT; DARVENIZA, 1969).

$$Z = 60 \left[\left(\ln \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.26)$$

Adicionalmente, utilizando a abordagem de multicondutores proposta por Hara e Yamamoto (1996), também é possível definir:

$$Z = 60 \left[\left(\ln \sqrt{2} \frac{2h}{r_e} \right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

Onde:

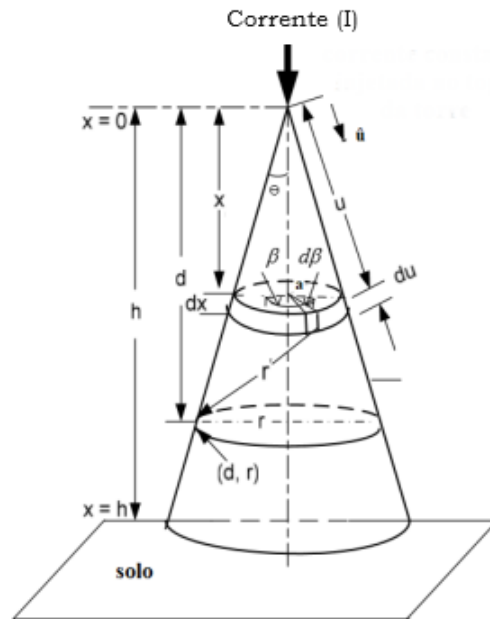
- $r_e = r_t^{\frac{1}{3}} r_b^{\frac{2}{3}}$ sendo que r_t e r_b são os raios no topo e na base da torre cilíndrica, respectivamente.

2.3.1.4. Formulação de Sargent e Darveniza para torres cônicas

Baseado nas observações descritas na formulação de Sargent e Darveniza para torres cilíndricas, uma segunda proposta é apresentada, ao qual é realizada a análise da impedância de uma torre representada por um modelo cônico desconsiderando a ação transitória, sendo uma alternativa à representação cilíndrica de torres.

Na Figura 11 é disposto o modelo a ser considerado. Neste, d é a medida vertical do topo até um ponto genérico onde o campo elétrico será obtido, h e r correspondem à altura e o raio do cone, respectivamente. A dimensão x é a distância do disco diferencial que define a área diferencial de espessura dx , θ é o meio ângulo de abertura do cone, dS é o elemento diferencial da superfície do cone, β representa o ângulo entre a linha de referência e o elemento superficial de área, sendo $d\beta$ o diferencial desse ângulo. A distância r' é medida entre o elemento de área e o ponto genérico (d, r). Os componentes u e du correspondem, respectivamente, à distância entre o topo da torre cônica e o disco diferencial (dS) e a espessura do disco ao longo de sua longitude. A fim de auxiliar a determinação do vetor potencial magnético no ponto (d, r), são definidas algumas constantes, sendo elas: i.) $m = \tan \theta$; ii.) $S = \sin \theta$; iii.) $K = \cos \theta$ (ARAÚJO, 2018; SARGENT; DARVENIZA, 1969).

Figura 11 – Configuração utilizada para determinação da impedância de surto de uma torre cônica.



Fonte: Adaptado de (ARAÚJO, 2018).

A contribuição do vetor potencial magnético ($|\delta \vec{A}|$), considerando a contribuição de um elemento de área, dado por $du \cdot d\beta$, em um ponto arbitrário (d, r) , pode ser expresso por (2.28) (SARGENT; DARVENIZA, 1969).

$$|\delta \vec{A}| = \frac{\mu_0 J_S \left(x, t - \frac{r'}{c} \right)}{4\pi r'} r du \cdot d\beta \quad (2.28)$$

Assim, substituindo (2.28) em (2.21), obtém-se:

$$|\delta \vec{A}| = \frac{\mu_0 I}{4\pi 2\pi} \frac{du d\beta}{r'} \quad (2.29)$$

Com base na Figura 11, determina-se que a distância r' é definida como (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$r' = \sqrt{\left(\frac{1}{(K)^2} \right) (x^2 + d^2 - 2b \cdot d \cdot x)} \quad (2.30)$$

Com b sendo dado por:

$$b = K^2(1 + m^2 \cos\beta) \quad (2.31)$$

Portanto a representação do vetor potencial magnético no ponto (d, r) , orientado na direção do vetor unitário \hat{u} , é fornecida por (2.32) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\vec{A}_u = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^y \frac{Kbdud\beta}{\sqrt{x^2 + d^2 - 2b \cdot d \cdot x}} \hat{u} \quad (2.32)$$

Ao calcular o limite de integração y , é levado em consideração o efeito de atraso, resultando em (2.33) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\frac{y}{Kc} + \frac{\sqrt{y^2 + d^2 - 2bdy}}{Kc} = t \quad (2.33)$$

Ao isolar o limite y na equação (2.33) e resolvendo a equação (2.32) com esse limite, determina-se a expressão (2.34):

$$\vec{A}_u = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{2\pi} \int_0^{2\pi} b[\ln(Kct - bd) - \ln(1 - b)d]d\beta \quad (2.34)$$

Calculando o termo diferencial de \vec{A}_u no tempo, é obtida a expressão (2.35) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\frac{\partial \vec{A}_u}{\partial t} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Kcb}{Kct - bd} d\beta \quad (2.35)$$

Por meio da variação temporal do vetor de potencial magnético (equação 2.35) é possível determinar o campo elétrico \vec{E}_{iu} , através da extensão u , resultando na equação (2.36) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\int_{u=0}^{u=ct} \vec{E}_{iu} \cdot d\vec{u} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{ct} \frac{Kcb}{Kct - bd} d\beta \quad (2.36)$$

A resolução da primeira integral resulta em (2.37) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\int_{u=0}^{u=ct} \vec{E}_{iu} \cdot d\vec{u} = -\frac{30}{2\pi} I \int_0^{2\pi} \ln\left(\frac{1}{2 S^2 \sin^2(\beta/2)}\right) d\beta \quad (2.37)$$

A resolução da segunda integral permite obter (2.38) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$\int_{u=0}^{u=ct} \vec{E}_{iu} \cdot d\vec{u} = -I \left[60 \ln\left(\frac{\sqrt{2}}{S}\right) \right] \quad (2.38)$$

A impedância de surto para uma torre representada por um cone, com uma corrente vertical com forma de onda em degrau injetada, é expressa pelo termo entre colchetes na equação (2.38), ou seja, traduzindo-se na expressão (2.39) (SARGENT; DARVENIZA, 1969):

$$Z_T = 60 \ln\left(\frac{\sqrt{2}}{S}\right) \quad (2.39)$$

A equação pôde ainda ser determinada em termos da altura e raio do cone resultando em (2.40) (MOTA, 2017):

$$Z_T = 60 \ln\left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{h^2 + r^2}}{r}\right) \quad (2.40)$$

Onde:

- r o raio do cone que representa a torre.

Em Stracqualursi *et al.* (2022) é apresentada uma variação da equação (2.40), para a utilização do método desenvolvido por Sargent & Darveniza para silhuetas de torre que necessitam da representação por junção de diferentes sólidos. Para sua utilização, a torre deve ser representada por um cone na sua parte inferior e por um cilindro na parte superior. Dessa forma, é necessário obter o valor do raio equivalente da parte superior e inferior. A equação (2.41) apresenta a forma de obtenção do raio equivalente (r_{eq}):

$$\ln(r_{eq}) = \frac{1}{r_b - r_t} \{r_1 [\ln(r_b) - 1] - r_2 [\ln(r_t) - 1]\} \quad (2.41)$$

Onde:

- r_{eq} é a raio equivalente.
- r_b e r_t são os raios na base e no topo da torre, respectivamente.

Com o raio equivalente determinado, é possível obter a impedância de surto através da equação (2.42).

$$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h_T}{r_e} \right) - 60 \quad (2.42)$$

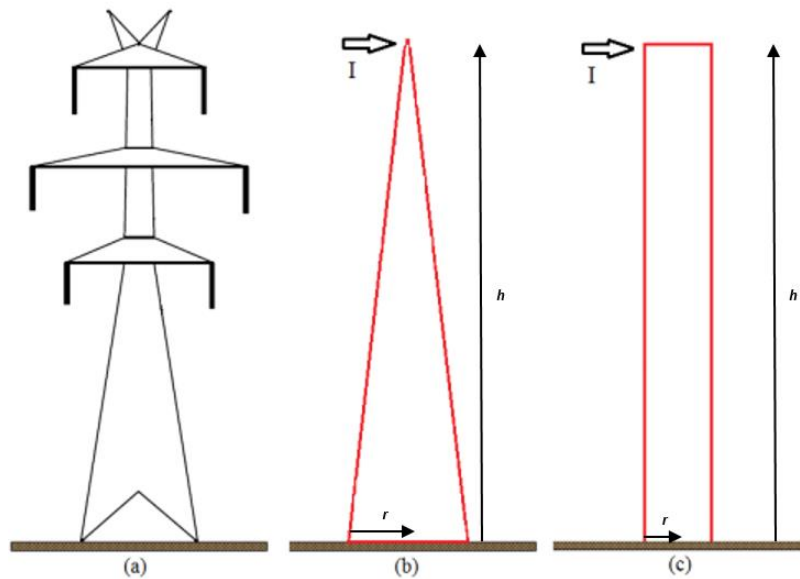
Onde:

- h_T é a altura total (soma da altura do cilindro e do cone utilizados para representar a torre).
- r_{eq} é obtido através da resolução da equação (2.41).

2.3.1.5. Formulação de Chisholm, Chow e Srivastava

No início da década de 1980, Chisholm, Chow e Srivastava (1983) realizaram um estudo de sensibilidade de torres de linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão. Para a determinação da impedância de surto, foi considerado que as descargas de corrente elétrica incidiam horizontalmente na torre, conforme representação na Figura 12. Essa abordagem se destaca por ser diferente de todas as propostas de determinação da impedância de surto de torres apresentadas até então, que consideraram a descarga incidindo verticalmente na torre.

Figura 12 – (a) Silhueta de torre de linha de transmissão. (b) Representação cônica com corrente incidindo horizontalmente. (c) Representação cilíndrica com corrente incidindo horizontalmente.



Fonte: Extraído de (ARAÚJO, 2018).

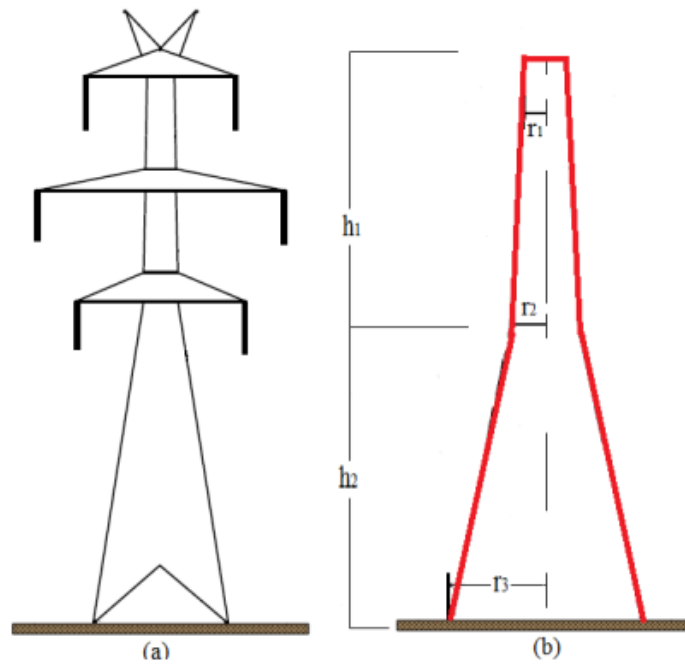
O cálculo da impedância de surto quando a descarga incide horizontalmente para a representação cônica - sendo essa recomendada pelo CIGRÈ (1991) - e para a representação cilíndrica são realizados empregando-se as equações (2.43) e (2.44), respectivamente (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1983).

$$Z_T = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right] \quad (2.43)$$

$$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + r^2}}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.44)$$

Dois anos depois, os autores apresentaram uma formulação para a impedância de surto ao aproximar a torre por meio de uma configuração geométrica composta por uma combinação de dois cones truncados (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985), conforme exemplificado na Figura 13, sendo esta configuração também recomendada pelo CIGRÈ (1991).

Figura 13 – (a) Silhueta de torre de linha de transmissão. (b) Exemplificação da representação da torre pela combinação de dois cones truncados.



Fonte: Extraído de (ARAÚJO, 2018).

Baseado nessa configuração geométrica, a impedância de surto da torre representada por este modelo é definida pela equação (2.45) (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985).

$$Z_T = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{(h_1 + h_2)^2} \right) \right) \right] \quad (2.45)$$

Onde:

- Raios do topo, meio e da base da torre são representados pelos termos r_1 , r_2 e r_3 , respectivamente.
- A altura da base até o meio da torre é representada por h_1 , enquanto h_2 refere-se à altura do meio até o topo da torre.

2.3.1.6. Formulação recomendada pelo CIGRÈ

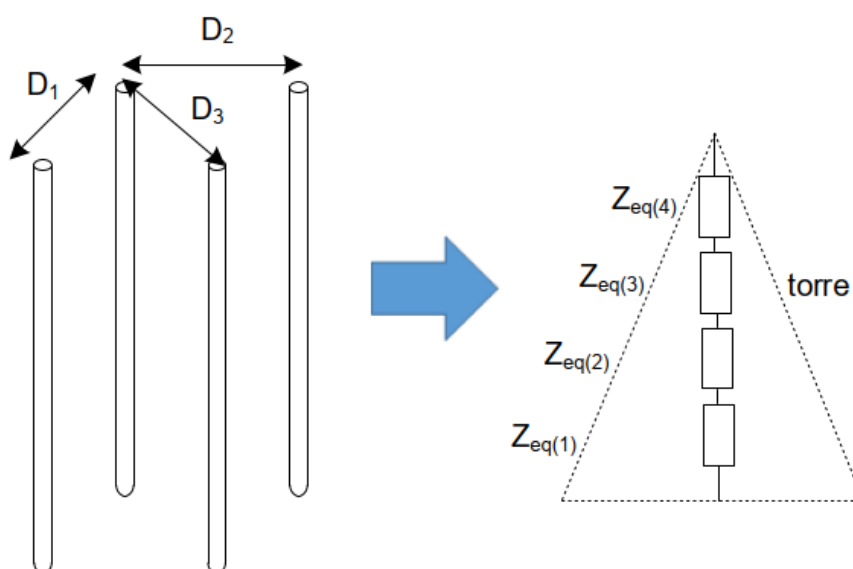
Além das formulações recomendadas pelo CIGRÈ expressas nas equações (2.44) – para silhueta de torre que se assemelha a um formato cilíndrico – e (2.45) – para silhuetas que representadas por combinações de sólidos geométricos – desenvolvidas em Chisholm, Chow e Srivastava (1983, 1985), uma variação da equação (2.43) é sugerida em Ametani *et al.* (1994) para o caso no qual $h \gg r$, sendo simplificada e reescrita na forma da equação (2.46).

$$Z_T = 60 \ln\left(\frac{h}{r}\right) \quad (2.46)$$

2.3.1.7. Formulação de Ametani

Ametani *et al.* (1994) apresentou uma proposta de determinação da impedância de surto de torres por meio da disposição de um sistema multicondutor disposto verticalmente, conforme mostrado na Figura 14. Essa formulação surgiu devido ao fato de que as metodologias anteriores não consideravam na determinação da impedância de surto da torre, as variações mais acentuadas que a estrutura pode apresentar, como por exemplo, a distância entre as pernas de apoio da torre. Em sua formulação, a torre foi dividida em 4 seções, tendo cada segmentação entre braços da torre sendo representada por uma impedância específica, conforme representação na Figura 14 (ARAÚJO; PIANTINI; KUOKAWA, 2017; MIRANDA, 2019).

Figura 14 – Representação de sistema multicondutor.



Fonte: Extraído de (MIRANDA, 2019).

Na representação do sistema multicondutor, as distâncias D_1, D_2, D_3 variam de acordo com o trecho e a geometria da torre analisada. Assim, realiza-se a aproximação do sistema multicondutor para um condutor cilíndrico equivalente por seção, o que permite a determinação da impedância de surto para o segmento da torre. Na Figura 15 é disposta uma silhueta de torres de transmissão com seu respectivo modelo representado por cilindros, considerando impedâncias de surto para cada trecho da torre. As distâncias R_B e D_B são, respectivamente, o raio de cada perna e a distância entre pernas adjacentes à base da torre. Já R_{T_i} e D_{T_i} correspondem às mesmas medidas obtidas em $h = h_i$ (sendo $i = 1, 2, 3, 4$).

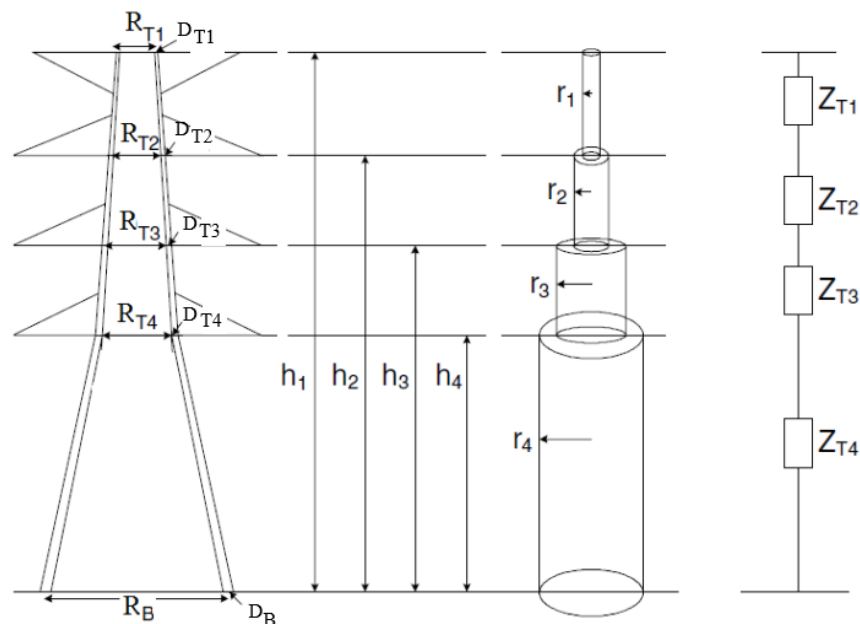
Mediante a obtenção do raio equivalente para o sistema multicondutor, a determinação da impedância de surto de todo o sistema multicondutor pode ser obtida empregando a equação (2.47) (AMETANI *et al*, 1994).

$$Z_T = 60 \left[\ln \frac{(h + \sqrt{h^2 + r_{eq}^2})^2}{r_{eq}(2h + \sqrt{4h^2 + r_{eq}^2})} + \frac{3r_{eq} + \sqrt{4h^2 + r_{eq}^2} - 4\sqrt{h^2 + r_{eq}^2}}{2h} \right] \quad (2.47)$$

Onde:

- $r_{eq} = \sqrt[4]{R_i D_i^3 \sqrt{2}}$ sendo $i = (1, 2, 3, 4)$ conforme Figura 15.

Figura 15 – Representação da torre de transmissão por um sistema multicondutor vertical.



Fonte: Adaptado de (MARTINEZ, 2005).

Em Ametani *et al.* (1994) também foi demonstrada outra expressão (equação 2.48) para torre representada por um condutor simples, a qual fornece resultados semelhantes àqueles obtidos com o modelo de Jordan(1934) para a condição na qual a porção inferior do condutor está no solo, que é considerado como um condutor perfeito.

$$Z_T = \ln \frac{[\sqrt{(r^2 + h^2)} + h]^2}{[\sqrt{(r^2 + 4h^2)} + 2h]r} + \frac{\{\sqrt{(r^2 + 4h^2)} + \frac{3r}{2} - 2\sqrt{(r^2 + h^2)}\}}{h} \quad (2.48)$$

Esta expressão acima pode ser apropriadamente simplificada quando $r \ll h$ obtendo a equação (2.49) (Ametani *et al.*, 1994).

$$Z_T = \ln \left(\frac{h}{er} \right) \quad (2.49)$$

Onde:

- r o raio do cilindro que representa a torre.
- $e = 2,71828$ (constante matemática de Euler).

Em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017) foi sugerida a utilização do raio proposto por Hara e Yamamoto (1996) para sistemas multicondutores, resultando na equação (2.50).

$$Z_T = \ln \left(\frac{h}{er_e} \right) \quad (2.50)$$

Onde:

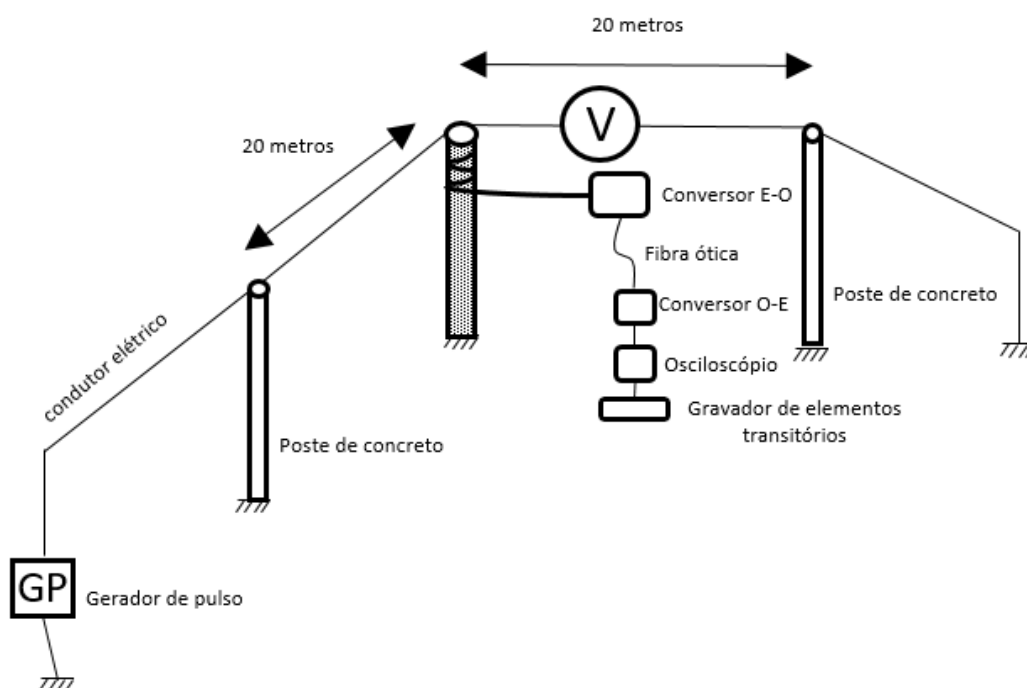
- $r_e = r_t^{\frac{1}{3}} r_b^{\frac{2}{3}}$ sendo que r_t e r_b são os raios no topo e na base da torre cilíndrica, respectivamente.
- $e = 2,71828$ (constante matemática de Euler).

2.3.1.8. Formulação de Hara

Em 1996, Hara e Yamamoto (1996) analisaram experimentalmente as características de resposta a surtos em condutores. É apresentada uma formulação obtida empiricamente para a determinação da impedância de surto para uma torre representada por um cilindro vertical. Na Figura 16, é apresentado o arranjo da configuração utilizada para a medição.

No experimento, o cilindro foi posicionado verticalmente no solo. As medições de resposta ao surto foram calculadas através da parte superior do condutor. As correntes de teste foram injetadas a partir de um gerador de impulso de 2 kV, por meio de um condutor elétrico de 50 metros de comprimento, que foi utilizado para a medição da corrente elétrica (I). Um segundo condutor, foi utilizado para a medição da tensão elétrica (V), estendido perpendicularmente ao condutor que medirá a corrente, e aterrado a 50 metros do cilindro. Os postes de concreto são utilizados para manter os condutores bem esticados e alinhados em relação ao chão, a 20 metros do cilindro. A corrente e a tensão foram medidas no topo do cilindro, sendo que o sinal foi convertido de sinal elétrico para óptico por um transdutor, e depois transmitido para um sistema eletricamente desconectado do circuito em teste, o qual armazena a corrente e a tensão (HARA; YAMAMOTO, 1996).

Figura 16 – Configuração utilizada para experimento de resposta a surto em condutores verticais.



Fonte: Adaptado de (HARA E YAMAMOTO, 1996).

Para a determinação da impedância, foi utilizado um cilindro de aço com 15 metros de comprimento e 51 mm de diâmetro. Uma corrente do tipo degrau com frente de onda de 10 nanosegundos foi aplicada e assim foram medidos os dados de tensão e corrente refletidas no topo do condutor. A velocidade de propagação da corrente aplicada foi numericamente igual a velocidade da luz. A razão entre valores da tensão e corrente máximos apurados nesse experimento determinaram a impedância de surto da torre, e para validação dos dados obtidos,

os testes foram repetidos para cilindros de diferentes alturas utilizando o mesmo procedimento descrito anteriormente. Com os resultados obtidos, foi determinada a equação empírica para cálculo da impedância de surto de um condutor vertical, mostrada na equação (2.51) (HARA; YAMAMOTO, 1996).

$$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r} \right) - 2 \right] \quad (2.51)$$

Diante dos métodos apresentados, observa-se que a determinação da impedância de surto das torres a partir de seus dados geométricos pode variar devido as diferentes formas geométricas utilizadas para aproximar a geometria da torre analisada. Cada método possui particularidades que influenciam os resultados, evidenciando a necessidade de escolha criteriosa conforme a aplicação desejada. Dando continuidade a essa análise, a próxima subseção abordará o Método de Elementos Finitos (MEF), reconhecido por produzir maior precisão e detalhamento na modelagem das torres para obtenção da impedância de surto.

2.3.2. Método de elementos finitos para obtenção da impedância de surto de torres

Os métodos analíticos descritos no tópico anterior resultam em valores constantes da impedância de surto para toda a estrutura, sendo um fator que dificulta a análise precisa dos efeitos da corrente e tensão originadas de uma descarga atmosférica, uma vez que por tratarem a torre por aproximações geométricas, não refletem de forma exata seu comportamento eletromagnético intrínseco. Em alturas estratégicas, como nas proximidades dos arranjos isoladores, a determinação precisa das sobretensões resultam em projetos de coordenação de isolamento e resultados de desempenho elétrico de linhas de transmissão mais coerentes com os fenômenos eletromagnéticos reais que ocorrem nas linhas de transmissão atingidas por descargas atmosféricas. Diante disso, surge a alternativa de utilização de métodos numéricos, como o Método de Elementos Finitos (MEF) aplicado à determinação da impedância de surto de torres de linhas de transmissão (MOTA, 2017b).

Na metodologia proposta por Mota (2011), foi utilizado o *software* FLUX, em sua versão 3D. Por meio de sua utilização e dispondo das informações geométricas da torre, foi possível modelá-la, assim como realizar a aplicação do método de elementos finitos em tais modelos. O processo demanda que a torre seja modelada da forma mais semelhante possível de uma torre real, que pode ter centenas de metros e detalhes estruturais na medida de milímetros, além das características elétricas dos materiais que a compõem, tornando assim a aplicação do método um processo bastante trabalhoso e que requer alto nível de detalhamento geométrico e

construtivo da torre. O processo de aplicação do MEF é iniciado quando uma tensão constante e uma corrente com forma de onda triangular é aplicada na torre, ambas com valores unitários, gerando campos elétricos e magnéticos que se dissipam por toda a sua estrutura e arredores. É necessária a definição de fronteiras externas para que o MEF possa estabelecer as condições de contorno, ao qual foi utilizada a técnica de truncamento de limites externos, técnica frequentemente aplicada quando a região infinita circundante ao objeto de estudo não exerce uma influência significativa nos resultados desejados. O próximo passo consistiu na divisão da torre modelada em elementos finitos propriamente ditos. O modelo de torre importado no *software* é inserido em uma malha, ao qual é realizada a divisão do modelo em elementos. Tais elementos são divididos pelo algoritmo em formas tetraédricas e assim são executadas equações diferenciais em cada elemento, aplicando interpolações até o erro entre as equações diferenciais realizadas seja mínimo possível. A solução obtida pelo sistema de equações é a intensidade e distribuição do campo elétrico e do campo magnético gerado na simulação (MOTA, 2011; 2017b).

A partir do processo descrito, para a determinação da impedância de surto é realizada a determinação da energia magnética (E_M) e a eletrostática (E_E) que originou o campos obtidos pela aplicação do MEF, através das equações (2.53) e (2.54) (MOTA, 2017b).

$$E_M = \int_0^v \frac{1}{2} \mu H^2 dv \quad (2.52)$$

$$E_E = \int_0^v \frac{1}{2} \varepsilon_o E^2 dv \quad (2.53)$$

Onde:

- H é intensidade do campo magnético.
- E é a intensidade do campo elétrico.
- μ é a permeabilidade magnética da torre.
- ε_o é a permissividade elétrica do ar.
- v é o volume da região onde se deseja obter a energia magnética ou eletrostática.

A metodologia utilizada permitiu a medição da energia em diferentes alturas da torre. Com a obtenção dos dados, é possível determinar a indutância e capacitância nestes trechos através das equações (2.55) e (2.56) (MOTA, 2017b).

$$L_i = \frac{2E_{Mi}}{I^2} \quad (2.54)$$

$$C_i = \frac{2E_{Ei}}{V^2} \quad (2.55)$$

Onde:

- C é capacitância obtida no trecho analisado.
- L é indutância obtida no trecho analisado.
- V é a tensão aplicada na torre.
- I é a corrente aplicada na torre.
- i é a indicação do ponto de análise na torre.

Dessa forma, a impedância de surto no ponto de análise na torre é determinada pela equação (2.57) (MOTA, 2017b).

$$Z_i = \sqrt{\frac{L_i}{C_i}} \quad (2.56)$$

O MEF permite a modelagem das torres de linhas de transmissão considerando sua geometria detalhada e as características elétricas dos materiais que a compõem. A aplicação do método envolve a simulação da interação entre campos elétricos e magnéticos gerados na estrutura, utilizando técnicas de discretização e condições de contorno apropriadas. Essa abordagem possibilita uma representação mais detalhada da distribuição dos campos na torre, diferenciando-se dos métodos analíticos tradicionais anteriormente apresentados.

2.4. Influência da velocidade de propagação da onda de descarga nas análises de desempenho elétrico de linhas de transmissão

Para a obtenção da impedância de surto como também para todo o contexto de análise de desempenho de linhas de transmissão, as definições quanto ao valor da velocidade de propagação da descarga atmosférica nas torres das linhas de transmissão atingidas por descargas variam bastante na literatura. As propriedades elétricas e magnéticas do meio são determinantes para estabelecer efetivamente a magnitude da velocidade de propagação do surto, onde caso a permeabilidade magnética e a permissividade elétrica do meio se igualem aos

valores correspondentes àqueles do ar, a velocidade de propagação da onda eletromagnética é igual à velocidade de propagação da luz (3×10^8 m/s). Quando a análise é realizada em estruturas metálicas, caso das torres de linha de transmissão, os elementos que a compõem – tais como as mísulas, cruzetas e inclinações – fazem com que a velocidade de propagação da onda seja inferior a velocidade da luz devido aos atrasos proporcionados por tais elementos (LIMA, 2020).

Ao longo dos anos, diversos estudos foram desenvolvidos e diferentes percentuais da velocidade da luz foram considerados para definição da velocidade de propagação da onda eletromagnética na torre em trabalhos que se dedicaram a analisar o comportamento da propagação da onda eletromagnética em diversos tipos de torres (CUNHA, 2010) (ROCHA, 2009) (RODRIGUES, 2017) (ROMERO; PIANTINI; COORAY, 2014). Em Kawai (1964), foi obtido por experimentação em torres de diferentes alturas que a velocidade de propagação variou entre 71% e 89% da velocidade da luz. Já nos experimentos conduzidos por Motoyama, Kinoshita e Nonaka (2008) avaliando o comportamento de um surto atmosférico em torres de uma linha aérea de 500 kV, a velocidade de propagação obtida variou entre 85% e 90% da velocidade da luz.

Diante desse contexto, observa-se que a análise da variação da velocidade de propagação da tensão e corrente de surto atmosférico nas torres de linhas de transmissão, bem como a avaliação da sua influência na suportabilidade dos arranjos isolantes são itens com grande relevância nos estudos de desempenho de linhas de transmissão.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL DO TRECHO DE LINHA DE TRANSMISSÃO INVESTIGADO

Este capítulo visa desenvolver a modelagem computacional dos elementos que compõem o sistema de transmissão em análise. O sistema elétrico simulado compreende uma linha de transmissão aérea a circuito simples, operando a uma tensão de 500 kV. Foram simulados 4 vãos, cada um destes com comprimento específico, utilizando o modelo *JMarti* para determinação dos parâmetros da linha de transmissão, uma vez que este modelo considera a dependência destes parâmetros elétricos da linha com a frequência. Os sistemas isolantes foram representados considerando cadeias de isoladores do tipo padrão, totalizando 26 unidades com comprimento igual a 14,60 centímetros e alcançando um comprimento total de 3,8 metros. Para a condução das análises de desempenho elétrico perante sobretensões atmosféricas propostas neste trabalho, também foi modelado um sistema de controle que representa a disrupção nos arranjos isolantes, sendo este direcionado a registrar o instante de tempo da ocorrência da disrupção e a amplitude das sobretensões disruptivas às quais as cadeias de isoladores podem ficar submetidas.

O trecho de sistema de transmissão investigado é formado por dois vãos e três torres, sendo estas representadas por dois trechos de linhas de transmissão associados em série empregando o modelo *Transposed Lines* (Clarke), com parâmetros distribuídos disponível no *software ATPDraw*. Utilizando-se esta estratégia de modelagem computacional das torres, foi possível a determinação do posicionamento da cadeia de isoladores na torre, assim como analisar a variação da velocidade de propagação da descarga atmosférica na torre modelada. Nas simulações realizadas foram utilizados dois diferentes tipos de fontes de descargas. A primeira fonte de corrente a ser utilizada é a do tipo dupla rampa, que é comumente empregada para a representação de descargas atmosféricas em estudos de coordenação de isolamento. A segunda fonte é do tipo exponencial dupla, que é comumente utilizada em ensaios laboratoriais para avaliação da suportabilidade elétrica de arranjos isolantes solicitados por impulsos atmosféricos e em estudos computacionais de coordenação de isolamento.

O *software ATP* (*Alternative Transients Program*) é largamente empregado em todo o mundo para a realização de estudos computacionais relacionados com transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. Este programa oferece diversos modelos preexistentes para análise de transientes, juntamente com componentes auxiliares para representação de sistemas de controle, permitindo ainda a criação de novos modelos computacionais empregando-se os recursos *TACS – Transient Analysis Control Systems*, *DBM – Data Base*

Module e a linguagem *MODELS*. Em sua versão gráfica, o *ATPDraw*, a compreensão e análise de fenômenos transitórios é facilitada por uma interface gráfica mais amigável ao usuário, tornando o seu uso mais fácil e intuitivo para estudos de suportabilidade elétrica de arranjos isolantes como é o objetivo deste trabalho. Através do uso da linguagem *MODELS* foram implementados os principais equacionamentos para determinação da impedância de surto de torres dentro de um único modelo (*model*), o qual será detalhado neste capítulo.

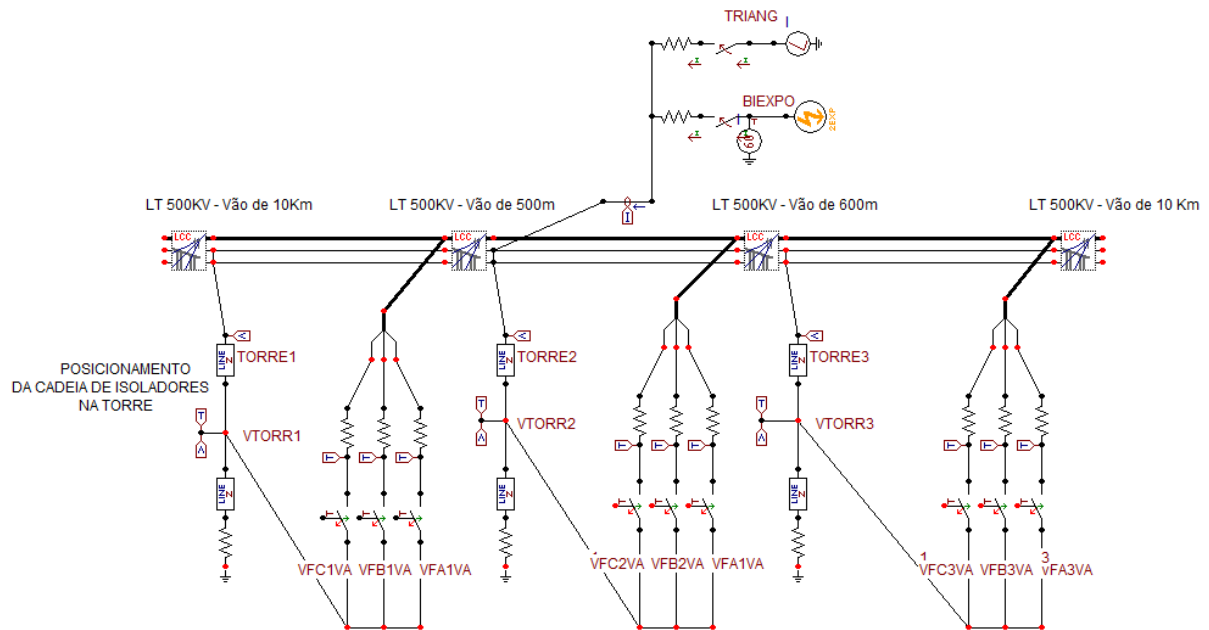
A configuração do computador utilizado no desenvolvimento do *model* e também do sistema de transmissão dispõe de um processador Intel Core i5 de 7ª geração 2,5GHz com 8 gigabytes de memória *RAM* (*Random Access Memory*).

3.1. Modelagem da Linha de Transmissão

O sistema modelado é composto por quatro vãos com três torres alocadas em diferentes distâncias dentro da extensão da linha de transmissão. A Figura 17 apresenta o trecho da linha de transmissão modelada. À esquerda da torre 2 (central) o vão possui comprimento de 500 metros, enquanto que à direita, o comprimento é de 600 metros. Os dois vãos dispostos nas extremidades do trecho da linha analisada possuem extensão de 10 km, com intuito de desconsiderar as contribuições de tensões provenientes das reflexões nas extremidades do trecho. Desta forma, os resultados obtidos neste trabalho consideram apenas os efeitos das ondas viajantes de sobretensões que percorrem os dois vãos centrais e também as três torres de transmissão devido à incidência de descargas atmosféricas que atingem os cabos para-raios da torre central, simuladas por meio de fontes de corrente.

A implementação desta modelagem computacional tornou possível realizar estudos investigativos acerca da influência de diversos fatores, dentre eles, a velocidade de propagação da onda eletromagnética nas torres, a altura de fixação das cadeias de isoladores e a impedância de surto das torres na avaliação do desempenho elétrico da linha de transmissão frente ao evento de *backflashover*.

Figura 17 – Sistema elétrico modelado para avaliação da influência da variação da altura da cadeia de isoladores e da velocidade de propagação do surto quando a torre é submetida a diferentes tipos de descargas atmosféricas.

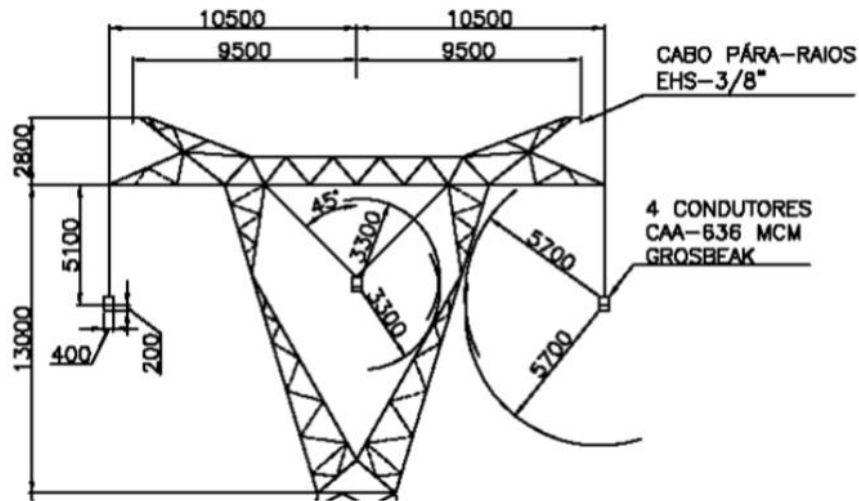


Fonte: Elaborada pelo autor.

O desempenho elétrico de uma torre de transmissão, avaliando a suportabilidade de uma linha de transmissão frente a uma descarga atmosférica, depende de diversos fatores, tais como: a forma de onda da descarga atmosférica aplicada, a geometria das torres e sua impedância de surto, a disposição dos arranjos isolantes, o posicionamento dos cabos de blindagem e das fases, e a impedância de aterramento. O sistema de transmissão modelado opera a uma tensão de 500 kV em circuito simples, com fases organizadas em feixes simétricos constituídos por quatro subcondutores GROSBEAK 636 MCM, CAA, com espaçamento de 0,4 m, conforme mostrado na Figura 18. Os cabos de blindagem são do modelo EHS 3,8" (ROCHA, 2009). As torres do trecho investigado dispõem da mesma silhueta e conseqüentemente, mesma configuração geométrica. A Figura 18 apresenta seu perfil geométrico.

Para a determinação dos parâmetros elétricos e mecânicos dos cabos, foram considerados os valores das flechas para os cabos fase e de blindagem relatados em Rocha (2009), sendo de 25,67 metros para os cabos das fases e de 22 metros para os cabos de blindagem. Foi considerada uma altura de segurança mínima de 10 metros para possíveis obstáculos no meio do vão.

Figura 18 – Configuração geométrica da torre típica para sistemas de transmissão trifásicos de 500 kV.



Fonte: Extraída de (ROCHA, 2009).

Por conseguinte, somando-se a altura de segurança com o valor da flecha para os cabos fases, é obtida a altura em que estão instalados os cabos das fases externas na torre, à saber, 35,67 metros. O cabo fase central está ligeiramente mais elevado com altura de 35,71 m. A partir da posição dos cabos fase externos são somadas as distâncias de 5,1 e 2,8 metros, considerando as medidas dispostas na Figura 18, e é determinada a altura total da torre, igual a 43,57 metros. Os cabos de blindagem foram alocados em altura ligeiramente inferior à torre, considerando as proporções definidas em Rodrigues (2017), estando à altura de 43,25 m.

A Tabela 2 apresenta os principais dados dos cabos utilizados na linha de transmissão.

Tabela 2 – Dados elétricos e geométricos dos cabos.

Nome do Cabo	<i>Grosbeak</i>	EHC 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe C
Comprimento do Vão [m]	600	600
Flechas [m]	25,67	22
Seção do Cabo [mm ²]	374,30	195
Diâmetro Interno [cm]	0,93	0
Diâmetro Externo [cm]	2,51	0,91
Resistência em CC [Ω/km]	0,101	3,36

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2017).

Na Figura 19 é apresentado o módulo LCC (*Line Constant, Cable Constants and Cables Parameters*) do *ATPDraw*, com as propriedades elétricas, mecânicas e geométricas acima apresentadas.

Figura 19 – Configuração dos cabos implementada no LCC.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.93	2.51	0.101	-10.5	35.67	10	40	45	4
2	2	0.93	2.51	0.101	0	35.71	10.04	40	45	4
3	3	0.93	2.51	0.101	10.5	35.67	10	40	45	4
4	4	0	0.91	3.36	-9.5	43.25	21.25	0	0	1
5	5	0	0.91	3.36	9.5	43.25	21.25	0	0	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Da Figura 19, tem-se:

- *Ph.no.* é o número da fase (1,2,3 são os cabos fase. 4 e 5 são os cabos de blindagem.)
- *Rin* é o raio interno do condutor, em centímetros.
- *Rout* é raio externo do condutor.
- *Resis* é a resistência em corrente contínua do cabo.
- *Horiz* é a distância horizontal entre os feixes de condutores, tendo por referência o feixe central da torre.
- *Vtower* é a altura vertical dos cabos em relação ao solo.
- *Vmid* é a altura vertical no meio do vão ($V_{mid} = V_{tower} - \text{flecha}$).
- *Separ* é a distância entre os condutores no feixe de cada fase.
- *Alpha* é o espaçamento entre os condutores de cada feixe de fase.
- *NB* é o número de condutores em um feixe.

Na Tabela 3 são dispostas as alturas dos cabos na torre modelada.

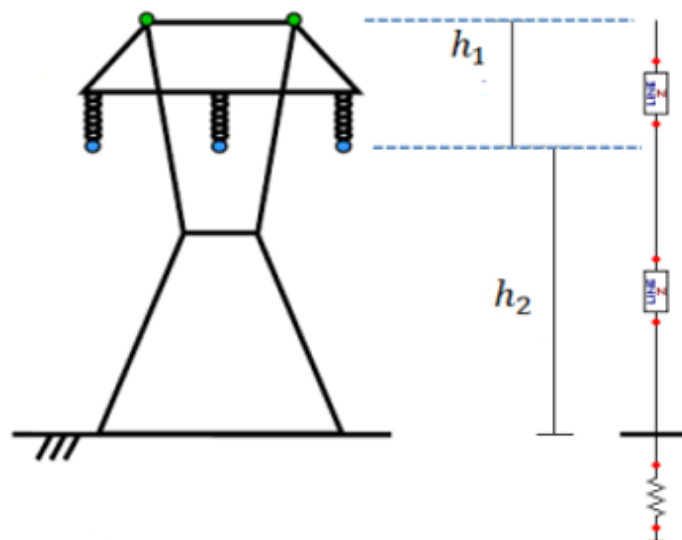
Tabela 3 – Posicionamento dos cabos na torre modelada.

Parâmetros geométricos da torre	Torre 500 kV
Altura total da torre [m]	43,57
Altura dos cabos de blindagem [m]	43,25
Altura dos cabos de fase (fases externas) [m]	35,67
Altura dos cabos de fase (fase central) [m]	35,71

Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Laforest (1981), um valor constante de impedância de surto em conjunto com um aterramento por meio de uma resistência de pé-de-torre em sua base é uma boa representação para as torres de linhas de transmissão. A representação da impedância de surto da torre é feita através de duas linhas de transmissão associadas em série, tendo cada uma o mesmo valor de impedância de surto, com base nos estudos desenvolvidos por Yamada *et al* (1995), onde foi determinado que a altura de uma torre pode ser dividida em duas partes, uma inferior e outra superior da torre, conforme a Figura 20. A altura da parte superior (h_1) é estabelecida pela distância entre o cabo de blindagem e o ponto de fixação do cabo fase. A altura da parte inferior (h_2) é determinada pelo ponto de fixação do cabo fase na torre em relação ao solo.

Figura 20 – Representação da torre empregando dois trechos de linha de transmissão *Transposed Lines (Clarke type)* conectados em série.



Fonte: Adaptado de (CASTRO, 2016).

É razoável a simplificação da representação da impedância de aterramento por uma resistência equivalente, por resistores concentrados, baseados em estudos de sensibilidade de desempenho de linhas elétricas aéreas (SILVEIRA; DE CONTI; VISACRO; 2010). Dessa forma, foi adotado o valor típico de 30Ω para as resistências de aterramento. Esse valor é apropriado para refletir a resistência típica de aterramento de torres em solos com alta resistividade (VISACRO, 2005).

3.2. Modelagem computacional do sistema de disrupção nos arranjos isolantes

A disrupção nas cadeias de isoladores é um fenômeno resultante da formação de um arco elétrico ao redor dos isoladores. Isso ocorre quando a sobretensão aplicada à cadeia de isoladores excede o limite de rigidez dielétrica, conforme definido pela curva de suportabilidade. Em outras palavras, quando a sobretensão que estressa os isoladores atinge um nível crítico, os isoladores não conseguem mais manter sua capacidade de isolamento, permitindo a passagem da corrente elétrica através do arco. Na modelagem computacional do sistema de transmissão desenvolvida neste trabalho, a disrupção foi baseada na curva de suportabilidade V-T (Tensão x Tempo). O método para obtenção dessa curva é definido pela equação (3.1) (HILEMAN, 1999).

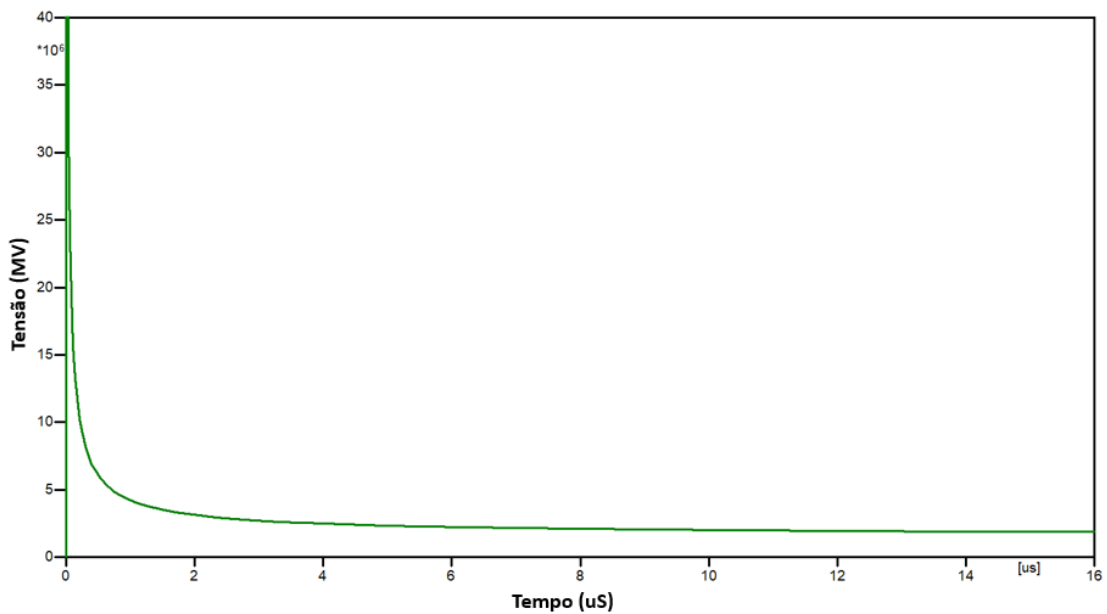
$$V(t) = 400 \cdot W + \frac{710 \cdot W}{t^{0,75}} \quad (3.1)$$

Ao qual:

- V : representa o valor máximo da tensão aplicada à cadeia de isoladores, em quilovolts (kV);
- W : é a extensão da cadeia de isoladores, medida em metros (m);
- t : refere-se ao instante de tempo de ocorrência da disrupção, em microssegundos (μ s).

No intuito de analisar a disrupção, procedeu-se à plotagem da curva V-T utilizando a equação (3.1) e os dados eletromecânicos de uma cadeia de isoladores formada por 26 unidades padronizadas de disco de vidro, com espaçamento de 14,605 cm entre cada isolador, o que totalizou um comprimento de 3,8 m, conforme diretrizes estabelecidas em estudos anteriores (RODRIGUES, 2017; HILEMAN, 1999). A Figura 21 apresenta a curva implementada no sistema modelado.

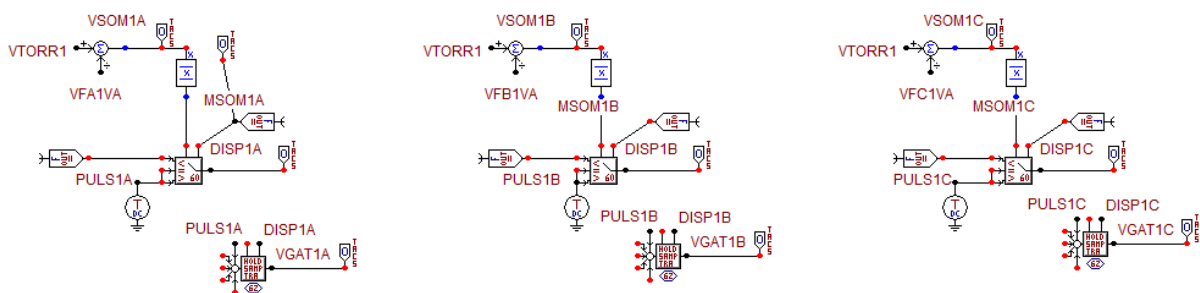
Figura 21 – Curva de suportabilidade implementada para o arranjo isolante da linha de transmissão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 22 apresenta o sistema de controle da disrupção modelado para cada uma das fases da primeira torre do sistema. Como o sistema é trifásico, foram implementados nove sistemas de controle, sendo um para cada cadeia de isoladores de cada fase de três torres modeladas. O *ATPDraw* dispõe da rotina *TACS* (*Transient Analysis of Control Systems*), que contém diversos componentes para modelagem de sistemas de controle, os quais foram utilizados para a implementação do sistema de controle responsável pela representação da disrupção em cadeias de isoladores.

Figura 22 – Sistema de controle de disrupção da primeira torre do sistema implementado utilizando componentes *TACS* do *ATPDraw*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A lógica de funcionamento do sistema de controle, para cada fase, é abaixo descrita para a torre 1 do sistema de transmissão. Os nomes dos nós do sistema elétrico utilizados como

entrada de tensão para os dispositivos do sistema de controle da Figura 22 podem ser identificados por consulta à Figura 17. O mesmo fluxo de dados se aplicará para as cadeias de isoladores das outras duas torres do sistema em análise.

Mediante a aplicação da descarga atmosférica no sistema, as sobretensões que são observadas entre a torre 1 (nó VTORR1 da Figura 22) e as fases (nós VFA1VA, VFB1VA e VFC1VA da Figura 22) são capturas por dispositivo que atua no sistema elétrico como um sensor de tensão, fornecendo a tensão do nó como um dado de entrada para o sistema de controle (componente *TACS – Coupling to circuit - Type 90* – Figura 22) e então aplicadas em um dispositivo subtrator (componente *TACS – Fortran Statements – Math – subtraction of two input signals* – Figura 22), realizando assim a determinação dos valores instantâneos da diferença de potencial existente entre tais nós e que, conseqüentemente, está aplicada às cadeias de isoladores (Nós VSOM1A, VSOM1B, VSOM1C da Figura 22). Com tais valores registrados, utilizando o componente *TACS – Fortran Statements – Math - absolute value* é determinado o módulo da sobretensão em cada cadeia de isoladores das fases A, B e C da Torre 1 (Nós MSOM1A, MSOM1B, MSOM1C).

Através do componente *TACS – Fortran Statement – General* (Figura 22) a curva de suportabilidade dos arranjos isoladores pôde ser implementada utilizando a equação (3.1), e na Figura 22, corresponde aos nós CVXTFA, CVXTFB, CVXTFC. O próximo passo é a realização da comparação, através do componente *TACS 60 Input IF*, da sobretensão que a cadeia de isoladores está submetida com o valor da tensão suportável obtida pela curva de suportabilidade no mesmo instante de tempo. No instante de tempo em que o módulo da sobretensão for igual ou superior ao valor da tensão na curva de suportabilidade da cadeia de isoladores, é gerado um pulso pelos comparadores (nós DISP1A, DISP1B, DISP1C). O instante de tempo em que tais pulsos são disparados são registrados por um dispositivo *Sample&Track* (componente *TACS – Devices – Sample Track 62*), sendo que esse instante se refere ao momento em que ocorreu efetivamente a disrupção na cadeia de isoladores. Um pulso de disparo é então gerado pelos registradores (nós VGAT1A, VGAT1B e VGAT1C da Figura 22), cuja função é realizar o fechamento das chaves entre a torre e cabos fase da linha na Figura 17, promovendo um curto circuito fase-terra entre os condutores das fases da torre 1, simulando a disrupção. O mesmo sistema de controle que representa a disrupção foi utilizado para as torres 2 e 3.

3.3. Fontes de correntes de descargas atmosféricas

A obtenção precisa dos valores máximos e das formas de onda das sobretensões geradas por descargas atmosféricas é essencial para garantir a confiabilidade dos estudos elétricos. Para alcançar esse objetivo, é fundamental que a corrente de retorno seja modelada de forma adequada. Caso as formas de onda de corrente utilizadas não representem corretamente as características de forma de onda da corrente de descarga de retorno, os resultados podem ser imprecisos e comprometer a validade dos resultados obtidos. Dentre os fatores que tornam um desafio a determinação com precisão das formas de onda de correntes de surto originadas por descarga atmosférica são as grandes variações observadas nos seus parâmetros de amplitude, derivada máxima na frente de onda, tempos de frente e de cauda, além da ocorrência de um ou de múltiplos picos. Assim, modelos computacionais fidedignos para representar as diferentes características das descargas atmosféricas são essenciais para a condução de estudos de desempenho elétrico e de coordenação de isolamento de linhas de transmissão (ROCHA,2009; RODRIGUES, 2017).

Dessa forma, nesse trabalho duas formas de onda amplamente utilizadas para representação de correntes de descargas atmosféricas foram utilizadas: a dupla exponencial, que é recomendada pelo IEEE e comumente utilizada e a dupla rampa, que também é bastante utilizada sendo recomendada pelo IEEE e também pelo IEC.

3.3.1. Forma de onda de corrente de descarga do tipo dupla exponencial

A forma de onda de uma corrente de descarga do tipo dupla exponencial é caracterizada pela soma de duas exponenciais de sinais opostos e constantes de tempo de valores distintos da seguinte maneira (MIRANDA, 2019):

$$i(t) = I(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.2)$$

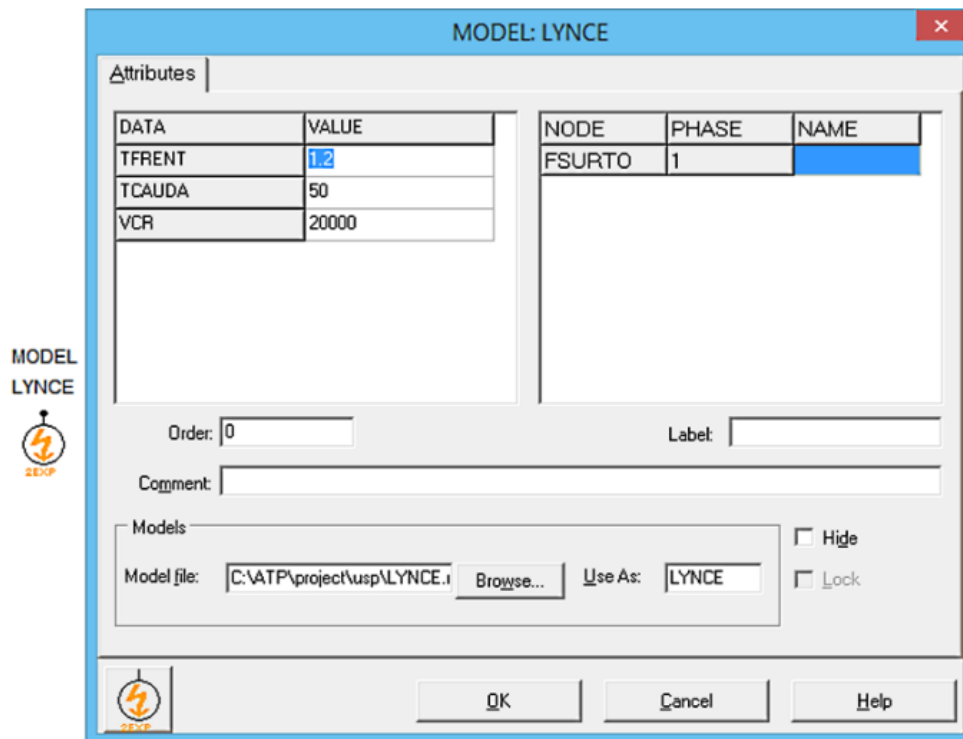
Sendo:

- α e β : constantes de tempo.

Para a obtenção dos parâmetros apresentados se faz necessário um processo iterativo utilizando equações não lineares, não sendo um processo trivial. Para a condução adequada dos estudos computacionais, foi utilizado um *model* desenvolvido em Rodrigues (2017) para a representação da corrente de descarga atmosférica com forma de onda do tipo

dupla exponencial. O componente foi desenvolvido com uso do *ATPDraw*, sendo denominado *Model Lynce*, utilizando a linguagem *MODELS*. O componente é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Interface gráfica e dados de entrada dos atributos do *Model Lynce* que produz uma fonte de corrente do tipo dupla exponencial.

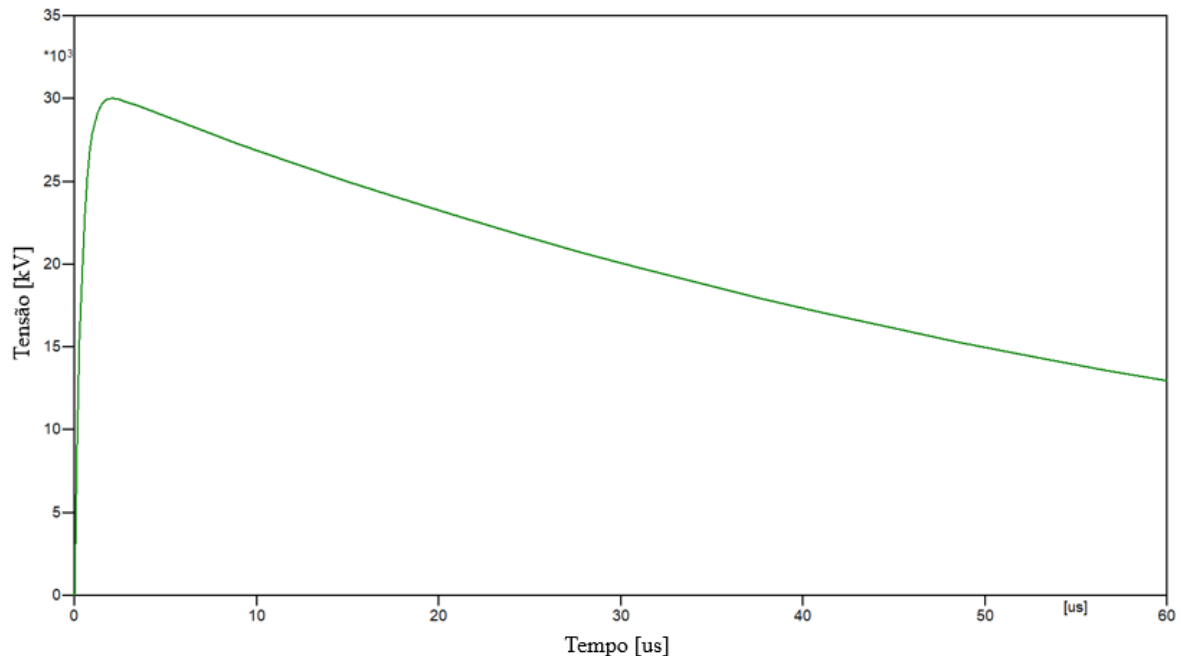


Fonte: Extraído de (RODRIGUES, 2017).

A forma de onda pode ser definida mediante três parâmetros: i) o valor máximo da corrente; ii) tempo de frente da onda, ao qual se refere ao período necessário para a corrente sair do valor zero até o seu valor máximo; iii) tempo de cauda ou meia onda, sendo o intervalo de tempo ao qual a corrente, após atingir a crista, cai para 50% do valor de pico. Seguindo tais critérios, mediante a entrada dos dados do usuário, o *model* recebe o valor do tempo de frente e do tempo de calda em microssegundos (μs) e a amplitude de pico da corrente elétrica em Ampères (A), processa e gera efetivamente a forma de onda dupla exponencial da corrente. A Figura 24 apresenta o exemplo da forma de onda utilizada no estudo. Os tempos de frente e calda foram definidos seguindo os parâmetros de padronização utilizada em ensaios de impulso atmosférico, sendo 1,2 μs para o tempo de frente e 50 μs para tempo de calda. As análises apresentadas neste trabalho são direcionadas à avaliação da suportabilidade elétrica, sendo que dessa forma a amplitude da corrente foi variada de acordo com o estudo realizado até que ocorra o registro da disrupção pelo sistema de controle. Tal definição dos parâmetros da forma de onda

do tipo dupla exponencial padronizada, como os detalhes do processamento do *model* foram completamente detalhados em Rodrigues (2017).

Figura 24 – Forma de onda de corrente de descarga do tipo dupla exponencial gerada no *software ATPDraw*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

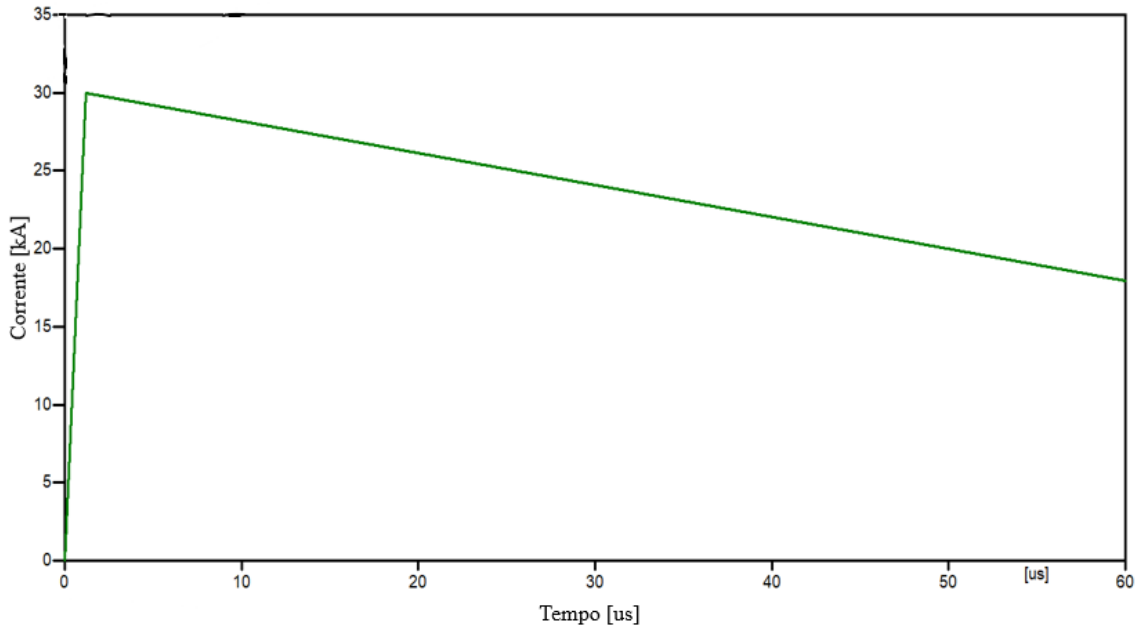
3.3.2. Descarga tipo dupla rampa

A forma de onda de corrente do tipo dupla rampa, também conhecida como triangular, é amplamente utilizada nas análises de desempenho elétrico das LTs, sendo recomendada pelo IEEE Std. 1243 (1997) e também pela norma IEC 60071-4 (2006), que estabelece diretrizes para modelagem e simulação de sobretensões em sistemas elétricos. A sua escolha se dá em diversos estudos devido à sua capacidade de simular o comportamento transitório das correntes de descarga atmosférica, especialmente em situações onde o tempo de frente e o tempo de cauda são parâmetros críticos. Pelos motivos supracitados, esta foi empregada nas análises realizadas nesse trabalho, através da fonte de corrente do tipo *slope ramp type 13* já disponível no *software ATPDraw*.

Para que as análises comparativas em relação a forma de onda dupla exponencial fossem realizadas adequadamente, os tempos de frente e de cauda foram ajustados também de acordo com a padronização utilizada para ensaios de impulso atmosférico, sendo o tempo de frente igual a 1,2 μ s e o tempo de cauda igual a 50 μ s. De forma similar à onda dupla

exponencial, a amplitude da descarga foi variada de acordo com cada o estudo de caso realizado. A Figura 25 apresenta um exemplo da forma de onda de descarga dupla rampa.

Figura 25 – Forma de onda dupla rampa gerada no *software* ATPDraw.

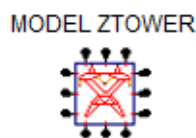


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4. Model ZTOWER

Uma vez identificados na revisão bibliográfica deste trabalho diversos modelos que propõem metodologias mais precisas para a definição da impedância de surto de sistemas de transmissão de energia elétrica, foi então implementado, utilizando a linguagem *Models* do *ATPDraw*, um novo modelo/componente (*model* da linguagem *MODELS*) que contemple todos os métodos de determinação da impedância de surto em torres de linhas de transmissão descritos na seção 2.3. A seguir, é apresentada uma breve descrição do *model*, com detalhamento de seus atributos e descrição do seu funcionamento. A Figura 26 apresenta o ícone criado para representar o *model* desenvolvido.

Figura 26 – Ícone representativo do *model* criado para o valor da impedância de surto de torres por diferentes métodos de cálculo implementado no *ATPDraw*.



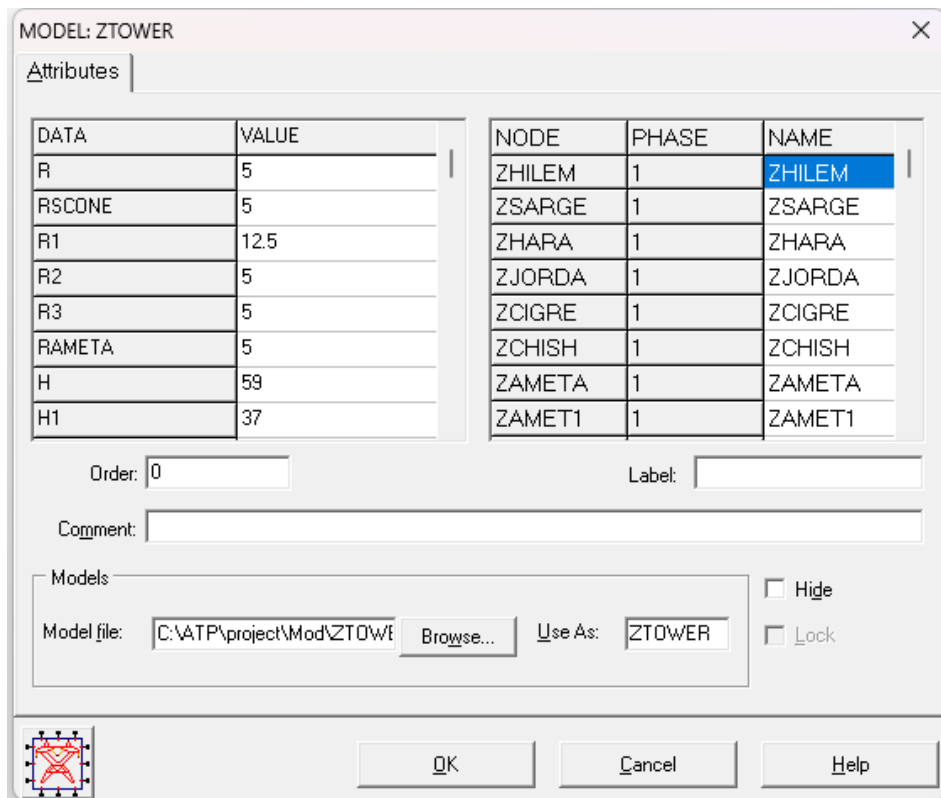
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.1. Atribuições e breve detalhamento do *Model ZTOWER*

Como já destacado, o *ATPDraw* é amplamente empregado na análise de fenômenos transitórios em sistemas elétricos de potência, apresentando uma interface intuitiva e recursos gráficos para a interpretação dos resultados das simulações. A *Models* trata-se de uma linguagem de programação dentro do *ATP/ATPDraw* a qual possibilita a criação de novos componentes para modelagem de sistemas elétricos e de controle.

Utilizando as atribuições do *software*, foi desenvolvido o *model* denominado ZTOWER. Esse *model* é capaz de fornecer a impedância de surto de uma torre por meio de diferentes métodos matemáticos e experimentais. Para realizar o cálculo da impedância de surto, o usuário deve fornecer como dados de entrada os valores das variáveis que correspondem às dimensões geométricas da torre em análise, necessários para cálculo empregando os diferentes modelos descritos na revisão bibliográfica. A interface do modelo é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – *Layout* da interface do model ZTOWER para determinação da impedância de surto de torres de linhas de transmissão a partir dos dados de entrada do usuário.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o modelo, os parâmetros de entrada são:

- **R [m]:** é o valor do raio que será utilizado para todos os métodos de cálculo que utilizam a representação cilíndrica para a estimativa da impedância de surto (JORDAN,1934) (WAGNER; HILEMAN, 1959) (SARGENT; DARVENIZA, 1969) (Ametani *et al.*, 1994) (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1983) (HARA; YAMAMOTO, 1996) utilizado nas equações (2.8), (2.19), (2.26), (2.43), (2.44), (2.46), (2.48), (2.49) e (2.51).
- **RSCONE [m]:** é o valor do raio para utilização pelo método de Sargent e Darveniza (1969) para a representação cônica de torres, na equação (2.40).
- **R1 [m]:** Raio do topo da torre, a ser utilizado para a determinação da impedância de surto através do método de sólidos combinados (STRACQUALURSI *et al.*, 2022) (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985) nas equações (2.42) e (2.45) e na abordagem de multicondutores (HARA; YAMAMOTO, 1996) nas equações (2.27) e (2.20).
- **R2 [m]:** Raio do meio da torre, a ser utilizado para a determinação da impedância de surto através do método de sólidos combinados (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985) na equação (2.45).
- **R3 [m]:** Raio da base da torre, a ser utilizado para a determinação da impedância de surto através do método de sólidos combinados (STRACQUALURSI *et al.*, 2022) (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985) nas equações (2.42) e (2.45) e na abordagem de multicondutores (HARA; YAMAMOTO, 1996) nas equações (2.27) e (2.20).
- **RAMETA [m]:** é o raio equivalente obtido para o sistema multicondutor (AMETANI *et al.*, 1994) (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017) utilizado nas equações (2.47) e (2.50).
- **H [m]:** é a altura da torre em análise, utilizado nas equações (2.8), (2.19), (2.20), (2.26), (2.27), (2.40), (2.43), (2.44), (2.46), (2.47), (2.48), (2.49), (2.50) e (2.51).
- **H1 [m]:** é a altura da base até o meio da torre, a ser utilizado no método de sólidos combinados (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985) (STRACQUALURSI *et al.*, 2022) nas equações (2.42) e (2.45).

- **H2 [m]:** é a altura do meio da torre até o seu topo, a ser utilizado no método de sólidos combinados (CHISHOLM; CHOW; SRIVASTAVA, 1985) (STRACQUALURSI *et al.*, 2022) nas equações (2.42) e (2.45).

O objetivo do *model ZTOWER* é construir uma ferramenta computacional auxiliar nos estudos de desempenho elétrico e coordenação de isolamento de linhas de transmissão. Com os dados geométricos da torre em análise, o projetista, pesquisador ou estudante pode obter o valor da impedância de surto por meio de diversos métodos já validados na literatura. Com tais dados, o usuário pode realizar uma análise comparativa dos resultados fornecidos pelo *model* e assim selecionar aqueles que apresentaram valores mais próximos dos valores reais e eliminando os modelos que não se aplicam à geometria da torre em análise.

Dentro da *model* as equações principais para a obtenção direta da impedância de surto, apresentadas no item 2.3.1 deste trabalho, estão parametrizadas. A partir das entradas fornecidas ao *model*, diversas saídas são geradas, as quais estão detalhadas na Tabela 4.

Concernente à utilização do *model*, se faz necessário ao usuário o conhecimento prévio dos modelos de cálculo de impedância que a ferramenta dispõe, visto que seus resultados dependem diretamente dos parâmetros de entrada informados corretamente pelo usuário. Assim sendo, a compreensão e conhecimento prévio dos modelos de determinação da impedância de surto em conjunto com a seleção apropriada dos dados geométricos de entrada, culminarão em resultados precisos retornados pelo modelo. Esse *model* trata-se de uma contribuição inovadora desenvolvida durante a produção deste trabalho. Sua aplicação e validação será apresentada e detalhada no Capítulo 4 deste trabalho.

Tabela 4 – Equações vinculadas a cada saída do model ZTOWER.

Saída do model ZTOWER	Formulação (Equação)
ZJORDA	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{h}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.8)$
ZCIGRP	$Z_T = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right] \quad (2.43)$
ZCIGRÈ	$Z_T = 60 \ln \left[\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{(h_1 + h_2)^2} \right) \right) \right] \quad (2.45)$
ZCIGRC	$Z_T = 60 \ln \frac{h}{r} \quad (2.46)$
ZHILEM	$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) \quad (2.19)$
ZHILHA	$Z = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_e} \right) \quad (2.20)$
ZSARGE	$Z = 60 \left[\left(\ln \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.26)$
ZSARHA	$Z = 60 \left[\left(\ln \sqrt{2} \frac{2h}{r_e} \right) - 1 \right] \quad (2.27)$
ZHARAP	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r} \right) - 2 \right] \quad (2.51)$
ZCHISH	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{h + \sqrt{h^2 + r^2}}{r} \right) - 1 \right] \quad (2.44)$
ZAMETP	$Z_T = 60 \left[\ln \frac{\left(h + \sqrt{h^2 + r_{eq}^2} \right)^2}{r_{eq} \left(2h + \sqrt{4h^2 + r_{eq}^2} \right)} + \frac{3r_{eq} + \sqrt{4h^2 + r_{eq}^2} - 4\sqrt{h^2 + r_{eq}^2}}{2h} \right] \quad (2.47)$
ZAMETA	$Z_T = \ln \frac{\left[\sqrt{(r^2 + h^2)} + h \right]^2}{\left[\sqrt{(r^2 + 4h^2)} + 2h \right] r} + \frac{\left\{ \sqrt{(r^2 + 4h^2)} + \frac{3r}{2} - 2\sqrt{(r^2 + h^2)} \right\}}{h} \quad (2.48)$
ZAMET1	$Z_T = \ln \left(\frac{h}{er} \right) \quad (2.49)$
ZAMET2	$Z_T = \ln \left(\frac{h}{er_e} \right) \quad (2.50)$
ZSCONE	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{h^2 + r^2}}{r} \right) \quad (2.40)$
ZSARDA	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h_T}{r_e} \right) - 60 \quad (2.42)$

Fonte: Elaborada pelo autor.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio dos estudos computacionais desenvolvidos com o modelo de linha de transmissão descrito no Capítulo 3 quando o mesmo é submetido a sobretensões de natureza atmosférica, resultando em evento de *backflashover*. O primeiro objetivo é avaliar a influência da velocidade de propagação na torre das ondas de corrente elétrica e de tensão produzidas pela descarga atmosférica. O segundo objetivo é investigar a influência que a altura da cadeia de isoladores exerce na magnitude das sobretensões que são estabelecidas nestes arranjos isolantes. Por último, os estudos também visam analisar o valor da sobretensão que causa a disrupção e o instante de sua ocorrência, identificando quais arranjos isolantes foram acometidos por disrupção. Além disso também é avaliada a corrente crítica de descarga, ou seja, o valor mínimo de corrente elétrica para que ocorra o fenômeno *backflashover*. Estes foram os parâmetros de desempenho elétrico da linha de transmissão avaliados nestes estudos.

As descargas atmosféricas foram representadas por duas formas de ondas de corrente distintas, a saber, a onda triangular e também a dupla exponencial, ambas já descritas e apresentadas na subseção 3.3. Sua incidência no sistema de transmissão ocorre na torre central (Torre 2) do trecho de sistema de transmissão sob análise.

Em relação à sobretensão estabelecida nas cadeias de isoladores do sistema, os resultados apresentados referem-se às fases A (externa) e B (central), uma vez que as sobretensões observadas nas fases externas (fase A e fase C) são similares quer seja na amplitude ou no perfil de onda, devido ao seu posicionamento simétrico em relação à geometria da torre. Por esse motivo, os resultados para a Fase C foram omitidos nas análises.

Este capítulo também apresenta os resultados de estudos de casos conduzidos com objetivo de validação do *model ZTOWER* e demonstrando os benefícios de sua utilização para determinação instantânea da impedância de surto da torre de linha por diferentes métodos em estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão de energia.

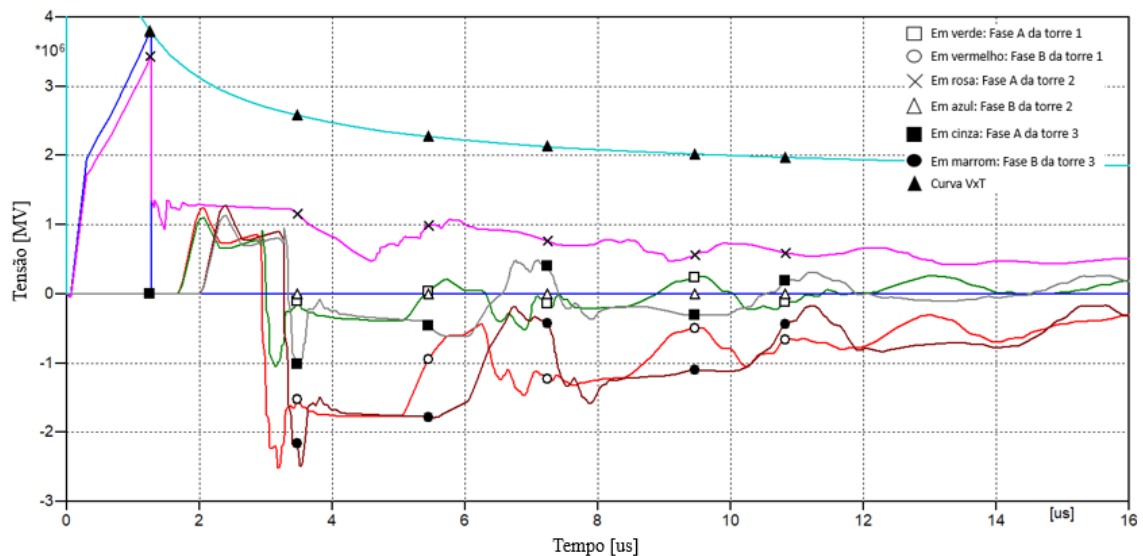
4.1. ESTUDO 01 – Análise de desempenho elétrico do sistema de transmissão modelado perante sobretensões atmosféricas considerando correntes de descarga do tipo dupla rampa e dupla exponencial.

Este caso se propõe em analisar as sobretensões atmosféricas no sistema de transmissão apresentado no tópico 3.1 com as fontes de descargas apresentadas no tópico 3.3. As torres da linha foram modeladas seguindo as estratégias empregadas em Mota (2011) e

Rodrigues (2017), sendo representadas por dois trechos de linha de transmissão que foram definidos em seções proporcionais a 1/3 (14,52 m) e 2/3 (29,05 m) da altura da torre. Dessa forma, os arranjos isoladores estão posicionados em 29,05 m em relação ao solo, ou a 2/3 da altura da torre. A velocidade de propagação da onda eletromagnética foi considerada igual a 85% da velocidade da luz (IEEE,1993).

A Figura 28 apresenta o as formas de onda e o valor das sobretensões que são estabelecidas nas cadeias de isoladores no instante em que se ocorre o *backflashover* após o sistema ser submetido a uma descarga atmosférica do tipo dupla rampa que atinge o cabo para-raios na Torre 2 (central) do trecho de linha de transmissão analisado.

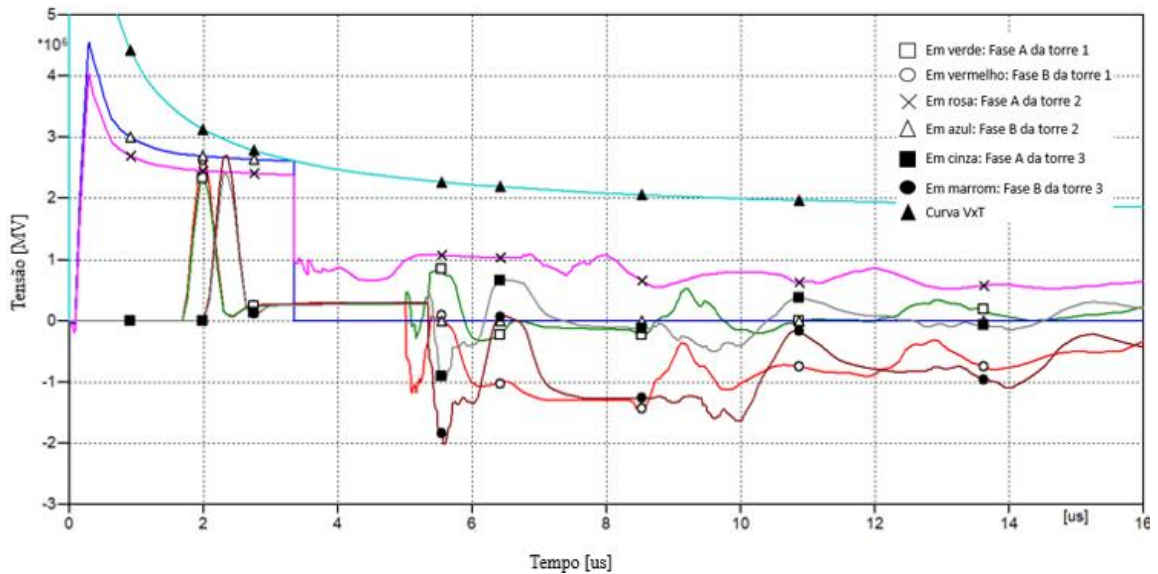
Figura 28 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que no instante de tempo igual a 1,26 μs ocorre a disrupção na cadeira de isoladores na fase B da torre 2, torre central do sistema, onde a descarga incide. O valor de corrente crítica é de 98,70 kA, e a sobretensão observada na cadeira de isoladores atingiu o valor de 3,79 MV. Já quando a mesma é submetida a uma descarga do tipo dupla exponencial, o comportamento é observado na Figura 29.

Figura 29 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

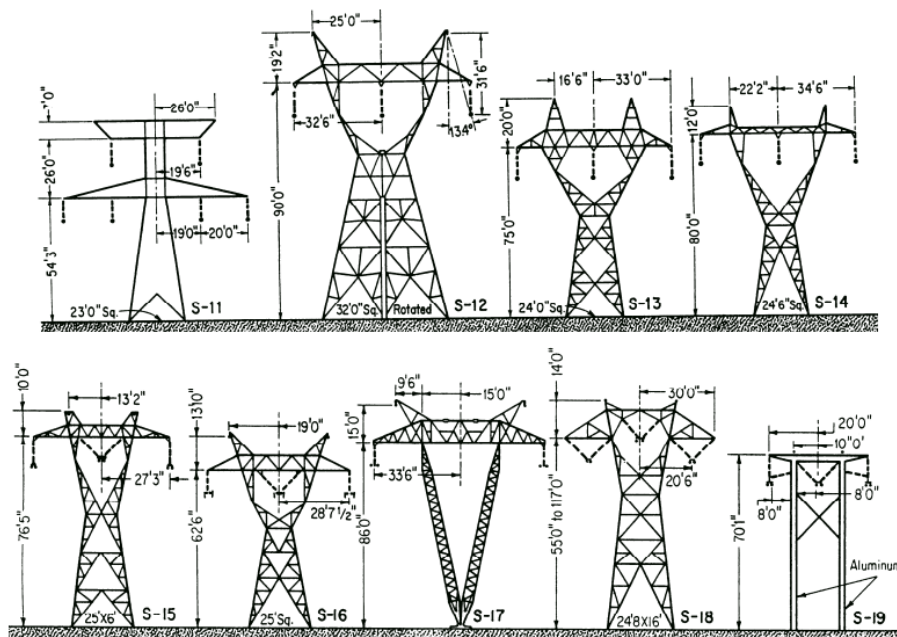
Há uma diferença significativa no tempo em que ocorre a disrupção neste cenário ao compará-lo com o anterior. Agora, a suportabilidade elétrica da cadeia de isoladores é atingido no instante de $3,35 \mu\text{s}$. A disrupção ocorre para uma corrente crítica com valor de $108,96 \text{ kA}$, quando o valor da sobretensão na cadeia de isoladores da fase B da torre 2 alcançou $2,61 \text{ MV}$ de amplitude.

Desta forma, neste estudo de caso a corrente de descarga do tipo dupla rampa mostrou-se mais severa, resultando em menor valor de corrente crítica de descarga e pior desempenho elétrico da linha de transmissão do que quando a descarga atmosférica é representada por uma corrente do tipo dupla exponencial. Tal fato está associado com a derivada máxima ($dV(t)/dt$) da forma de onda do tipo dupla rampa na frente de onda, que é maior do que a derivada máxima na frente de onda de uma forma de onda do tipo dupla exponencial, a qual ocorre somente próximo ao pico de corrente. Este fato determina maiores valores de sobretensão atmosférica na frente de onda de corrente do tipo dupla rampa, motivo pelo qual ocorrem disrupções em instantes de tempo menores do que aqueles registrados para corrente de descarga do tipo dupla exponencial.

4.2. ESTUDO 02 – Investigação sobre a influência da altura da cadeia de isoladores no desempenho elétrico de LTs

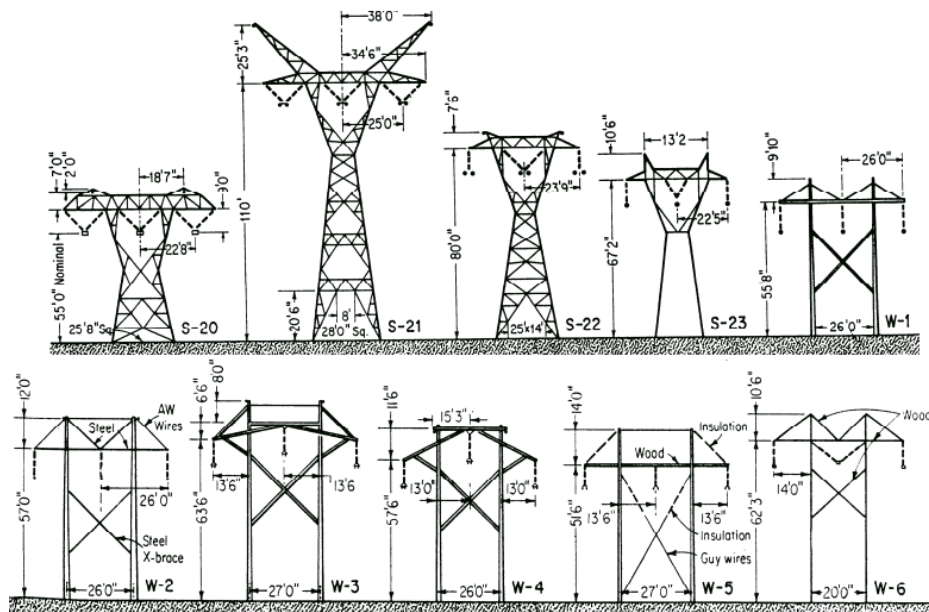
O posicionamento adequado das cadeias de isoladores é crucial para assegurar a confiabilidade e a continuidade operativa do sistema de transmissão, uma vez que a altura de instalação dessas cadeias pode impactar significativamente nas sobretensões suportadas pelos isoladores e, conseqüentemente, no desempenho elétrico da linha. De forma a verificar a influência do ponto de fixação dos arranjos isolantes na torre no desempenho elétrico da linha, foi realizado este estudo de caso considerando as cadeias de isoladores instaladas à altura de 2/3 da altura total da torre, considerando 29 diferentes modelos de torres de linhas de transmissão, a fim de validar se essa estratégia de modelagem das torres de linhas de transmissão é adequada para utilização em estudos computacionais, sendo capaz de reproduzir com precisão requerida as sobretensões atmosféricas estabelecidas em torres reais. As Figuras 30, 31 e 32 apresentam as silhuetas das torres analisadas obtidas a partir da disciplina de Coordenação de Isolamento ofertada no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG (BOAVENTURA; LOPES, 2011).

Figura 30 – Silhuetas e medidas das torres (dimensões em pés e polegadas) S-11, S-12, S-13, S-14, S-15, S-16, S-17, S-18 e S-19.



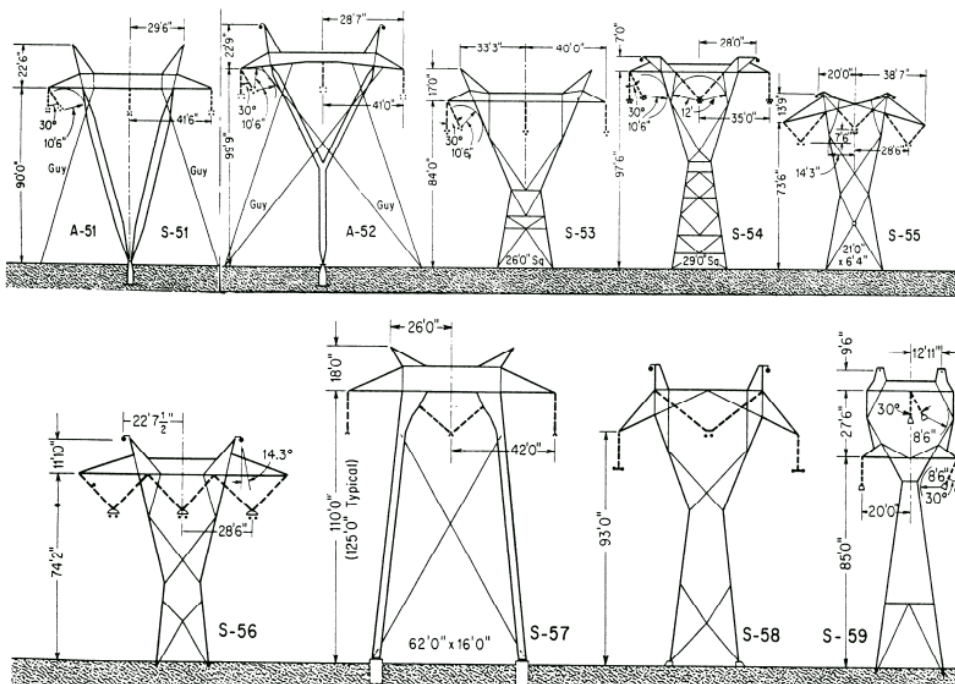
Fonte: Extraída de (BOAVENTURA; LOPES, 2011).

Figura 31 – Silhuetas e medidas das torres (em pés e polegadas) S-20, S-21, S-22, S-23, W-1, W-2, W-3, W-4 e W-5 e W-6.



Fonte: Extraída de (BOAVENTURA; LOPES, 2011).

Figura 32 – Silhuetas e medidas das torres (em pés e polegadas) S-51, S-52, S-53, S-54, S-55, S-56, S-57, S-58 e S-59.



Fonte: Extraída de (BOAVENTURA; LOPES, 2011).

A Tabela 5 resume os resultados de comparação da altura da cadeia de isoladores nos perfis de torres mostrados nas Figuras 30, 31 e 32 com a altura da cadeia de isoladores

utilizada em modelagens computacionais que consideram estes arranjos isolantes instalados a 2/3 da altura da torre.

Tabela 5 – Análise do posicionamento da cadeia de isoladores dos perfis de torre em análise.

Perfil da torre	Altura real da torre [m]	Altura da cadeia de isoladores [m]	Altura considerando posicionamento à 2/3 da altura da torre [m]	Erro relativo entre o posicionamento real e à 2/3 dos isoladores [%]	Razão entre a altura da cadeia de isoladores e altura da torre [%]
S-11	26,59	20,34	17,72	-0,13	76,49
S-12	33,27	23,77	22,2	-0,07	71,45
S-13	28,96	18,78	19,31	0,03	64,85
S-14	28,04	20,25	18,7	-0,08	72,22
S-15	26,33	19,22	17,56	-0,09	73,00
S-16	23,27	16,22	15,51	-0,04	69,70
S-17	30,78	21,87	20,52	-0,06	71,05
S-18	21,03	15,1	14,02	-0,07	71,80
S-19	21,36	18,42	14,24	-0,23	86,24
S-20	22,25	16,76	14,83	-0,12	75,33
S-21	41,22	30,34	27,48	-0,09	73,61
S-22	26,67	21,18	17,78	-0,16	79,42
S-23	23,46	17,21	15,64	-0,09	73,36
W-1	19,96	13,05	13,3	0,02	65,38
W-2	19,2	14,02	12,8	-0,09	73,02
W-3	21,33	14,87	14,22	-0,04	69,71
W-4	21,04	14,91	14,02	-0,06	70,87
W-5	19,97	13,78	13,3	-0,03	69,00
W-6	22,17	14,35	14,78	0,03	64,73
A-51	34,29	19,05	22,86	0,20	55,56
A-52	37,33	25,85	24,89	-0,04	69,25
S-53	30,78	21,16	20,52	-0,03	68,75
S-54	31,85	25,3	21,23	-0,16	79,43
S-55	26,59	18,72	17,76	-0,05	70,40
S-56	26,21	17,47	17,47	0	66,65
S-57	39,02	28,3	26	-0,08	72,53
S-58	37,19	23,36	24,79	0,06	62,81
S-59	37,19	22,5	24,79	0,10	60,50

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de altura real da torre e de altura real da cadeia de isoladores foram calculados com base nas dimensões das silhuetas das torres e estão compilados na segunda e terceira colunas da Tabela 5, respectivamente. O erro relativo apresentado na penúltima coluna, quando negativo, indica que a cadeia de isoladores alocada com a regra de 2/3 da altura total da

torre está abaixo da altura real medida nos perfis de torres. Já o valor de erro positivo significa que a cadeia de isoladores com altura determinada pela regra de $2/3$ da altura total da torre está acima da altura real. A razão entre os valores de altura total da torre e altura da cadeia de isoladores nos perfis de torres avaliados evidencia uma altura média da cadeia de isoladores em torno de 70% da altura da torre. Quando comparado com os valores utilizando a estratégia de $2/3$ da altura real da torre, são observados erros percentuais desprezíveis, evidenciando que a análise não comprometerá os valores de sobretensão observados nas cadeias de isoladores do sistema em análise, visto que a consideração da altura da cadeia de isoladores em $2/3$ da altura real da torre está alocando os isoladores abaixo das alturas médias reais dos perfis de torres de linhas de transmissão. Entretanto, é importante observar os valores mais elevados de erros para algumas silhuetas dos tipos S-19, S-20, S-22, A-51 e S-54, para as quais é mais apropriado o uso da altura real das cadeias de isoladores em estudos de desempenho elétrico da linha em substituição à altura de $2/3$ da altura total da torre.

Vale destacar que esta estratégia de modelagem de torres com cadeia de isoladores instaladas a altura de dois terços da altura total da torre é comumente empregada em estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão sendo que nenhuma análise comparativa como a apresentação nesta seção foi identificada na revisão bibliográfica.

4.3. ESTUDO 03 –Estudo de desempenho elétrico da linha de transmissão acometida por *backflashover* com análise comparativa de resultados obtidos com as cadeias de isoladores posicionadas a $2/3$ da altura total da torre e com cadeias de isoladores à altura identificada em silhuetas de torres reais.

Dentre as silhuetas de torres analisadas, os modelos detalhados na Tabela 6 são aqueles que apresentam maior similaridade estrutural com a torre de LT de 500 kV modelada neste trabalho.

O maior percentual, ou seja, as silhuetas de torre de transmissão que dispõem de sua cadeia de isoladores de forma mais próxima à altura total, ocorrem nos perfis S22 e S54, nos quais a posição da cadeia de isoladores está a 79,4% da altura total da torre. Já o menor percentual, sendo a silhueta com a cadeia de isoladores posicionada à maior distância da altura total da torre é a S59, na qual a cadeia de isoladores está posicionada a aproximadamente 60,5% da altura total.

Tabela 6 – Análise do posicionamento da cadeia de isoladores dos perfis das torres com silhueta similar às torres da LT investigada neste trabalho.

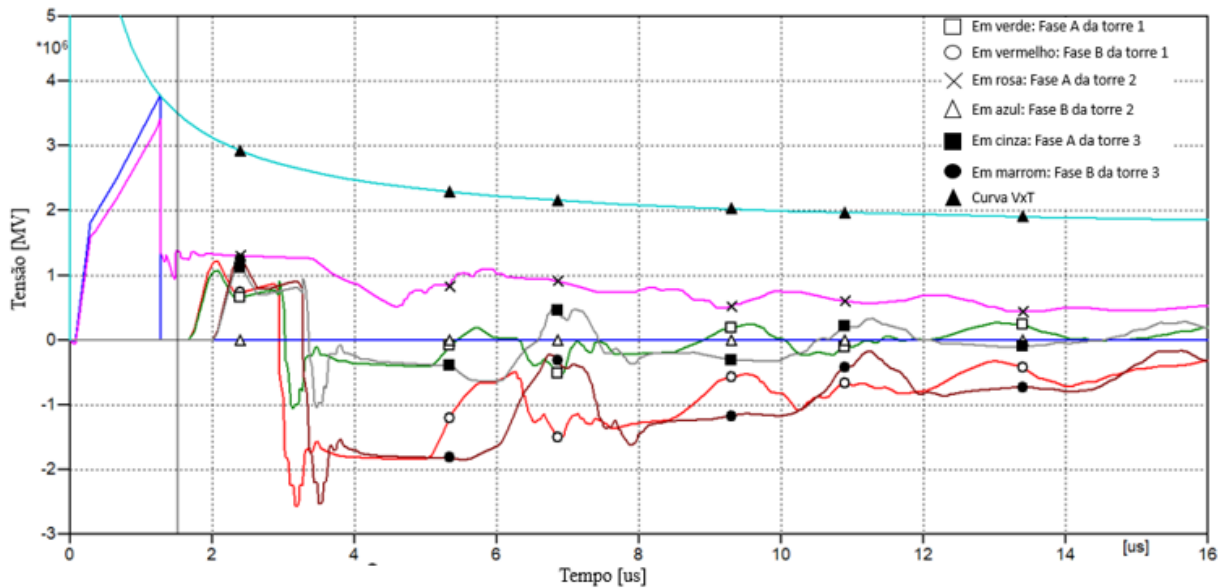
Perfil da torre	Altura real da torre [m]	Altura da cadeia de isoladores [m]	Porcentagem da altura real da cadeia em relação à altura total.
S12	33,27	23,77	71,4%
S13	28,96	18,78	64,8%
S14	28,04	20,25	72,2%
S15	26,33	19,22	73,0%
S16	23,27	16,22	69,7%
S18	21,03	15,1	71,8%
S20	22,25	16,76	75,3%
S21	41,22	30,34	73,6%
S22	26,67	21,18	79,4%
S23	23,46	17,21	73,4%
S53	30,78	21,16	68,7%
S54	31,85	25,3	79,4%
S55	26,59	18,72	70,4%
S56	26,21	17,47	66,7%
S58	37,19	23,36	62,8%
S59	37,19	22,5	60,5%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com intuito de avaliar o impacto destas diferenças das alturas reais das cadeias de isoladores em comparação à altura de $2/3$ da altura total utilizada na modelagem computacional, um estudo investigativo foi conduzido considerando a altura real das cadeias de isoladores com a finalidade de averiguar se há alguma influência no desempenho elétrico da LT durante evento de *backflashover*. Dessa forma, no primeiro cenário a cadeia de isoladores foi posicionada à altura de 60,5% da altura total da torre (43,57 m), ou seja, em 26,36 m.

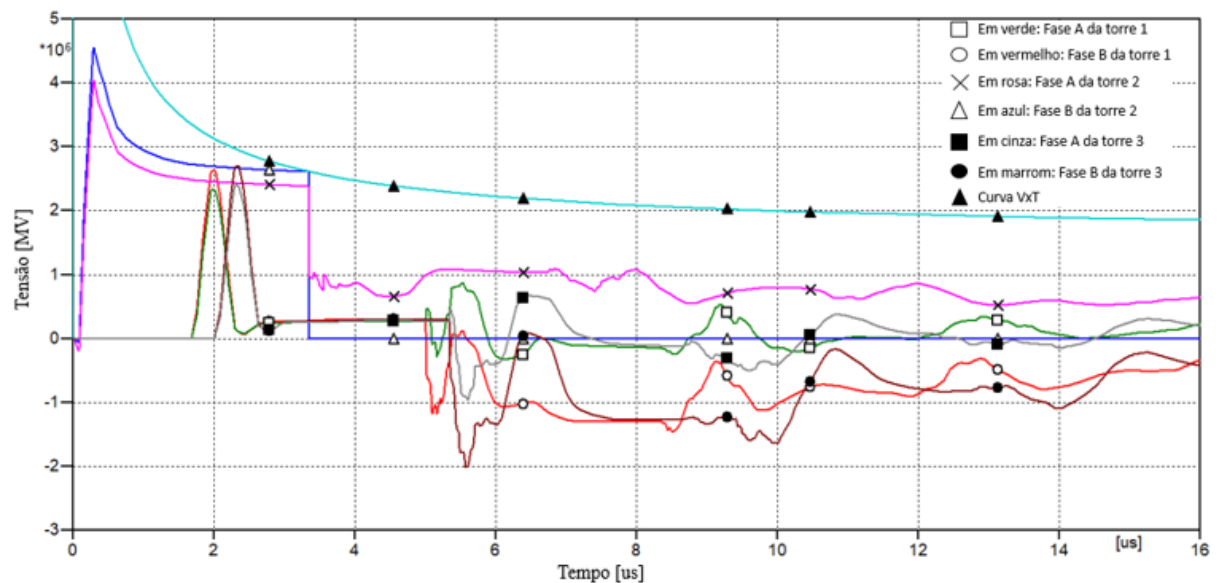
As Figuras 33 e 34 apresentam as sobretensões impostas às cadeias de isoladores quando posicionadas em 60,5% da altura total da torre sob ação de correntes impulsivas do tipo dupla rampa e dupla exponencial, respectivamente.

Figura 33 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 60,5% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 60,5% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise das Figuras 33 e 34 permite identificar que para ambos os tipos de formas de onda de corrente de descarga, a disrupção ocorreu na cadeia de isoladores da fase B da Torre 2 no centro do trecho da linha de transmissão investigado. Na Tabela 7 estão resumidos os

parâmetros de desempenho elétrico da LT com base nos diferentes tipos de corrente de retorno analisados neste estudo.

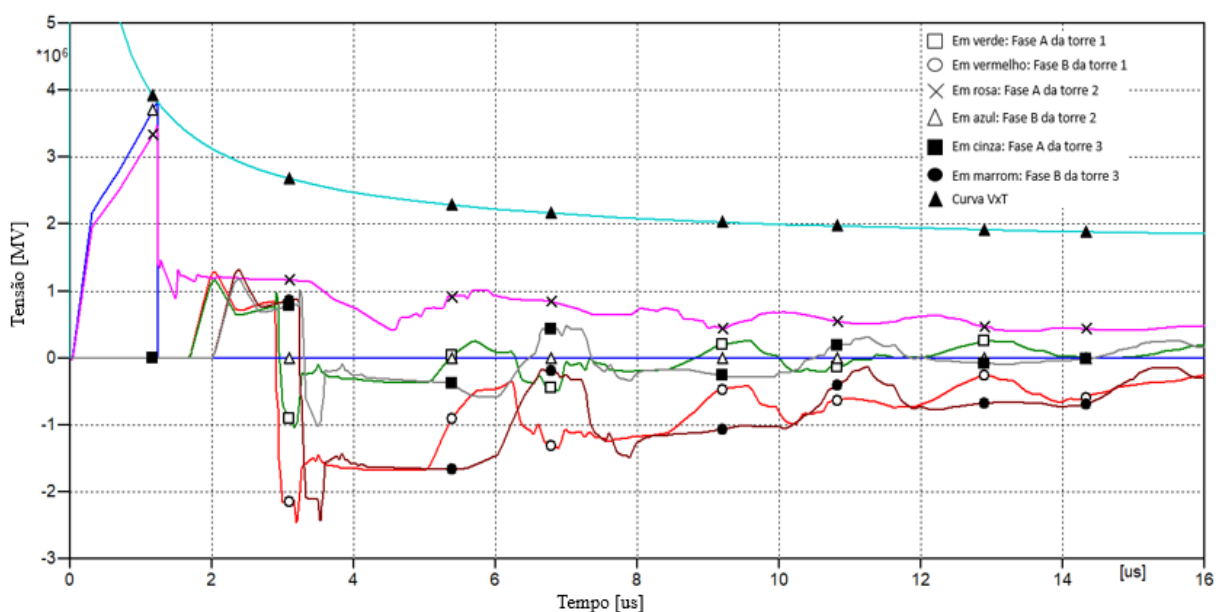
Tabela 7 – Comparação dos valores de sobretensão, corrente crítica de descarga e tempo de disrupção na cadeia de isoladores posicionada à 60,5% da altura da torre para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.

Parâmetros	Descarga do tipo Dupla Rampa	Descarga do tipo Dupla Exponencial
Corrente crítica de descarga [kA]	101,75	109,01
Tensão disruptiva [MV]	3,77	2,61
Instante de tempo de disrupção [μ s]	1,26	3,35

Fonte: Elaborada pelo autor.

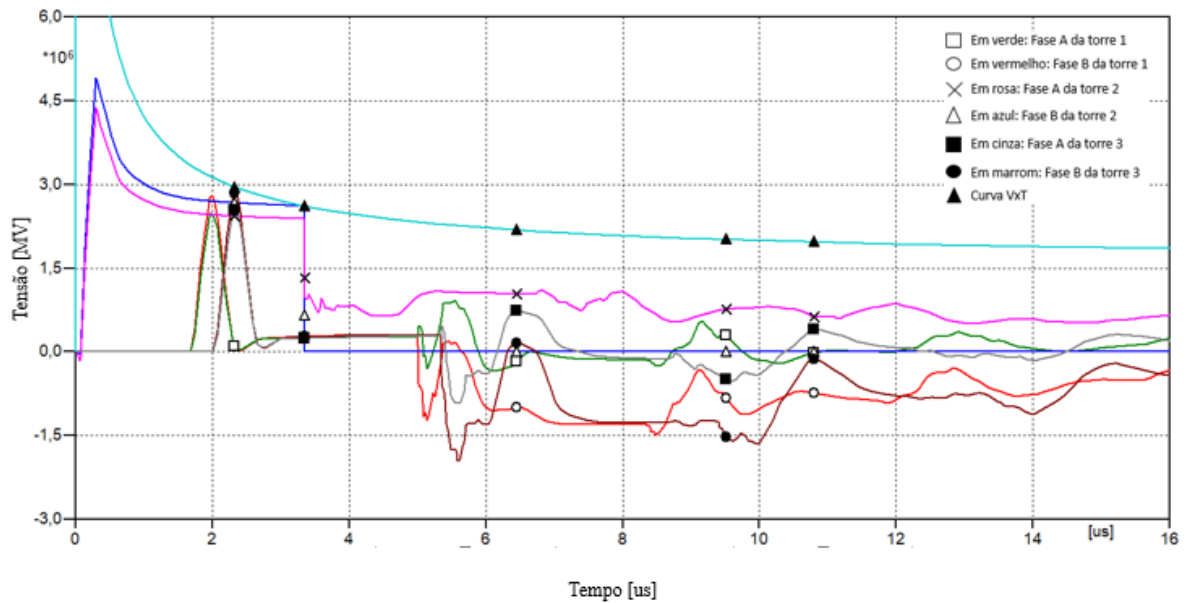
No segundo cenário, as cadeias de isoladores foram instaladas a 79,4% da altura total da torre (43,57 m), ou seja, a 34,59 m. As Figuras 35 e 36 mostram as sobretensões impostas às cadeias nesse posicionamento vertical, considerando a aplicação de correntes impulsivas de dupla rampa e dupla exponencial.

Figura 35 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 79,4% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionadas à 79,4% da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 8 reúne os parâmetros de desempenho elétrico da linha de transmissão obtidos para os dois estudos de caso supracitados.

Tabela 8 – Comparação dos valores de sobretensão, corrente crítica de descarga e tempo de disrupção na cadeia de isoladores posicionada à 79,4% da altura da torre para cada tipo de corrente de descarga atmosférica.

Parâmetros	Descarga do tipo Dupla Rampa	Descarga do tipo Dupla Exponencial
Corrente crítica de descarga [kA]	92,98	102,45
Tensão disruptiva [MV]	3,82	2,94
Instante de tempo de disrupção [μs]	1,23	2,34

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos cenários analisados nos estudos 1 e 3, foi observado que o fenômeno de *backflashover* ocorreu exclusivamente na cadeia de isoladores da fase B da torre 2, independentemente do tipo de corrente de descarga atmosférica aplicada. A fim de comparar adequadamente esses cenários, os parâmetros elétricos associados à ocorrência do *backflashover* estão organizados na Tabela 9, quando a corrente de descarga é dupla rampa e na Tabela 10 quando a corrente de descarga é dupla exponencial.

Tabela 9 – Comparação entre parâmetros de desempenho elétrico da LT obtidos em cada cenário analisado quando a corrente de descarga é do tipo dupla rampa.

Parâmetros	Estudo 1 – Cadeia de isoladores posicionada a 2/3 (66,66%) da altura total da torre	Estudo 3 – Cadeia de isoladores posicionada a 60,5% da altura total da torre.	Estudo 3 – Cadeia de isoladores posicionada a 79,4% da altura total da torre.
Corrente de descarga [kA]	98,70	101,75	92,98
Tensão disruptiva [MV]	3,79	3,77	3,82
Tempo de disrupção [μ s]	1,26	1,26	1,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 10 – Comparação entre parâmetros de desempenho elétrico da LT obtidos em cada cenário analisado quando a corrente de descarga é do tipo dupla exponencial.

Parâmetros	Estudo 1 – Cadeia de isoladores posicionada a 2/3 (66,66%) da altura total da torre	Estudo 3 – Cadeia de isoladores posicionada a 60,5% da altura total da torre.	Estudo 3 – Cadeia de isoladores posicionada a 79,4% da altura total da torre.
Corrente de descarga [kA]	108,96	109,01	102,45
Tensão disruptiva [MV]	2,61	2,61	2,94
Tempo de disrupção [μ s]	3,35	3,35	2,34

Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando os dados compilados nas Tabela 9 e 10 em conjunto com as Figuras 33, 34, 35 e 36, torna evidente o impacto do posicionamento da cadeia de isoladores no desempenho da linha mediante a incidência de descarga atmosférica indireta na torre. A comparação dos resultados dos Estudos 1 e 3, quando a cadeia de isoladores está posicionada na menor altura de instalação (60,5% da altura total da torre – Estudo 3), independentemente da forma de onda da corrente de descarga utilizada, o desempenho da LT perante a sobretensões atmosféricas foi melhor, sendo necessário um valor mais elevado de corrente crítica de descarga para que ocorra

a interrupção. A comparação dos resultados de estudos 1 e 3 mostra que quando a cadeia de isoladores está ligeiramente mais baixa (60,5%) que os 2/3 da altura da torre considerado no primeiro estudo, a corrente crítica de descarga do tipo dupla rampa foi 3% maior para a ocorrência do *backflashover*. Em relação ao posicionamento mais próximo ao topo da torre (79,4% da altura total da torre – Estudo 3), a variação foi 5,8% menor que a corrente crítica obtida no Estudo 1.

Para corrente de descarga tipo dupla exponencial, a variação da corrente crítica de descarga foi menor, mas ainda assim existente, com o mesmo comportamento identificado para corrente do tipo dupla rampa, ou seja, quanto menor a altura da cadeia de isoladores maior a amplitude da corrente crítica de descarga. Quando a cadeia de isoladores foi considerada na menor altura, foi necessária uma magnitude de corrente crítica de descarga ligeiramente superior (0,5% maior que a corrente crítica quando posicionado a 2/3 da altura), enquanto no posicionamento em 79,4% da altura da torre é obtido um valor de corrente crítica de descarga 5,97% menor para ocorrência de *backflashover*.

Assim, ao considerar a posição da cadeia de isoladores e a altura da torre como parâmetros críticos para o bom desempenho elétrico perante sobretensões atmosféricas na etapa de projeto de linhas de transmissão, estes critérios podem auxiliar efetivamente no alcance de níveis operacionais mais seguros e eficientes, contribuindo na promoção de maior estabilidade no fornecimento de energia e, conseqüentemente, na redução de prejuízos financeiros advindos de interrupções no sistema elétrico. Obviamente, a determinação da altura de instalação das cadeias de isoladores no projeto de linhas de transmissão aéreas, deve atender às alturas e distâncias mínimas de segurança dos cabos da linha ao solo e a obstáculos conforme prescrito na ABNT NBR-5422.

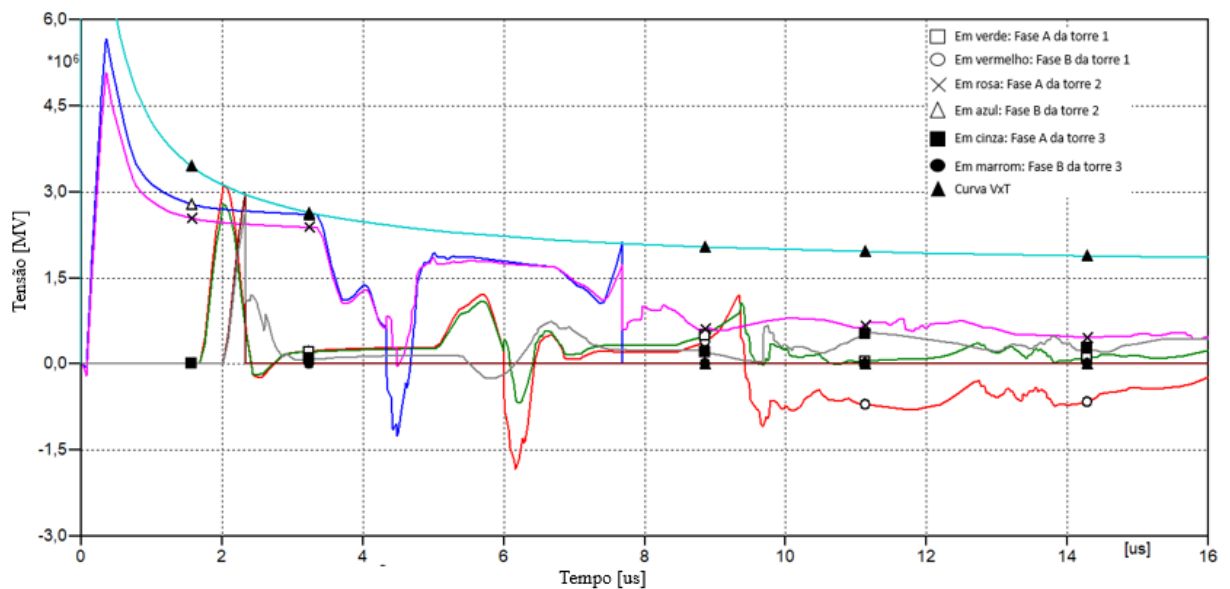
4.4. ESTUDO 04 – Investigação da influência da variação da velocidade de propagação da onda eletromagnética no desempenho elétrico de LTs

Nesse estudo, utilizando a modelagem computacional apresentada no Capítulo 3 foi promovida a variação da velocidade de propagação da onda eletromagnética na torre no momento da descarga atmosférica, de forma a avaliar o comportamento dos arranjos isolantes e do sistema elétrico em si. Como detalhado na subseção 2.4, a velocidade de propagação utilizada em estudos de desempenho de LTs pode variar de forma significativa, com valores entre 71% e 95% da velocidade da luz. Portanto, as simulações computacionais realizadas nesses estudos consideraram 70%, 75%, 80%, 85%, 90% e 95% da velocidade da luz para as

correntes de descarga com formas de onda do tipo dupla exponencial e dupla rampa. Foram considerados duas alturas de fixação dos arranjos isoladores: A modelagem com a cadeia de isoladores posicionadas a $2/3$ da altura da torre, cujo posicionamento foi avaliado no estudo 1 e a modelagem com a cadeia de isoladores na altura real, baseada nas medidas na silhueta da torre, a qual foi representada por dois trechos de linha de transmissão, conforme disposto na Figura 20, com comprimento da primeira seção igual a 7,9 m e a segunda à 35,67 m de acordo com as configurações da torre modelada neste trabalho, apresentadas na Figura 18 e Tabela 3.

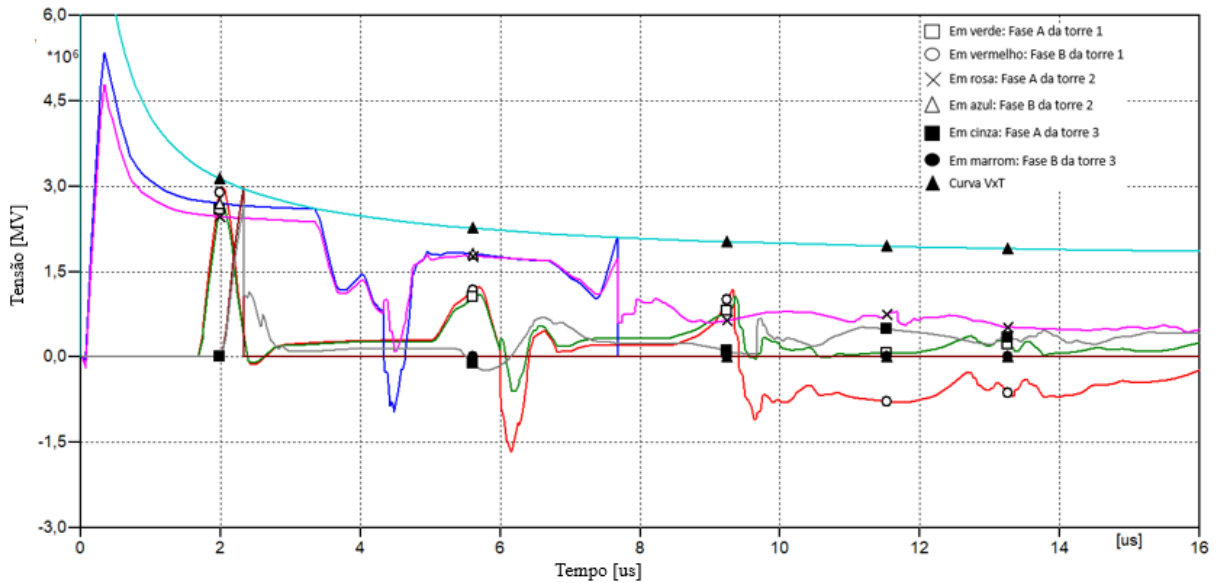
As Figuras 37, 38, 39, 40, 41 e 42 apresentam as sobretensões observadas na cadeia de isoladores posicionadas à $2/3$ da altura da torre quando o sistema elétrico é submetido a corrente de descarga dupla exponencial com as diferentes velocidades de propagação.

Figura 37 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à $2/3$ da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.



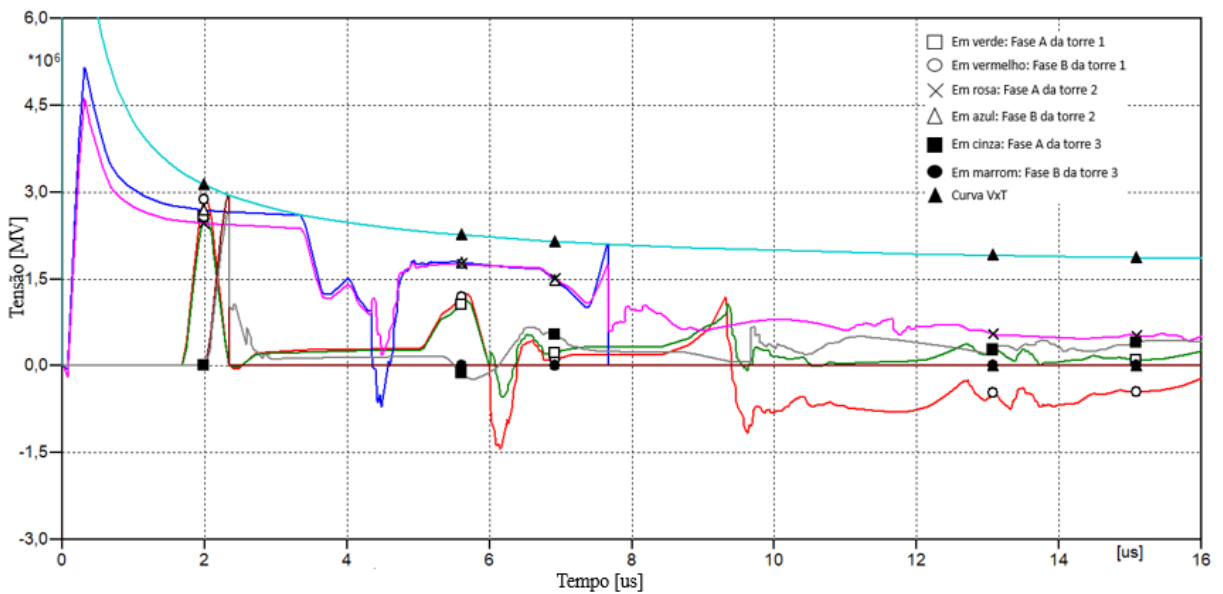
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.



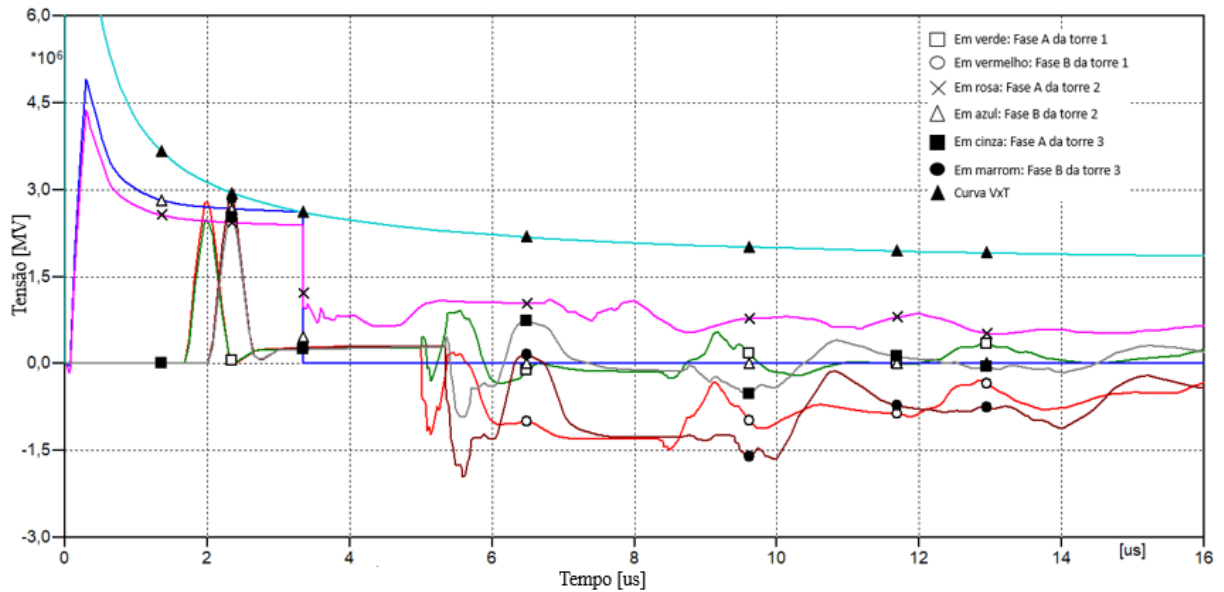
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.



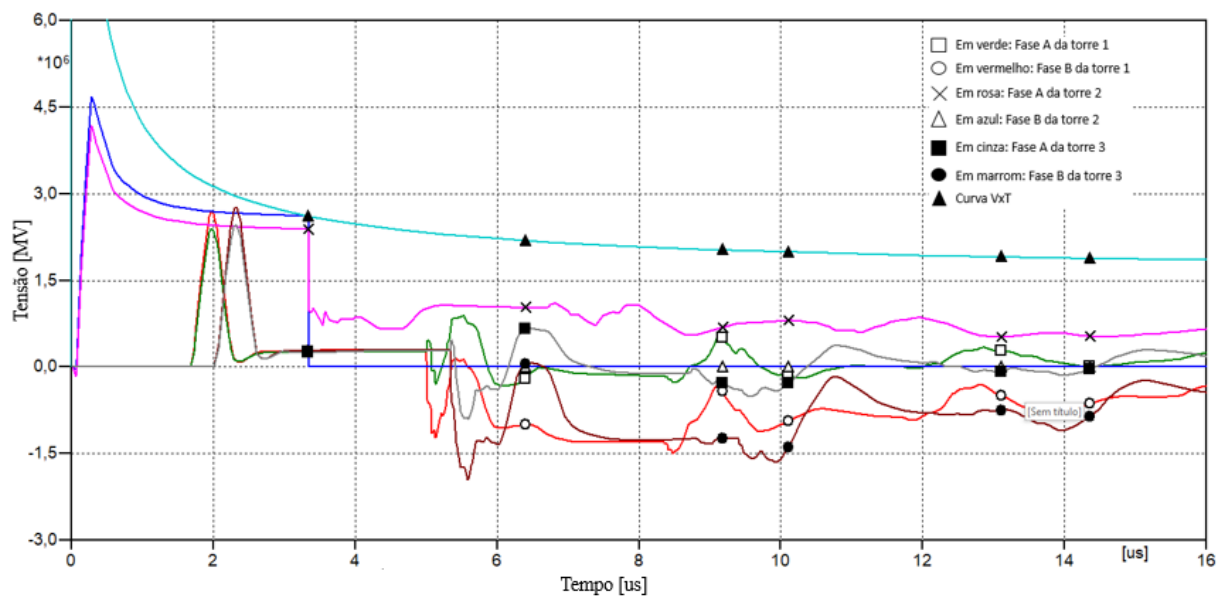
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 40 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.



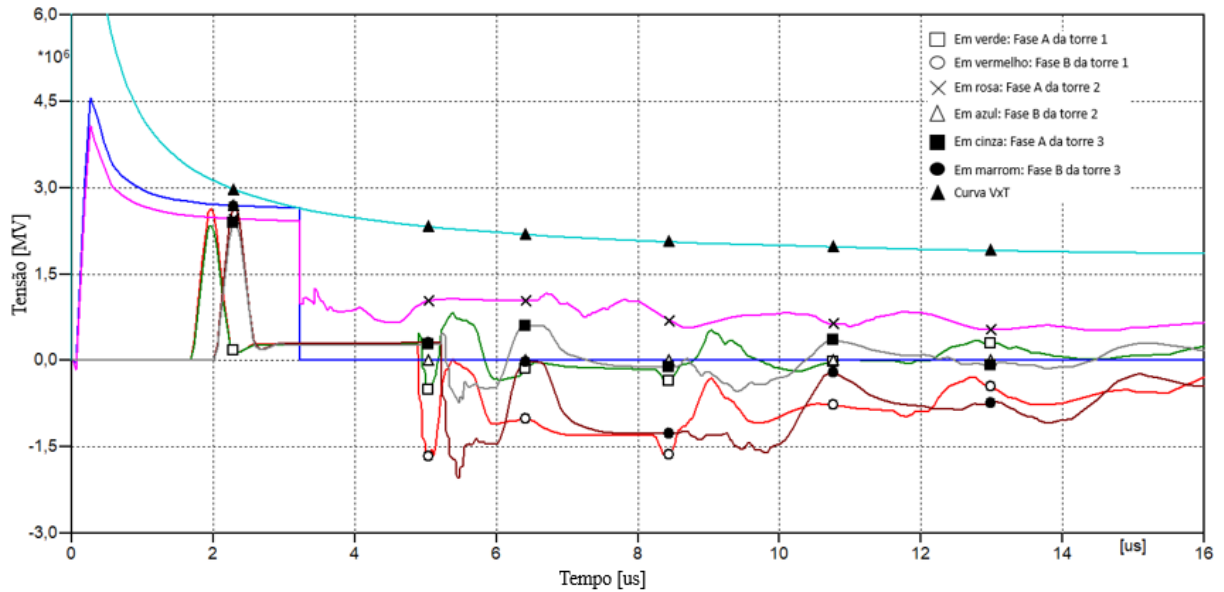
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 42 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 11 resume os valores respectivos à corrente crítica de descarga, amplitude da sobretensão e tempo de ocorrência da disrupção para cada velocidade de propagação empregada no caso em análise, tendo os termos FB-T2 e FB-T3 referindo-se a fase B da torre 2 e 3, respectivamente.

Tabela 11 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de backflashover para isoladores instalados à 2/3 da altura da torre (dupla exponencial).

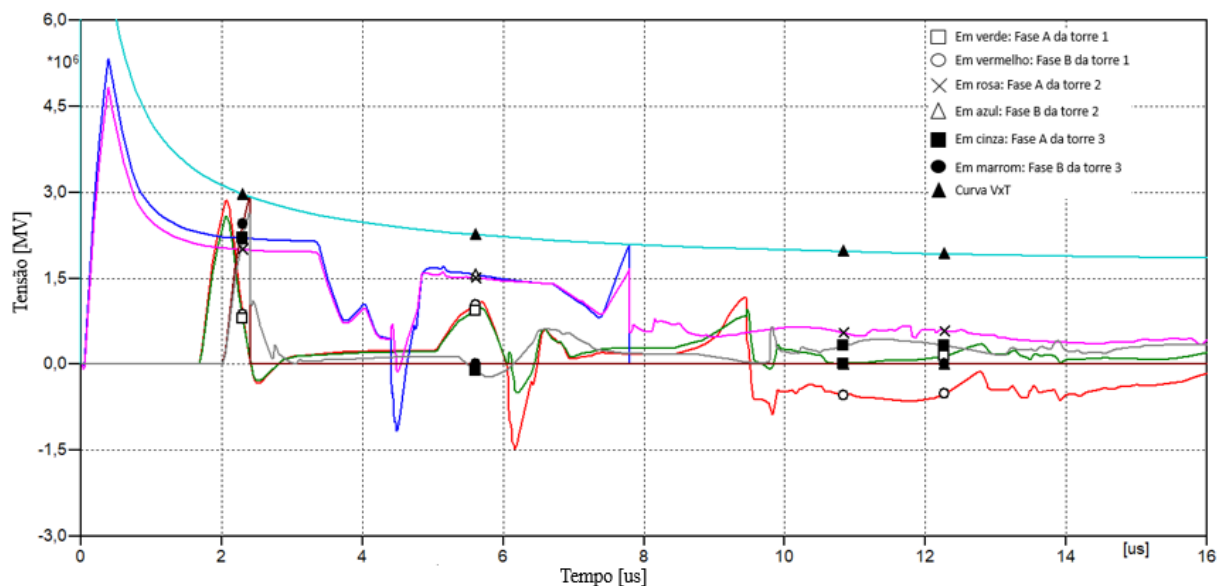
Velocidade de propagação	Corrente de descarga [kA]	Tensão disruptiva (FB-T2) [MV]	Instante de tempo de disrupção (FB-T2) [μ s]	Tensão disruptiva (FB-T3) [MV]	Instante de tempo de disrupção (FB-T3) [μ s]
70% da velocidade da luz	100,64	2,12	7,68	2,92	2,33
75% da velocidade da luz	104,89	2,12	7,70	2,94	2,36
80% da velocidade da luz	108,91	2,12	7,70	2,94	2,37
85% da velocidade da luz	108,96	2,61	3,35	-	-
90% da velocidade da luz	109,03	2,61	3,34	-	-
95% da velocidade da luz	109,96	2,61	3,33	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que para os isoladores posicionados à 2/3 da altura da torre, a sobretensão disruptiva é reduzida em velocidades de propagação acima de 85% da velocidade da luz. Ademais, acima desta velocidade a disrupção ocorreu apenas na fase B da torre 2, sendo que para velocidades inferiores a disrupção ocorreu na fase B da Torre 3 e também na fase B também na fase B da Torre 2. Também pode ser observado um aumento da corrente crítica de descarga com o aumento da velocidade de propagação das ondas de tensão e de corrente nas torres, com destaque para os significativos aumentos na corrente crítica a partir de velocidades maiores do que 80% da velocidade da luz no vácuo.

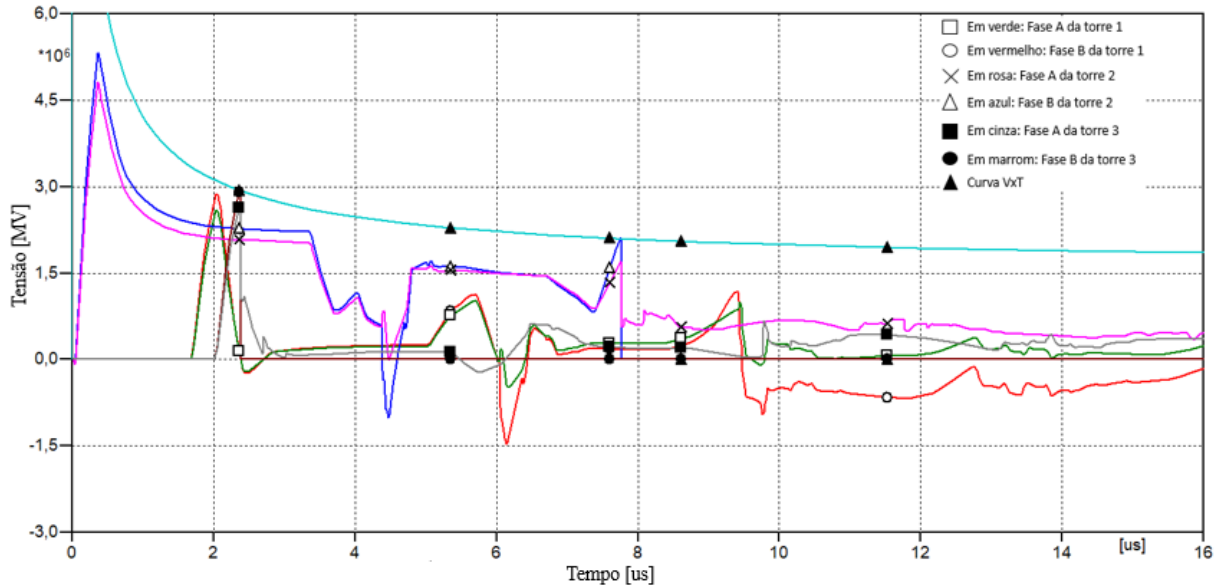
As Figuras 43, 44, 45, 46, 47 e 48 exibem as sobretensões observadas na cadeia de isoladores, disposta na altura real do perfil da torre. Esses resultados foram obtidos quando o sistema elétrico foi submetido a uma corrente de descarga de perfil dupla exponencial, analisando os efeitos causados por diferentes velocidades de propagação.

Figura 43 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.



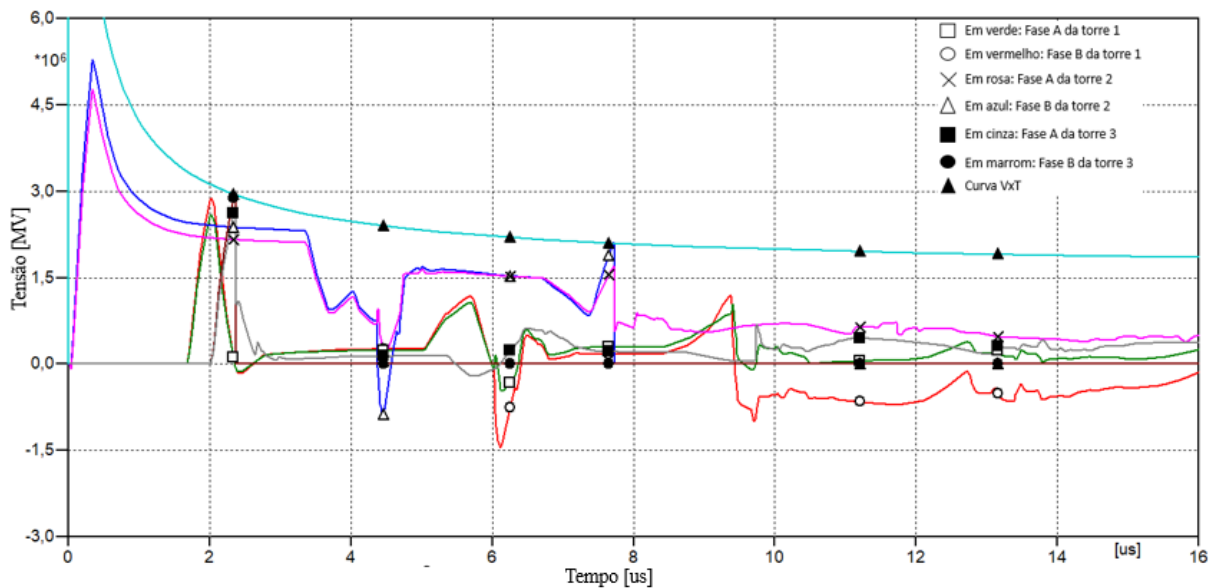
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 44 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.



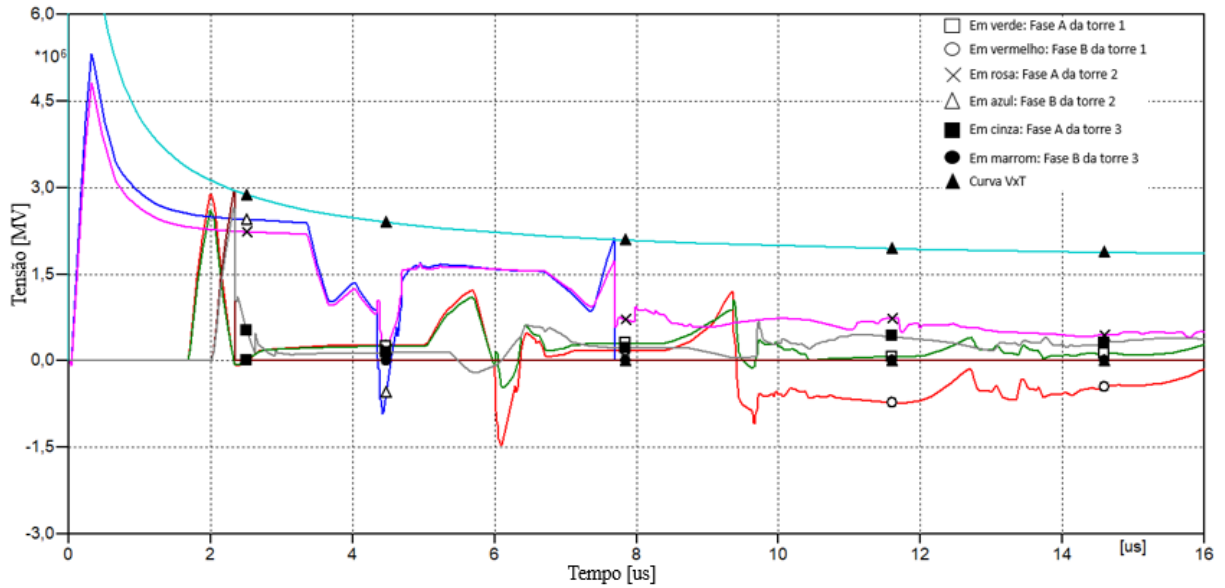
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.



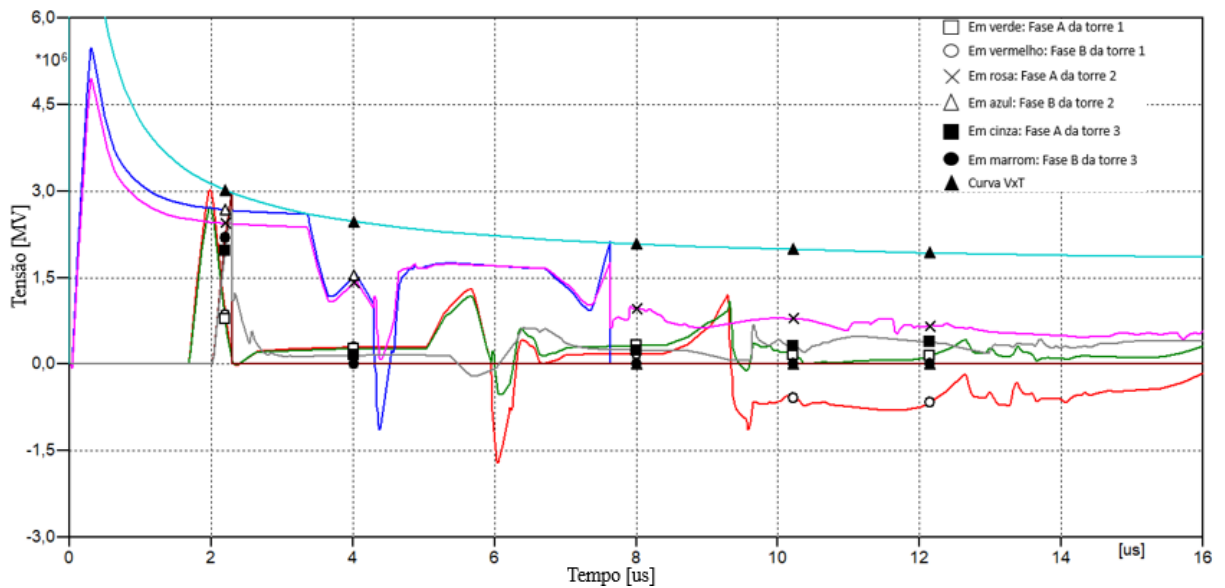
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 46 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.



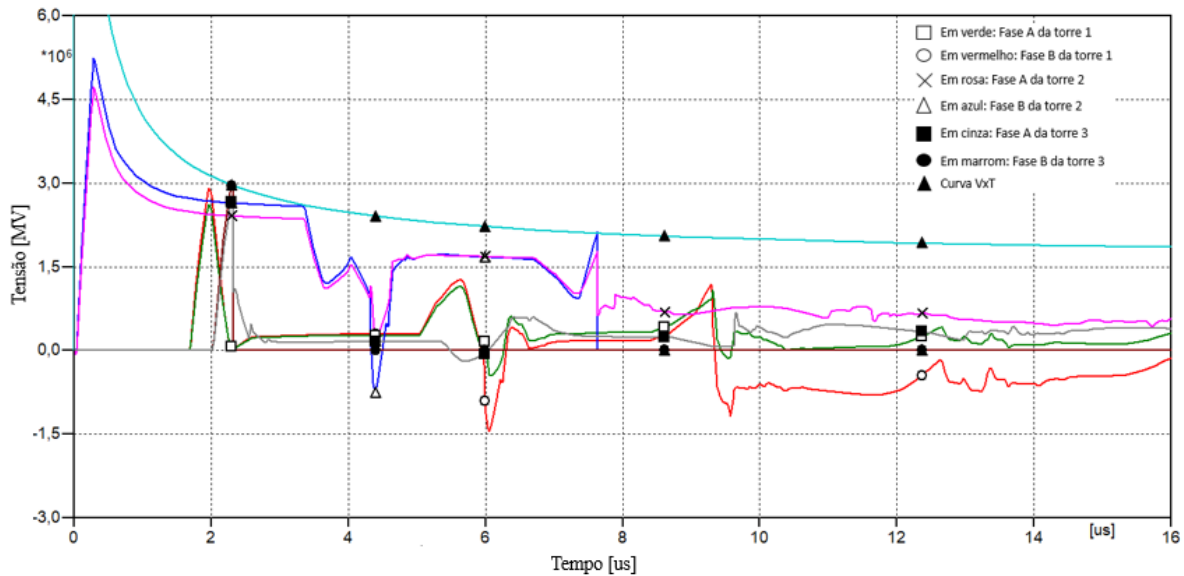
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla exponencial e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 12, estão organizados os dados sobre a amplitude da sobretensão disruptiva, a corrente crítica de descarga e os tempos de disrupção, levando em consideração cada velocidade de propagação aplicada no estudo, tendo os termos FB-T2 e FB-T3 referindo-se a fase B da torre 2 e 3, respectivamente.

Tabela 12 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de *backflashover* para isoladores instalados na altura real do perfil da torre (dupla exponencial).

Velocidade de propagação	Corrente de descarga [kA]	Tensão disruptiva (FB-T2) [MV]	Instante de tempo de disrupção (FB-T2) [μ s]	Tensão disruptiva (FB-T3) [MV]	Instante de tempo de disrupção (FB-T3) [μ s]
70% da velocidade da luz	89,82	2,13	7,79	2,92	2,39
75% da velocidade da luz	93,35	2,12	7,76	2,93	2,38
80% da velocidade da luz	97,11	2,11	7,72	2,94	2,36
85% da velocidade da luz	100,57	2,13	7,69	2,95	2,34
90% da velocidade da luz	104,37	2,13	7,67	2,95	2,32
95% da velocidade da luz	107,98	2,13	7,63	2,96	2,31

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos isoladores posicionados na altura real do perfil da torre, observa-se um aumento da corrente crítica de descarga à medida que a velocidade de propagação aumenta de

70% para 95% da velocidade da luz. Esse efeito está diretamente relacionado à posição do cabo de fase, que nesta configuração está a 7,9 metros de distância vertical do cabo para-raios. Em comparação, na configuração onde o cabo de fase está a $2/3$ da altura da torre, a distância é de 14,52 metros — quase o dobro da anterior. Levando em conta esta maior distância do cabo de fase ao cabo para-raios, obtida quando a cadeia de isoladores está a $2/3$ da altura da torre, o tempo necessário para que a corrente de descarga percorra a torre até o aterramento e retorne à cadeia de isoladores aumenta. Esse atraso causa uma redução na diferença de potencial (DDP) que estressa a cadeias de isoladores. Sob esta ótica, tal fato pode justificar a necessidade de maiores magnitudes de corrente descarga para gerar o mesmo valor de sobretensão disruptiva observado nos casos onde a cadeia de isoladores foi posicionada a altura real na torre.

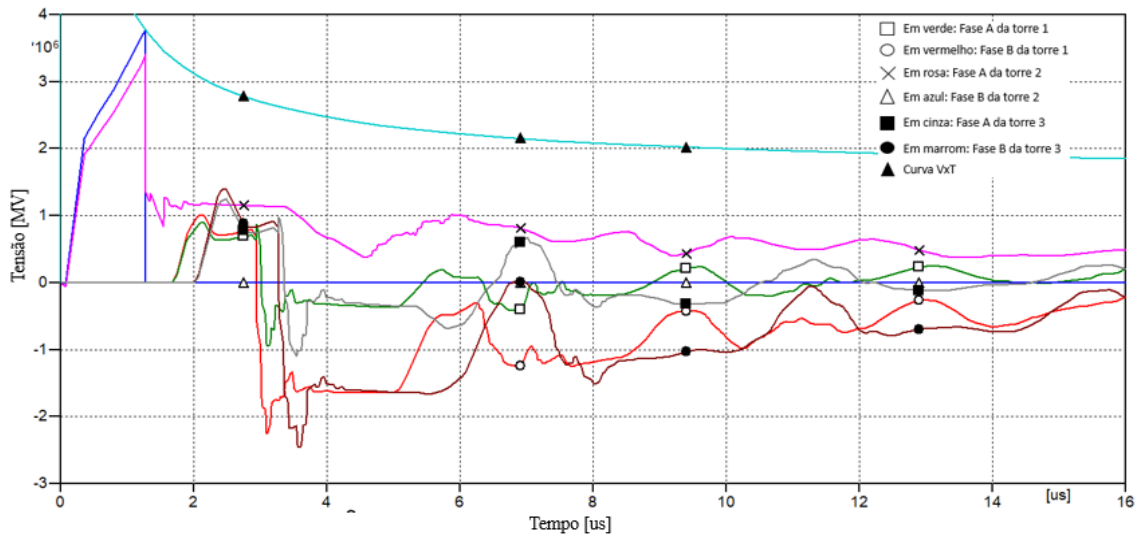
Analisando comparativamente os dois métodos, observa-se que a aplicação da altura real da cadeia de isoladores tende a resultar em uma amplitude de corrente crítica de descarga menor quando comparada àquela alcançada para isoladores posicionados a $2/3$ da altura total da torre. Isso se verifica independentemente do valor da velocidade de propagação da onda eletromagnética na torre. Dessa forma, os resultados de desempenho elétrico de LTs modeladas considerando a altura da cadeia de isoladores em $2/3$ da altura da estrutura permitem as seguintes constatações:

- Para velocidades de propagação na torre de até 80% da velocidade da luz, as correntes críticas de descarga são superiores às obtidas quando se considera a altura real das cadeias de isoladores;
- Para velocidade de propagação de 85% da velocidade da luz: A corrente crítica de descarga foi de 108,96 kA, um valor 8,34% maior do que os 100,57 kA obtidos considerando a altura real da cadeia de isoladores. Essa corrente gerou uma sobretensão de 2,61 MV, 11,52% menor em relação aos 2,95 MV alcançados com a altura real.
- Para velocidade de propagação na torre superiores a 85% da velocidade da luz: Foram necessárias correntes críticas de descarga superiores para produzir sobretensões disruptivas com amplitudes inferiores aos valores obtidos para cadeia de isoladores com altura real.

Portanto, é notória a importância em determinar com precisão o valor de velocidade de propagação da onda eletromagnética nas torres do sistema de transmissão para obtenção de resultados mais exatos e em concordância com os fenômenos físicos reais em estudos de desempenho elétrico das linhas de transmissão.

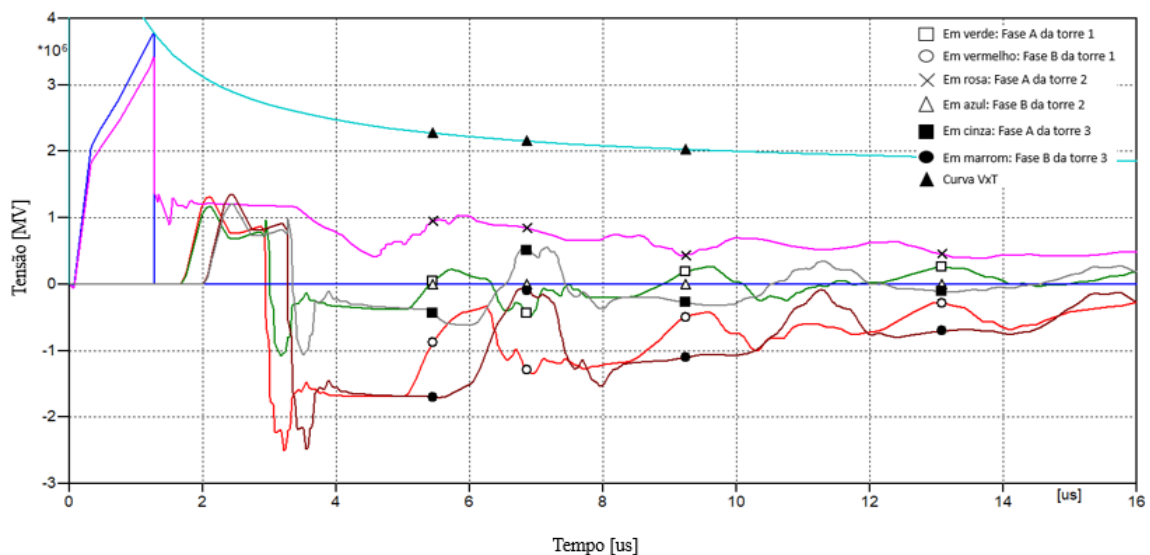
Na segunda análise, o processo foi realizado com a utilização da fonte de descarga dupla rampa, levando em consideração os impactos de diversas velocidades de propagação. As Figuras 49, 50, 51, 52, 53 e 54 apresentam as sobretensões registradas na cadeia de isoladores posicionada à 2/3 da altura da torre.

Figura 49 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.



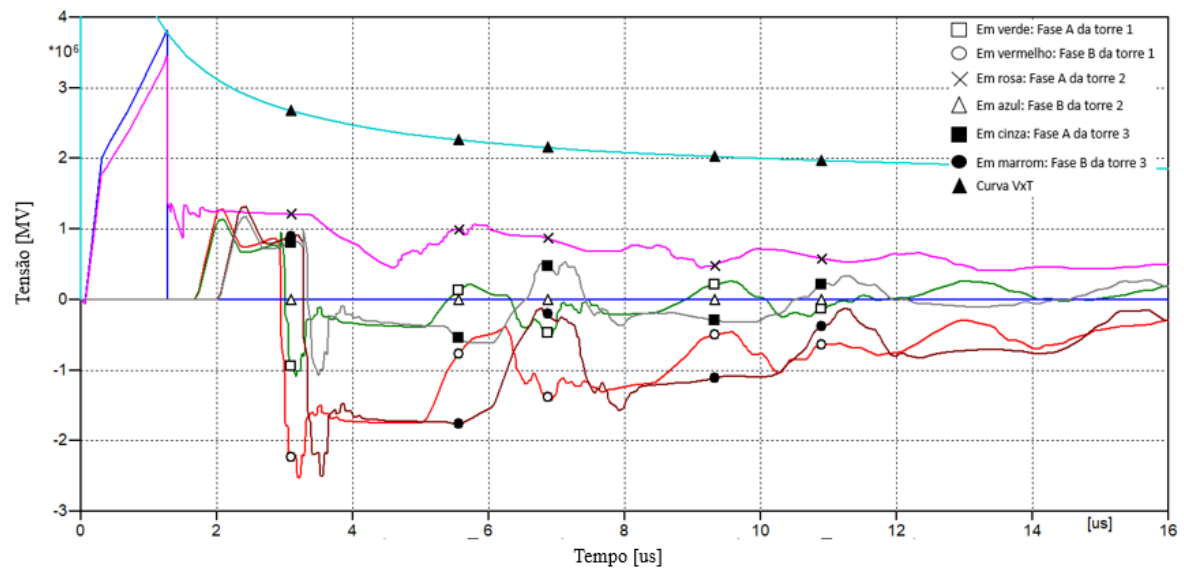
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.



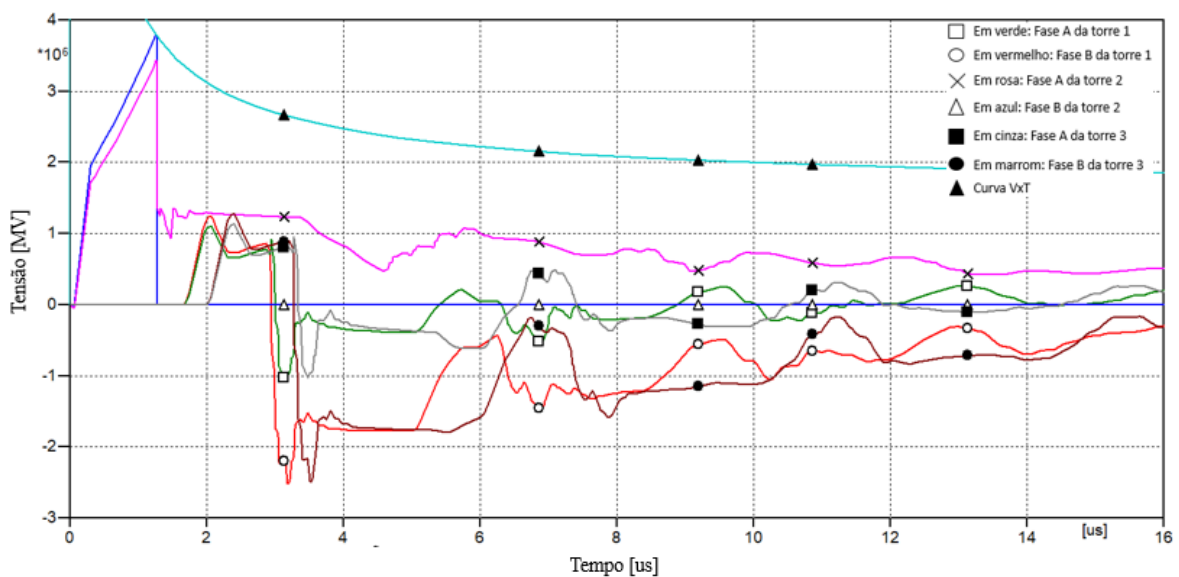
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.



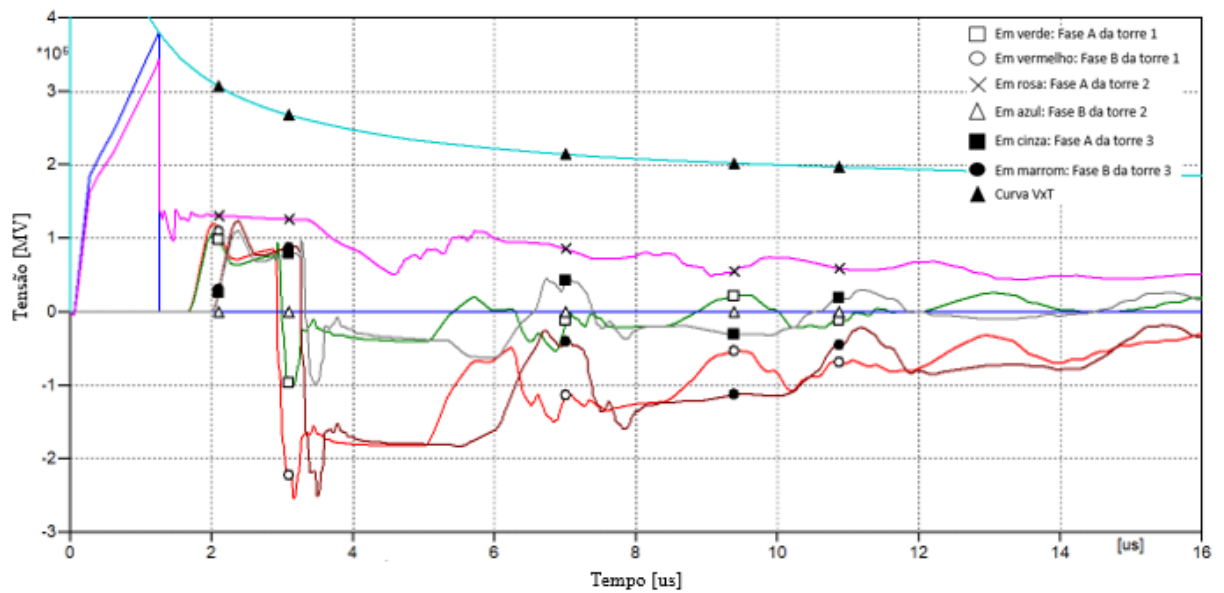
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.



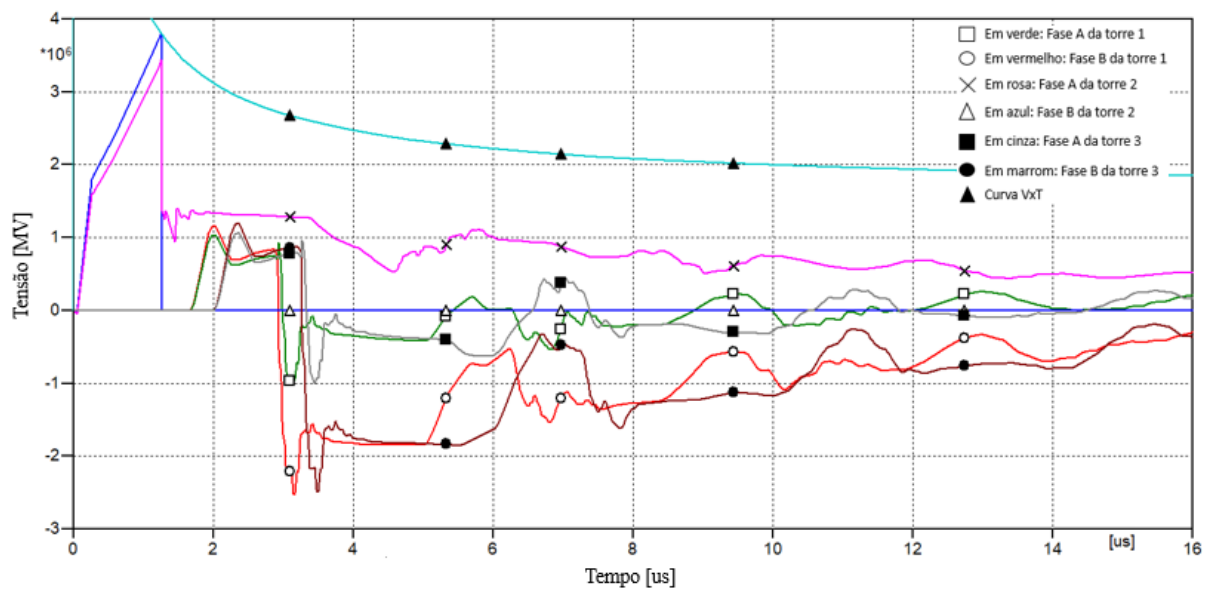
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 53 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada à 2/3 da altura total da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados sobre a amplitude da sobretensão, a corrente crítica de descarga e os tempos de interrupção estão compilados na Tabela 13, levando em consideração cada uma das velocidades de propagação.

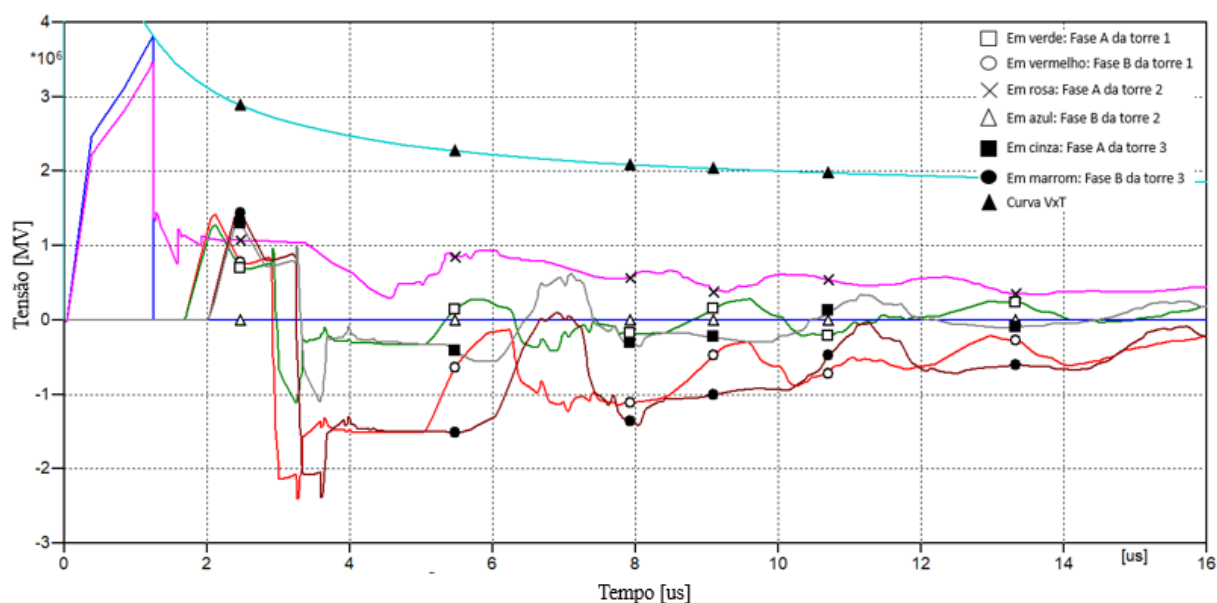
Tabela 13 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de *backflashover* para isoladores instalados em 2/3 da altura da torre (dupla rampa).

Velocidade de propagação	Corrente de descarga [kA]	Tensão disruptiva [MV]	Instante de tempo de interrupção [μ s]
70% da velocidade da luz	91,11	3,77	1,27
75% da velocidade da luz	94,04	3,79	1,26
80% da velocidade da luz	96,10	3,74	1,26
85% da velocidade da luz	98,70	3,79	1,26
90% da velocidade da luz	100,73	3,78	1,25
95% da velocidade da luz	102,37	3,80	1,26

Fonte: Elaborada pelo autor.

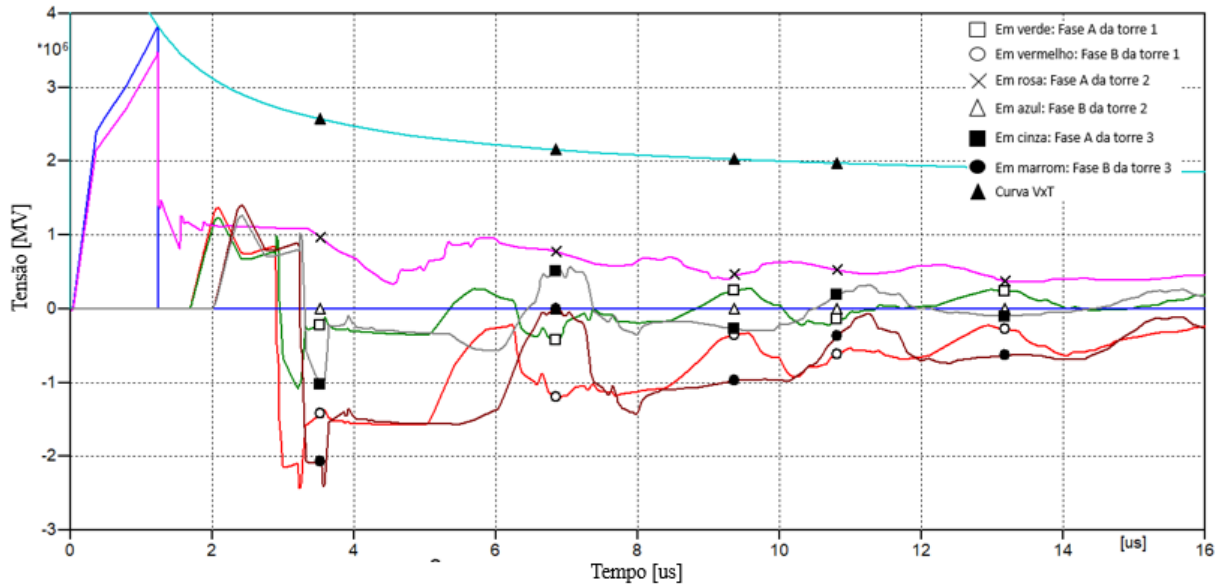
Considerando a altura real dos isoladores na silhueta da torre, as Figuras 55, 56, 57, 58, 59 e 60 apresentam as sobretensões observadas ao variar a velocidade de propagação da descarga atmosférica tipo dupla rampa.

Figura 55 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 70% da velocidade da luz.



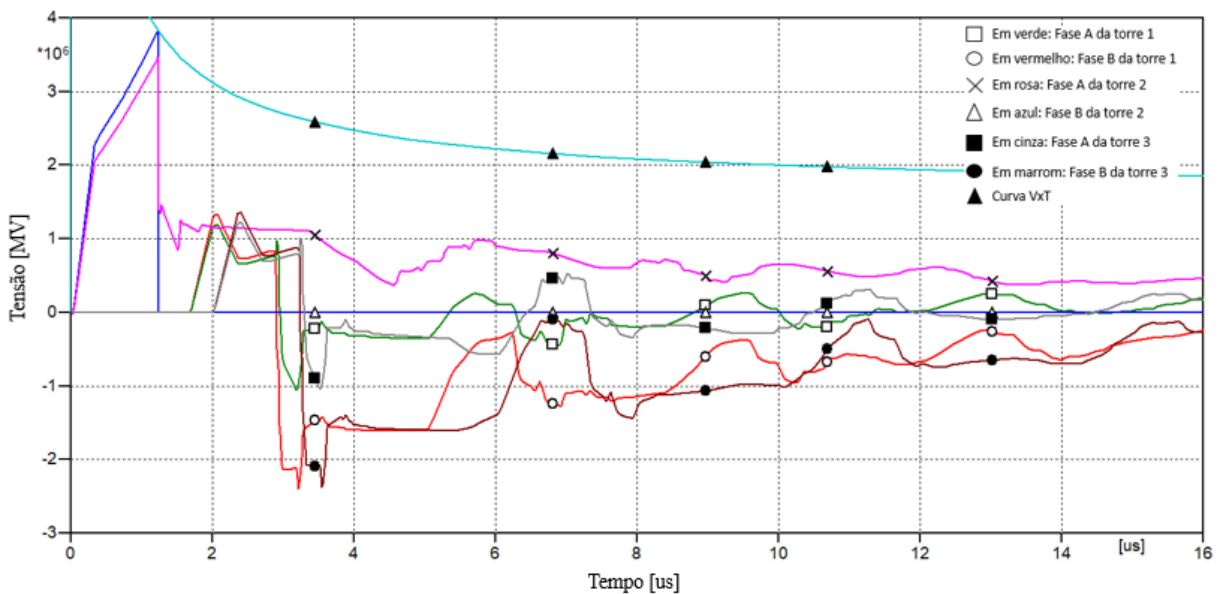
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 75% da velocidade da luz.



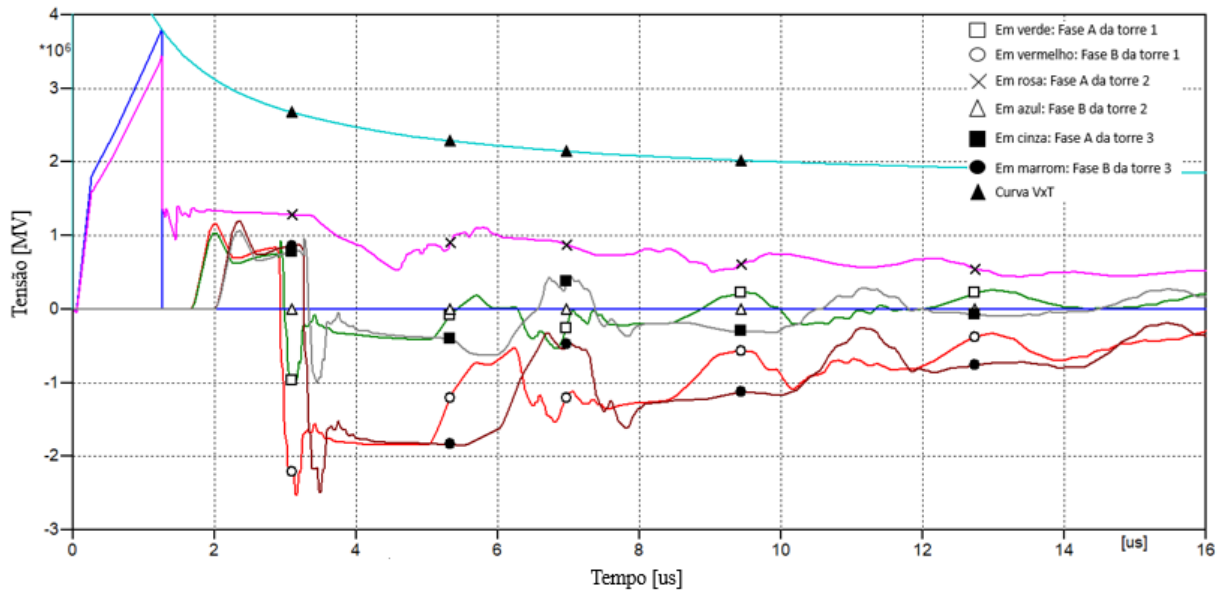
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 57 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 80% da velocidade da luz.



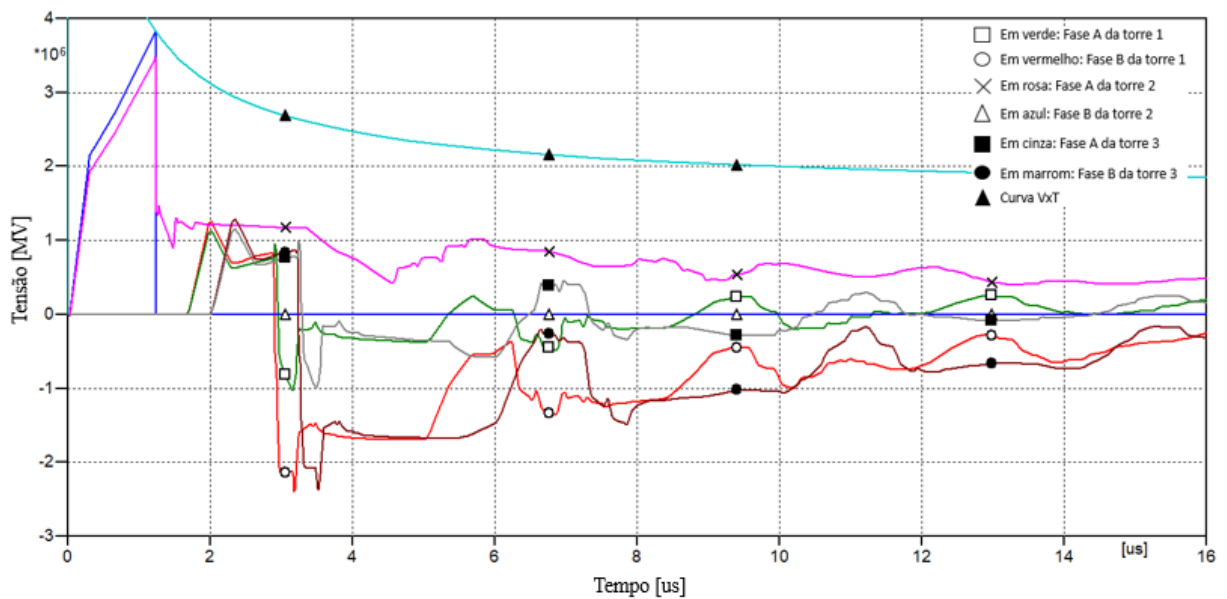
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 85% da velocidade da luz.



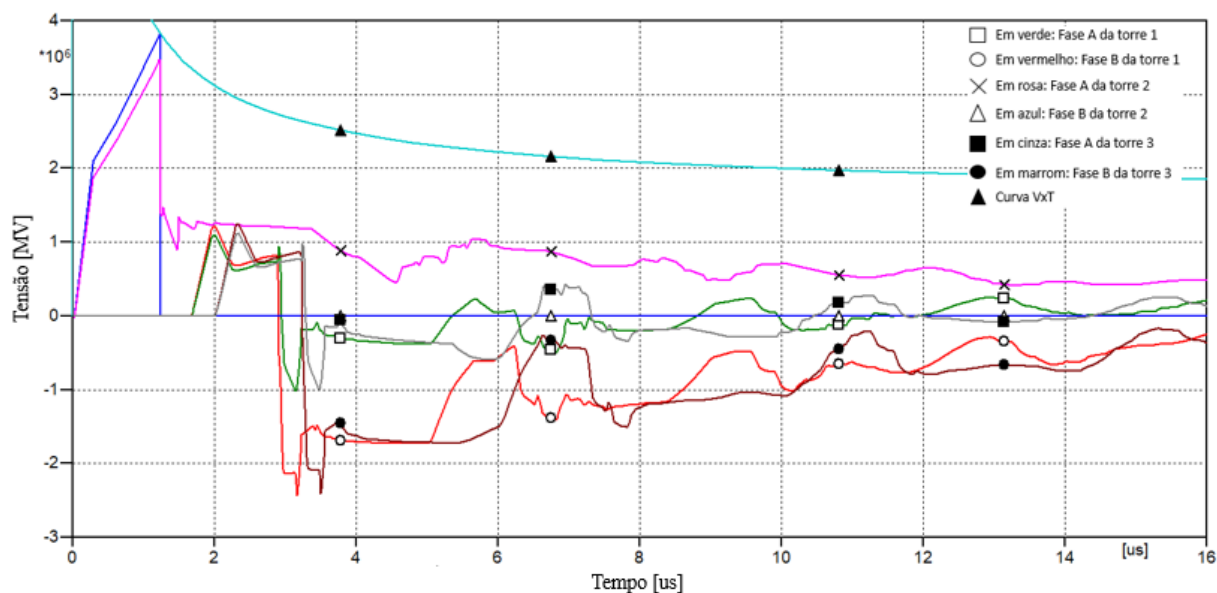
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 90% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Sobretensões observadas nas cadeias de isoladores posicionada na altura real do perfil da torre quando submetidas a descarga do tipo dupla rampa e velocidade de propagação em 95% da velocidade da luz.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 14 apresenta os parâmetros elétricos para geração das sobretensões de acordo com a variação da velocidade da propagação nas torres da descarga atmosférica com corrente do tipo dupla rampa.

Tabela 14 – Valores de sobretensão e corrente crítica de descarga para ocorrência de *backflashover* para isoladores instalados na altura real do perfil da torre (dupla rampa).

Velocidade de propagação	Corrente de descarga [kA]	Tensão disruptiva [MV]	Instante de tempo de ruptura [μ s]
70% da velocidade da luz	93,73	3,83	1,24
75% da velocidade da luz	87,12	3,83	1,23
80% da velocidade da luz	89,43	3,83	1,23
85% da velocidade da luz	91,58	3,83	1,23
90% da velocidade da luz	93,73	3,83	1,23
95% da velocidade da luz	95,93	3,83	1,23

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados evidenciam que o emprego da forma de onda do tipo dupla rampa em estudos de desempenho elétrico de LTs conduzem, consistentemente, a amplitudes da corrente crítica de descarga inferiores em comparação aqueles obtidos com a forma de onda dupla exponencial, independentemente das variações na velocidade de propagação da onda

eletromagnética na torre. Para este caso, as amplitudes das sobretensões disruptivas são superiores entre 28,3% até 29,4% em comparação aos resultados do caso anterior com emprego da corrente de descarga do tipo dupla exponencial.

Dessa forma, pode-se concluir que, ao analisar a suportabilidade elétrica dos arranjos isolantes em uma linha de transmissão submetida a sobretensões de descargas atmosféricas, o uso de uma corrente de descarga com forma de onda dupla rampa, conforme recomendado pelo IEEE, gera sobretensões disruptivas mais elevadas, mesmo com correntes críticas de descarga inferiores àquelas observadas com a forma de onda dupla exponencial.

Dado o comportamento em forma de rampa desta corrente, sua magnitude de sobretensão excede aquela gerada pela forma de onda dupla-exponencial. Em outras palavras, a dupla-exponencial atinge a curva de suportabilidade em instantes de tempos posteriores àqueles observados nos resultados com corrente de descarga do tipo dupla rampa, enquanto a segunda provoca uma disrupção com uma sobretensão maior, mesmo quando a corrente crítica é inferior. Portanto, para um valor de corrente equivalente, observa-se que a forma de onda dupla rampa resulta em uma sobretensão mais significativa, independentemente da altura onde os cabos para-raios foram dispostos e também da velocidade de propagação considerada.

Quanto à altura de fixação das cadeias de isoladores nas torres, a modelagem das cadeias com altura de instalação igual a $2/3$ da altura total, sempre resultada em valores de corrente crítica de descarga superiores àqueles observados quando as cadeias de isoladores estão à altura real, independentemente do tipo de forma de onda de corrente de descarga. Portanto, a estratégia de modelagem das cadeias de isoladores de linhas à altura de $2/3$ da altura total, conduz a obtenção de resultados de desempenho elétrico mais conservativos em comparação à modelagem com cadeias de isoladores à altura real identificada com base nas silhuetas de torres.

4.5. ESTUDO 05 – Aplicação e validação do Model ZTOWER

Neste estudo, os resultados contidos em três artigos científicos (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017) (MARTINEZ-VELASCO; CASTRO-ARANDA, 2005) (HARA; YAMAMOTO; HAYASHI, 1993) identificados na etapa de revisão bibliográfica foram utilizados para validação do modelo ZTOWER desenvolvido neste trabalho, gerando quatro estudos de caso para análise. Estas referências bibliográficas apresentam dados reais e experimentais de impedâncias de surto de torres de linhas de transmissão que serviram como parâmetros para comparar a eficácia dos métodos de cálculo e os resultados de processamento

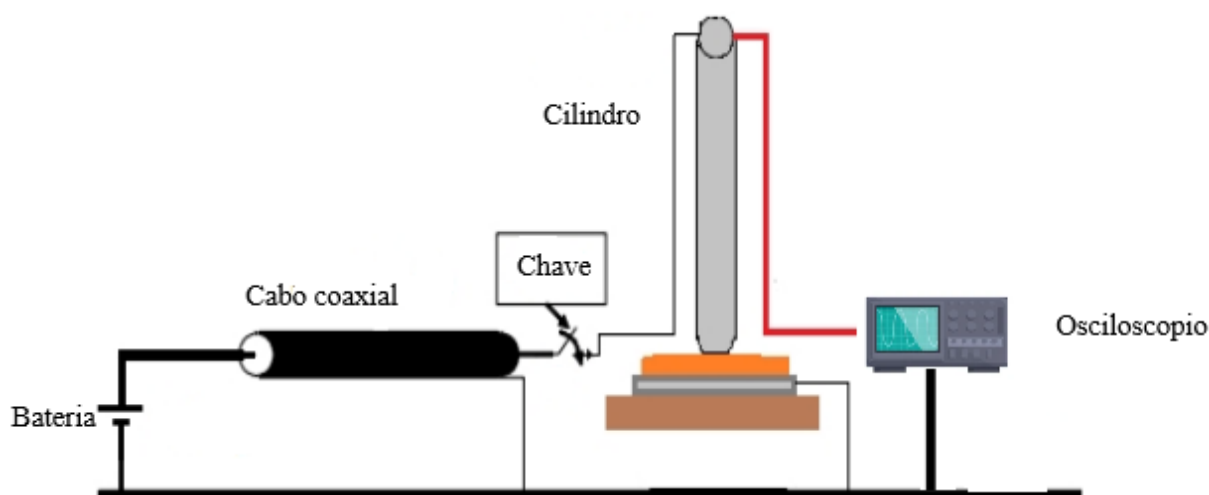
implementados no model ZTOWER. Importante aqui destacar que o uso da palavra *model* para descrever o modelo computacional ZTOWER se deve ao fato de que é comum na literatura científica descrever como um *model* cada modelo criado com o uso da linguagem *MODELS* do software *ATPDraw*.

4.5.1. CASO 5.1: Análise comparativa considerando valores de impedâncias de surto obtidas através de experimento com cilindro vertical de alumínio, baseadas nos resultados de Araújo, Piantini e Kurokawa (2017)

Nesse caso, o experimento realizado por Araújo, Piantini e Kurokawa (2017) consistiu na aplicação de uma tensão na parte superior de um cilindro vertical de alumínio, para medição do pulso refletido e posterior determinação da impedância de surto da torre. A altura h e o raio r do cilindro experimental foram de 1,52 m e 8 mm, respectivamente. A impedância de surto obtida através do experimento foi $Z_{cil} = 320 \Omega$.

A Figura 61 apresenta a configuração implementada para realização do experimento descrito em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017).

Figura 61 – Esquema utilizado para realização do experimento utilizado na análise do caso 5.1.



Fonte: Adaptado de (ARAÚJO; PIANTINI; KUOKAWA, 2017).

Os parâmetros de entrada do *model* ZTOWER estão expressos na Tabela 15. A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos pelo *model* a partir dos parâmetros de entrada.

Tabela 15 – Parâmetros utilizados para o estudo computacional do caso 5.1.

Parâmetros	Valores dos Parâmetros
R [m]	0,008
RSCONE [m]	0,008
R1 [m]	0,008
R2 [m]	0,008
R3 [m]	0,008
RAMETA [m]	0,008
H [m]	1,52
H1 [m]	0,68
H2 [m]	0,84

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 16 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.1.

Variável de saída	Impedância de surto (Z_T [Ω])	Erro relativo [%] (ref. a $Z_{cil} = 320 \Omega$)	Erro relativo [%] ref. ao resultados de Araújo, Piantini e Kurokawa (2017)
ZJORDA	254,82	20,36	0,71
ZCIGRP	356,41	11,37	0,39
ZCIGRÈ	315,62	1,36	-
ZCIGRC	314,82	1,61	-
ZHILEM	377,2	17,87	0,32
ZHILHA	377,71	18,03	-
ZSARGE	317,20	0,87	0,37
ZSARHA	317,71	0,71	-
ZHARAP	257,2	19,62	0,46
ZCHISH	296,41	7,37	0,47
ZAMETP	255,29	20,22	-
ZAMETA	315,29	1,47	-
ZAMET1	254,82	20,36	-
ZAMET2	255,33	20,20	-
ZSCONE	335,62	4,88	-
ZSARDA	318,34	0,51	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise dos resultados para este modelo elementar de torre com formato geometricamente cilíndrico evidencia que diversos modelos são apropriados para cálculo da impedância de surto desta silhueta de torre com este formato e dimensões. A quarta coluna da Tabela 16 demonstra que os resultados de processamento do *model ZTOWER* estão validados quando comparados com os resultados obtidos por Araújo, Piantini e Kurokawa (2017). Os modelos baseados nos estudos de Sargent e Darveniza (1969) (ZSARGE, ZSARHA, ZSARDA) apresentaram resultados muito próximos ao valor experimental da impedância de surto para este cilindro sob análise neste caso. O modelo ZSARDA recomendado para modelos de torres com geometria mais complexa, formada por composição de sólidos para um cone inferior e um cilindro superior, apresentou resultado muito próximo àqueles obtidos com uso das expressões simplificadas com uso direto do raio da base da torre (ZSARGE) e com o uso do raio equivalente proposto por Hara e Yamamoto (1996) (ZSARHA), embora estes dois últimos tenham sido desenvolvidos tomando por base modelos de torres com geometria cilíndrica. Portanto, para torres com geometrias elementares, muito similares a forma de um cone ou cilindro, as expressões mais elementares com uso direto do raio da base da torre apresentam boa concordância com o valor da impedância de surto experimental, não havendo necessidade de uso de modelos mais elaborados e refinados com base em fundamentos avançados de eletromagnetismo. Os modelos de Ametani *et al.* (1994) (ZAMETA) e CIGRÈ (ZCIGRÈ e ZCIGRC) também apresentaram boa concordância com o valor real da impedância de surto. Importante ressaltar que o uso da expressão para o modelo matemático de Ametani (ZAMETP) contido no trabalho de Araújo, Piantini e Kurokawa (2017) apresentou resultado muito distinto do valor da impedância de surto experimental, enquanto o uso da expressão proposta por Ametani *et al.* (1994) (ZAMETA) mostrou-se apropriada para o cálculo da impedância de surto real do cilindro sob análise. As expressões matemáticas são ligeiramente diferentes embora suas diferenças sejam determinantes para obtenção de precisão no resultado obtido no cálculo da impedância de surto. As tradicionais expressões propostas pelo CIGRÈ (1991) (ZCIGRP) e por Jordan (1934) (ZJORDA) não retornaram resultados precisos, mesmo sendo baseadas em torres com formas geométricas elementares. Outra observação é que a expressão do modelo CIGRÈ para torres com formato cônico (ZCIGRP) apresentou valor discrepante das outras duas expressões para modelo CIGRÈ (ZCIGRC e ZCIGRÈ) que por sua vez são apropriadas para torres com formato cilíndrico e combinação de sólidos geométricos.

As análises supracitadas reforçam a importância em utilizar um modelo computacional que permita ao usuário realizar cálculos utilizando as diversas expressões existentes para o cálculo da impedância de surto, de forma a avaliar as adequações e as

restrições de forma particular para cada modelo, buscando assim a obtenção de resultados mais precisos e confiáveis em estudos envolvendo transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão. Nesse sentido o *model* ZTOWER desenvolvido neste trabalho supre esta lacuna configurando-se em uma importante ferramenta também para o estudo de desempenho elétrico de linhas perante sobretensões atmosféricas contribuindo para obtenção de resultados mais reais e confiáveis, a partir da determinação mais precisa de modelos matemáticos apropriados para representar cada tipo de silhueta de torre.

4.5.2. CASO 5.2: Análise comparativa com impedâncias de surto obtida através de experimento utilizando uma torre em escala reduzida realizados por Araújo, Piantini e Kurokawa (2017)

Para este caso, (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017) utilizaram a mesma metodologia aplicada para o caso 5.1, com um cilindro vertical apresentado na Figura 61, porém considerando agora uma minitorre com geometria idêntica à de torres reais, mas montada em escala reduzida conforme apresentado na Figura 62. As medidas da torre são: Altura $h = 1,36$ m, distância entre os braços = 0,90 m e distância entre as pernas = 0,50 m. A impedância de surto calculada no experimento de Araújo, Piantini e Kurokawa (2017) para a torre foi $Z_{Torre} = 75 \Omega$.

Figura 62 – Torre em escala reduzida utilizada em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017).



Fonte: Adaptado de (ARAÚJO; PIANTINI; KUROKAWA, 2017).

A análise dos resultados do autor permite concluir que para os métodos de determinação da impedância de torre ZJORDA, ZCIGRP, ZCIGRE, ZHILEM, ZSARGE, ZHARAP e ZCHISH, baseados em geometria cilíndrica de torres, foi utilizado $r = 0,25$ m e $h = 1,36$ m. Para o modelo ZSCONE foi utilizado $r = 0,35$ m e $h = 1,36$ m. Para o modelo de combinação de sólidos (ZCIGRÈ) foram utilizados os seguintes dados: $r_1 = 0,48$ m, $r_2 = 0,28$ m; $r_3 = 0,45$ m; $h_1 = 0,61$ m; $h_2 = 0,75$ m. Os parâmetros de entrada para uso *model* ZTOWER neste caso estão expressos na Tabela 17.

Tabela 17 – Parâmetros utilizados para o estudo computacional do caso 5.2.

Parâmetros	Valores dos Parâmetros
R [m]	0,25
RSCONE [m]	0,35
R1 [m]	0,48
R2 [m]	0,28
R3 [m]	0,45
RAMETA [m]	0,25
H [m]	1,36
H1 [m]	0,61
H2 [m]	0,75

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos após processamento com o *model* são apresentados na Tabela 18. De forma similar ao caso 5.1, observa-se um baixo erro relativo entre os valores de impedância de surto calculados pelo *model* ZTOWER em relação aos obtidos por Araújo, Piantini e Kurokawa (2017).

Tabela 18 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.2.

Variável de saída	Impedância de surto ($Z_T[\Omega]$)	Erro relativo [%] (ref. a $Z_{torre} = 75 \Omega$)	Erro relativo [%] ref. ao resultados de Araújo, Piantini e Kurokawa (2017))
ZJORDA	41,63	44,49	14,05
ZCIGRP	143,72	91,63	3,58
ZCIGRÈ	81,66	8,88	0,81
ZCIGRC	66,36	11,52	-
ZHILEM	164,01	118,68	3,15
ZHILHA	127,45	69,93	-
ZSARGE	104,01	38,68	5,05
ZSARHA	67,45	10,07	-
ZHARAP	44,01	41,32	12,82
ZCHISH	83,72	11,63	6,29
ZAMETP	33,31	55,59	-
ZAMETA	94,12	25,49	-
ZAMET1	41,63	44,49	-
ZAMET2	5,07	93,24	-
ZSCONE	104,16	38,88	1,12
ZSARDA	79,59	6,12	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

O modelo CIGRÈ quando utilizado de forma simplória ($ZCIGRP = 143,72 \Omega$) como realizado em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017), considerando apenas o raio da base da torre, pode levar a valores de impedância de surto muito superiores ao valor de impedância de surto experimental (75Ω). Neste sentido, as expressões para modelo de impedância de surto com a expressão CIGRÈ ($ZCIGRÈ=81,66 \Omega$) e ($ZCIGRC = 66,36 \Omega$) resultam em valores muito mais próximos da impedância de surto experimental. Importante ressaltar que ao passo que o modelo ZCIGRÈ foi desenvolvido com base em torres com formato composto por combinação de sólidos geométricos, a expressão de ZCIGRC é mais adequada para torres com geometria cilíndrica, segundo Ametani *et al.* (1994). Já a expressão de ZCIGRP é baseada em torres com geometria cônica. Segundo Ametani *et al.* (1994) esta expressão apresenta erros mais grosseiros à medida que a geometria da torre se aproxima de um formato cilíndrico.

O modelo baseado em combinação de sólidos para representar a torre (ZCIGRÈ) juntamente com o modelo de Sargent e Darveniza (1969) (ZSARDA), apresentam um resultado preciso para cálculo do valor da impedância de surto deste modelo de torre sob investigação, com erros relativos à impedância de surto da torre inferiores a 10%. Assim, observa-se que os modelos direcionados a obtenção da impedância de surto através de combinação de sólidos geométricos representaram com precisão a impedância de surto da torre analisada. Esta constatação pode estar associada ao fato de que a torre sob investigação consiste em um modelo em escala reduzida de uma torre real. Importante ressaltar que o modelo de combinação de sólidos de Sargent e Darveniza (ZSARDA) utilizado em Stracqualursi *et al.* (2022) não exibiu boa concordância com a expressão para modelo de Sargent e Darveniza (ZSCONE) disponível em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017). Já o modelo de Sargent e Darveniza (para torres com formato cilíndrico) (ZSARHA) utilizando o raio equivalente proposto por Hara e Yamamoto (1993) apresentou maior precisão no valor da impedância de surto calculada quando comparado com a expressão utilizada em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017) para este mesmo modelo (ZSARGE), que utiliza diretamente o raio da base da torre.

É importante observar que os tradicionais modelos de Jordan (ZJORDA) e Hileman (ZHILEM) apresentaram resultados muito discrepantes do valor da impedância de surto obtido experimentalmente, evidenciando o quão inapropriado é utilizar apenas um modelo matemático para conduzir estudos em linhas de transmissão, ainda que se trate de modelos largamente empregados nas publicações científicas. É fundamental conhecer e avaliar os diversos métodos matemáticos a partir de resultados como os fornecidos pelo *model* ZTOWER para posterior definição dos modelos de impedância de surto de torres mais apropriado à silhueta e dimensões da torre sob investigação.

4.5.3. CASO 5.3: Análise comparativa com impedâncias de surto de torre real 400Kv com base nos resultados obtidos por Martinez-Velasco e Castro-Aranda (2005)

Neste caso, para a aplicação em sua análise de desempenho de LTs, o autor (MARTINEZ-VELASCO; CASTRO-ARANDA, 2005) cita referências e estima um valor de impedância de surto (Z_{torre}) igual a 100,4 Ω para uma torre com tensão de operação de 400 kV. A Figura 63 apresenta a silhueta e dimensões da torre utilizada no estudo deste artigo.

A Tabela 20 apresenta os valores obtidos para os parâmetros acima.

Tabela 20 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.3.

Variável de saída	Impedância de surto (Z_T [Ω])	Erro relativo[%] (ref. a $Z_{torre} = 100,4\Omega$)
ZJORDA	69,97	30,31
ZCIGRP	171,75	71,07
ZCIGRÈ	134,06	32,53
ZCIGRC	129,97	29,45
ZHILEM	192,35	91,58
ZHILHA	185,68	84,94
ZSARGE	132,35	31,82
ZSARHA	125,68	25,18
ZHARAP	72,35	27,94
ZCHISH	111,75	11,30
ZAMETP	79,94	20,38
ZAMETA	115,67	39,48
ZAMET1	69,97	30,31
ZAMET2	63,30	36,95
ZSCONE	115,67	15,21
ZSARDA	130,29	29,77

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como as expressões para ZCIGRÈ foram baseadas em geometrias de torres cônicas (ZCIGRP) e torres cilíndricas (ZCIGRC), os resultados obtidos com estas expressões não apresentaram boa concordância com o resultado de impedância de surto da torre obtido experimentalmente ($100,4 \Omega$), vide o percentual de desvio quando comparado o valor calculado pelo *model* em relação a impedância fornecida pelo autor, sendo 71,07% para (ZCIGRP) e 29,45% para (ZCIGRC). Já a expressão de Sargent e Darveniza (1969) (ZSARGE) calculada empregando o raio da base da torre apresentou valor superior em 5,31% ao valor de impedância obtido com a mesma expressão utilizando o raio equivalente de Hara e Yamamoto (1993) (ZSARHA). Entretanto o uso da expressão ZSARHA resultou em valores superiores em 25,18% ao valor de impedância de surto obtido experimentalmente.

Os resultados obtidos com uso das expressões propostas por Ametani *et al.* (1994) mostraram que a expressão utilizada em Araújo, Piantini e Kurokawa (2017) ($Z_{AMETP}=79,94 \Omega$) mostrou melhor concordância com o valor de impedância de surto experimental ($100,4 \Omega$). Ressalta-se que esta expressão de Ametani *et al.* (1994) foi desenvolvida com base em torres com geometria cônica. A simplificação da expressão para condutor simples proposta em Ametani *et al.* (1994) ($Z_{AMETA}=140,04 \Omega$) apresentou valor superior à simplificação proposta ($Z_{AMET1}=69,97 \Omega$) evidenciando que para este caso não houve boa precisão na simplificação da expressão geral proposta por Ametani *et al.* (1994). Portanto, esta simplificação deve ser utilizada com cuidado por não ser de aplicação geral, ou seja, independentemente da geometria da torre analisada.

As expressões baseadas em combinações de sólidos, a saber, as variáveis ZSCONE e ZSARDA, apresentaram resultados concordantes com a expressão de impedância do CIGRÈ.

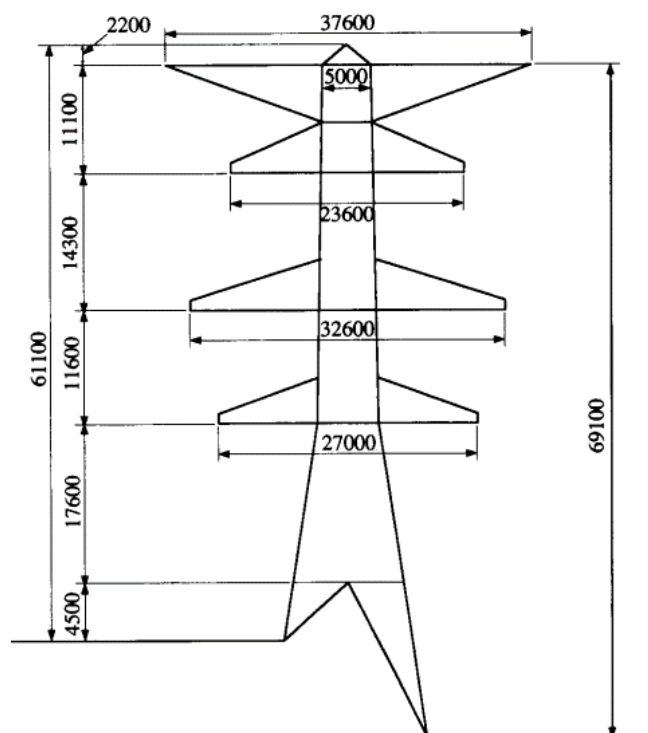
A partir da análise dos resultados da Tabela 20, infere-se que o modelo ZCHISHOLM apresentou valores de impedância de surto da torre mais próximo do valor de referência informado em Martinez-Velasco e Castro-Aranda (2005). Uma vez que os valores são muito discrepantes, fica evidente que para utilizar os vários modelos matemáticos voltados a determinação da impedância de surto das torres é fundamental que o usuário tenha conhecimento da aplicação e da limitação de cada modelo calculado pelo *model ZTOWER*.

Portanto, o *model* não constitui uma ferramenta que seleciona o modelo matemático mais adequado para calcular a impedância da torre uma vez que esta seleção é tarefa do usuário e do projetista. Entretanto, o *model ZTOWER* consiste em uma ferramenta de estudo que realiza o cálculo da impedância da torre considerando os principais modelos matemáticos existentes, permitindo ao usuário fazer uma análise comparativa de qual(is) modelo(s) são mais adequados para representação do valor real da impedância de surto da torre, descartando modelos matemáticos que não se aplicam ao estudo de desempenho elétrico da LT sob investigação. Desta forma, o *model* criado permite o refinamento do estudo computacional e contribui para obtenção de resultados mais precisos e em concordância com os parâmetros reais das torres de sistemas de transmissão sob investigação.

4.5.4. CASO 5.4: Análise comparativa com impedâncias de surto de torre real 500 kV determinadas por Hara, Yamamoto e Hayashi (1993)

Nesta análise, realizou-se uma comparação entre as impedâncias de surto obtidas pelo ZTOWER para uma torre real com tensão de operação de 500 kV cuja impedância experimental determinada em Hara, Yamamoto e Hayashi (1993) foi de $Z_{Torre} = 111\Omega$. A Figura 64 apresenta a torre utilizada para as neste estudo, cujas dimensões são apresentadas em milímetros.

Figura 64 – Configuração e dimensões da torre 500 kV utilizada em Hara, Yamamoto e Hayashi (1993).



Fonte: Extraído de (HARA; YAMAMOTO; HAYASHI, 1993).

Considerando as medidas disponibilizadas na Figura 64, os parâmetros geométricos foram adicionados ao *model*, de acordo com os valores da Tabela 21. A Tabela 22 apresenta os valores obtidos pelo *model* para tais parâmetros.

Tabela 21 - Parâmetros geométricos adicionados ao ZTOWER para estudo computacional do caso 5.4.

Parâmetros	Valores dos Parâmetros
R [m]	5
RSCONE [m]	5
R1 [m]	12,5
R2 [m]	5
R3 [m]	5
RAMETA [m]	5
H [m]	59
H1 [m]	37
H2 [m]	22

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Valores da impedância de surto obtidos pelo model ZTOWER para o caso 5.4.

Variável de saída	Impedância de surto (Z_T [Ω])	Erro relativo[%] (ref. a $Z_{torre} = 111\Omega$)
ZJORDA	88,09	20,63
ZCIGRP	189,78	70,97
ZCIGRÈ	133,98	20,70
ZCIGRC	148,09	33,41
ZHILEM	210,47	89,61
ZHILHA	192,14	73,09
ZSARGE	150,47	35,56
ZSARHA	132,14	19,05
ZHARAP	90,46	18,49
ZCHISH	129,78	16,92
ZAMETP	95,52	13,94
ZAMETA	155,58	40,16
ZAMET1	88,09	20,63
ZAMET2	69,79	37,12
ZSCONE	169,10	52,34
ZSARDA	118,84	7,06

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este quarto modelo de torre analisado, o modelo ZSARDA apresentou um erro relativo de apenas 7,06%, sendo o resultado mais próximo daquele obtido experimentalmente. Os modelos para cálculo de impedância de surto ZAMETP e ZCHISHOLM apresentaram erros relativos de 13,94% e de 16,92% em relação a impedância de surto experimental de 111 Ω . Particularmente, o modelo de SARGENT (ZSARHA) que utiliza considera o raio calculado segundo Hara e Yamamoto (1993), apresentou concordância com o valor experimental de impedância de surto da torre muito superior (erro relativo de 19,05%) ao valor obtido com o mesmo modelo de SARGENT utilizando simplesmente o raio da base da torre (ZSARGE – erro de 35,56%). Portanto, a utilização do raio equivalente proposto em Hara, Yamamoto e Hayashi (1993) para este modelo de torre é muito mais apropriada para maior concordância com o valor experimental.

De forma geral, as expressões de ZHARAP, ZJORDA e ZAMETP apresentam resultados para impedância de surto muito similares, proveniente de suas expressões matemáticas de cálculo aproximadamente equivalentes. Ametani *et al.* (1994) registrou a equivalência entre os modelos ZJORDAN e ZAMETP, afirmativa reforçada pelos resultados obtidos neste caso, com inclusão do modelo ZHARAP. Entretanto, estes três modelos apresentaram resultados muito discrepantes do valor da impedância de surto experimental para a torre alvo da investigação neste caso.

4.5.5. CONCLUSÕES GERAIS - ESTUDO 05

Após análise dos resultados obtidos nos quatro casos estudados neste trabalho, fica evidente a importância do desenvolvimento e da utilização do *model ZTOWER* para melhor definição e análise da impedância de surto de torres de linhas de transmissão em estudos de transitórios eletromagnéticos, principalmente desempenho elétrico e coordenação de isolamento. A grande quantidade de modelos matemáticos disponíveis requer que o usuário utilize como critério de seleção do modelo mais apropriado para o seu modelo de torre em estudo, as limitações matemáticas e eletromagnéticas de cada modelo, além de observar a geometria de torre utilizada para o desenvolvimento de cada modelo. É igualmente importante a correta identificação da geometria da torre a ser modelada com a geometria considerada para o desenvolvimento do modelo. O *model ZTOWER* permite ainda a comparação entre modelos baseados nas mesmas formas geométricas (cônica, cilíndrica ou combinação de sólidos) como orientação para obtenção do valor provável da impedância de surto por análises estatísticas utilizando desvios e variâncias em busca do valor provável da impedância da torre.

Da mesma forma, o usuário pode evitar o uso de determinados modelos que não são adequados para a geometria da torre sob análise evitando erros.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a realização de análises computacionais acerca da influência da velocidade de propagação da descarga atmosférica e do posicionamento dos arranjos isolantes em torres mediante ocorrência de *backflashover* e também o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a determinação da impedância de surto pelos principais métodos utilizados para determinação dessa grandeza.

Devido a diversidade de modelos de torres de linha de transmissão e os diferentes tipos de descargas atmosféricas que as linhas de transmissão estão suscetíveis, é evidente a necessidade de desenvolvimento de estudos investigativos acerca da influência desses parâmetros e também modelos computacionais que possam servir de auxílio para a realização de um bom projeto de coordenação de isolamento, haja vista a grande dependência do mundo moderno em relação aos sistemas elétricos, onde é imprescindível a garantia de um sistema eficiente e confiável, apresentando o menor número possível de desligamentos.

Nesse trabalho, foi observado que o emprego de diferentes posicionamentos da cadeia de isoladores pode efetivamente influenciar na suportabilidade da linha de transmissão, evidenciando que sua consideração e determinação precisa no projeto de torres de linhas de transmissão trata-se de um fator importante e que não pode ser menosprezado. A velocidade de propagação da onda de descarga atmosférica também destacou-se como um parâmetro crítico nos estudos de suportabilidade de arranjos isolantes em torres de linhas de transmissão. As análises realizadas nesse trabalho evidenciaram que os diferentes valores percentuais da velocidade da luz utilizados como velocidade da descarga atmosférica não apenas alteraram os valores de corrente crítica de descarga necessários para a ocorrência de *backflashover*, mas também influenciaram no local de ocorrência da disrupção, destacando a importância desse parâmetro na avaliação do desempenho dos arranjos isolantes e no dimensionamento da capacidade de suportabilidade do sistema frente a descargas atmosféricas.

Já o modelo criado para a determinação da impedância de surto constitui uma contribuição relevante e que representa um aprimoramento na metodologia de realização de estudos computacionais para o desempenho eletromagnético das linhas de transmissão. A partir dos resultados fornecidos pelo *model*, observa-se que o método ZCHISH, desenvolvido por Chisholm, Chow e Srivastava (1983) para torres cilíndricas, foi aquele que apresentou as melhores aproximações de valores de impedância das obtidas experimentalmente em todas as análises. O modelo baseado em geometrias cônicas ZSARDA também se mostrou eficiente, com exceção do terceiro caso, ao qual a geometria da torre foi melhor determinada pelo método ZSCONE

que também é oriundo de aproximação geométrica cônica, porém utiliza a determinação do raio de forma distinta ao ZSARDA. Já os métodos ZCIGREP, ZHILEM e ZHILHA não apresentaram boas aproximações, com erros relativos muito elevados em todos os casos analisados. Em suma, o *model* ZTOWER exige que o usuário tenha conhecimento tanto do aspecto geométrico da torre analisada, para inserir corretamente os parâmetros de entrada no *model*, quanto dos métodos de cálculo da impedância de surto. Dessa forma, sua utilização torna-se eficaz, permitindo uma determinação mais precisa da impedância de surto em torres de linhas de transmissão e, conseqüentemente, contribuindo para a redução do número de desligamentos por *backflashover*.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para continuidade dos trabalhos é proposta a realização de estudos envolvendo geometrias similares de torres de forma a identificar os modelos para determinação da impedância de surto de torre que são mais apropriados, de forma a obter uma classificação de modelos por tipos de silhuetas. Este estudo tem potencial para contribuir muito com a consolidação de modelos matemáticos para cada silhueta de torre, contribuindo ainda para evitar a divulgação e uso de resultados equivocados por desconhecimento dos princípios eletromagnéticos e geométricos de cada modelo analisado neste trabalho. É esperado que o *model* ZTOWER desenvolvido possa contribuir sobremaneira para a obtenção de resultados de estudos de desempenho elétrico de linhas de transmissão em concordâncias com os fenômenos eletromagnéticos reais associados.

7. REFERÊNCIAS

AMETANI, Akihiro *et al.* **Frequency-dependent impedance of vertical conductors and a multiconductor tower model.** IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, v. 141, n. 4, p. 339-345, 1994. DOI: 10.1049/ip-gtd:19949988

ARAÚJO, A. R. J.; PIANTINI, A.; KUROKAWA, S. **Performance of transmission line tower models used for electromagnetic transient studies: Comparisons with experimental results.** International Conference on Power Systems Transients (IPST), [s. l.], 2017. Disponível em: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2017/17IPST172.pdf. Acesso em: 4 jul. 2023.

ARAÚJO, Anderson Ricardo Justo de. **Uma proposta de representação de torres de linhas de transmissão diretamente no domínio do tempo.** 2018. 246 f. Tese (Doutorado) Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2018

ASSIS, Sandro C.; BOAVENTURA, Wallace C. **Desenvolvimento de um Modelo de Cálculo de Tensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas em Condutores Multiaterrados e Incorporação.** 2005.

CASTRO, W. S. **Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão.** 2016. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/1335M.PDF>. Acesso em: 23 jan. 2024.

CHISHOLM, W., CHOW, Y., & SRIVASTAVA, K. **Lightning Surge Response Of Transmission Towers.** IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-102, no. 9, pp. 3232–3242, Set. 1983.

CHISHOLM, W., CHOW, Y., & SRIVASTAVA, K. **Travel Time of Transmission Towers.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-104(10), 2922–2928 (1985). DOI:10.1109/tpas.1985.319139

CHOY, L. A.; DARVENIZA, M. **A sensitivity analysis of lightning performance calculations for transmission lines.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, n. 4, pp. 1443-1451, 1971.

CIGRÈ - INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS. STUDY COMMITTEE 33 (OVERVOLTAGES AND INSULATION 95 COORDINATION). WORKING GROUP 01. **Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines.** Paris: CIGRÉ, Brochure n° 63, 1991.

COSTA, Eduardo C. Marques *et al.* **Evaluation of analytic formulations for surge impedance calculation of tall transmission towers.** International Journal of Electrical Power & Energy Systems, [s. l.], v. 114, 2020. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105407. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061518335816>. Acesso em: 11 jun. 2024.

CUNHA, L. V. **Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Influência do Efeito Corona na Ruptura a Meio de Vão.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Julho 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8MCHLM>

DA SILVA, Gabriel Carlos Pena *et al.* **Impedância de Surto de Sistemas Elétricos Constituídos por Múltiplos Condutores Verticais.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 2, n. 1, 2022.

DE CONTI, Alberto *et al.* **Revision, extension, and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors.** IEEE transactions on electromagnetic compatibility, v. 48, n. 3, p. 530-536, ago.2006. Disponível em: <https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/281477>

ELAT. **Tipos de relâmpagos.** 2019. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>. Acesso em: 02 fev. 2023.

HARA, Takehisa; YAMAMOTO, Osamu; HAYASHI, Muneaki. **Modeling of a 500kV transmission tower for lightning surge analysis**. Memoirs of the Faculty of Engineering Kyoto University, v. 55, n. 3, p. 103-115, 1993.

HARA, T.; YAMAMOTO, O. **Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis**. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, v. 143, n. 3, p. 283–289, 1996.

HILEMAN, A. R. **Insulation Coordination for Power Systems**. New York: Basel, 1999. pp. 767 ISBN:0-8247-9957-7. DOI: 10.1201/9781420052015

IEEE - THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS Working Group on Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. **Estimating lightning performance of transmission lines II - updates to analytical models**, IEEE Transactions on Power Delivery. v. 8, n. 3, pp. 1254–1267. July 1993. DOI: 10.1109/61.252651

IEEE - THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, **Guide for improving the lightning performance of transmission lines**. IEEE Std. 1243-1997, New York, DOI: 10.1109/IEEESTD.1997.84660.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC. **CEI/IEC 60071-1:2006 International Standard. Insulation Co-ordination**. Genebra, Suíça. 2006. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/579>

JORDAN, C. A. **Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires Part II**. GE Rev., v. 37, p. 180, 1934.

KAWAI, M. **Studies of the Surge Response on a Transmission Tower**. IEEE PAS-83, n. 1, p. 30-34, 1964.

LAFORST, J. J. **Transmission-line reference book**. 345 kV and above. General Electric Co., Pittsfield, MA (USA). Large Transformer Div.; General Electric Co., Schenectady, NY (USA). Electric Utility Systems Engineering Dept., 1981.

LIMA, V. R. A. R. **Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: desenvolvimento de ferramenta computacional e análise de medidas mitigatórias não convencionais em regiões com restrições ambientais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Novembro 2020. Disponível em: https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/public/consultas/coleta/trabalhoConclusao/viewTrabalhoConclusao.jsf?popup=true&id_trabalho=9726564

LUEJAI, Waraporn; SUWANASRI, Thanapong; SUWANASRI, Cattareeya. **D-distance Risk Factor for Transmission Line Maintenance Management and Cost Analysis.** Sustainability, v. 13, n. 15, p. 8208, 2021.

MAMEDE FILHO, Joao; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de sistemas elétricos de potência.** Rio de Janeiro: LTC, 2016. 605p.

MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Computer Analysis of Electrical Power System Transients: Selected Readings.** Piscataway: IEEE Press, 1997.

MARTINEZ-VELASCO, Juan A.; CASTRO-ARANDA, Ferley. **Modeling of Overhead Transmission Lines for Lightning Studies.** IEEE, [s. l.], 2005. Disponível em: https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2005/05IPST047.pdf. Acesso em: 8 mar. 2024.

MIRANDA, Audine Sena. **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.** 2019. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, [S. l.], 2019. Disponível em: https://sigarquivos.cefetmg.br/arquivos/201900724746e522795180ff17b40b08c/Dissertacao_Audine_14_05_2019.pdf. Acesso em: 28 dez. 2023.

MOTA, Paulo César Álvares. **Determinação e modelagem da impedância de surto de torres de linhas de transmissão e seus efeitos no estudo de sobretensões atmosférica.** Tese

(doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017a. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20792>

MOTA, Paulo César Álvares. **Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

MOTA, Paulo César Álvares; CAMACHO, José Roberto; CHAVES, Marcelo Lynce Ribeiro. **Analysis of tower surge impedance using the finite element method.** Electric Power Systems Research, v. 152, p. 184-193, 2017b.

MOTOYAMA, H.; KINOSHITA, Y.; NONAKA, K. **Experimental Study on Lightning Surge Response of 500-kV Transmission Tower With Overhead Lines.** IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, p. 2488-2495, out. 2008.

NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 5422 – **Projeto de linhas aéreas de energia elétrica – Critérios técnicos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

HARID, N., GRIFFITHS, H., HADDAD, A. **A New Frequency-Dependent Surge Impedance Calculation Method for High-Voltage Towers.** IEEE Transactions on Power Delivery. 2006, Vol. 21.

ROCHA, L. C. **Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UHT frente a descargas atmosféricas: Influência da ruptura a meio de vão.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. UFMG-Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/331M.PDF>

RODRIGUES, André Roger. **Influência da corrente de descarga atmosférica e dos modelos para caracterização da suportabilidade de isoladores no fenômeno de backflashover.** 2017. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ROMERO, F.; PIANTINI, A.; COORAY, V. **On the influence of stroke current propagation velocity on lightning horizontal electric fields.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 56, n. 4, p. 940–948, 2014.

SARGENT, Michael A.; DARVENIZA, Mat. **Tower surge impedance**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, n. 5, p. 680-687, 1969.

SHORT, Tom. **Application of the IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines (Std. 1410-1997)**. IEEE T&D Conference: [s. n.], 1999. Disponível em: <https://ewh.ieee.org/soc/pes/lpdl/archive/short.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2024.

SILVEIRA, F. H.; DE CONTI, A.; VISACRO, S. **Lightning overvoltage due to first strokes considering a realistic current representation**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compability, v. 52, n. 4, Nov. 2010. pp. 929 - 935. DOI: 10.1109/TEMC.2010.2044042

STRACQUALURSI, Erika *et al.* **Tower Models for Power Systems Transients: A Review**. Energies, [s. l.], 4 jul. 2022. DOI:10.3390/en15134893. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4893>. Acesso em: 15 jun. 2024.

TAKAHASHI, H. **Configuration of the Error of Jordan's Formula on Tower Surge Impedance**. IEE Japan Transactions, v. 114-B, p. 112-113, 1994.

VISACRO FILHO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.

WAGNER, C. F.; HILEMAN, A. R. **A new approach to calculation of lightning performance of transmission lines-II**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, v. 78, n. 4, p. 996-1020, 1959.

YAMADA T., *et al.* **Experimental evaluation of UHV tower model for lightning surge analysis**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 10, n. 1, pp. 392–402, Jan.1995. DOI: 10.1109/61.368374

ZHANG, Zhijing; SIMA, Wenxia; ZHANG, Yongji; SHU, Lichun. **The simulation model for calculating the surge impedance of a tower**. Conf. Rec. 2004 IEEE Int. Symp. Electr. Insul., IEEE, p. 331–334, 2004. DOI: 10.1109/ELINSL.2004.1380581.

APÊNDICE A – Algoritmos desenvolvidos no ATP/ATPDraw

Os algoritmos desenvolvidos computacionalmente nesta monografia com o software ATP/ATPDraw estão disponíveis em uma pasta compartilhada, acessível pelo hiperlink abaixo:

https://drive.google.com/drive/folders/1R62BmePInECil4Qg6cbChCtqk79mi0dS?usp=drive_link