

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDO ANUNCIÇÃO BUDZINSKI

RODRIGO WERNECK CORRÊA

**ESTUDO DA SOBRETENSÃO CAUSADA POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE 69 kV**

CURITIBA

2021

FERNANDO ANUNCIÇÃO BUDZINSKI
RODRIGO WERNECK CORRÊA

**ESTUDO DA SOBRETENSÃO CAUSADA POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE 69 kV**

**Study on lightning overvoltages caused by lightning
for a 69 kV overhead line**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto.

Coorientador: Me. Muryllo Amalio de Souza.

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FERNANDO ANUNCIÇÃO BUDZINSKI
RODRIGO WERNECK CORRÊA

**ESTUDO DA SOBRETENSÃO CAUSADA POR DESCARGAS
ATMOSFÉRICAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE 69 kV**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02 de dezembro de 2021

Ulisses Chemin Netto
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Muryllo Amalio de Souza
Mestre
Companhia Paranaense de Energia

Fabiano Gustavo Silveira
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à Universidade Tecnológica Federal do Paraná e a todos que a compõem. Em especial, gostaríamos de agradecer ao nosso orientador Prof. Dr. Ulisses Chemin Netto, ao nosso coorientador Me. Muryllo Amalio de Souza e ao integrante da banca Prof. Dr. Fabiano Gustavo Silveira Magrin, pois suas colocações e os conhecimentos transmitidos ao longo dos anos contribuíram para o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso.

RESUMO

Este trabalho expõe de forma detalhada a modelagem computacional, através do pré-processador gráfico ATPDraw, de uma linha aérea de 69 kV cujas estruturas de suporte consistem em postes de concreto. Tanto esta tensão de operação quanto esta classe estrutural são pouco abordadas na literatura. Foram analisadas as sobretensões nos isoladores causadas pela incidência de uma descarga atmosférica no cabo guarda, considerando dois modelos de fonte de descarga, com 1 ou 7 Funções de Heidler. Os condutores de descida do poste de concreto foram modelados através de um modelo multicondutores e representados por linhas de transmissão sem perdas. Quanto aos cenários de simulação, além do efeito da variação da resistividade do solo, foram cogitadas as condições de aterramento regular e irregular. Os valores máximos de sobretensão nos isoladores para a fonte de descarga com 7 Heidlers foram maiores em 80 % dos casos, caracterizando uma abordagem mais conservadora. Foram verificados grandes impactos nas amplitudes e formatos de onda das sobretensões nos isoladores para condição de aterramento irregular na estrutura atingida. Entretanto, este efeito foi mínimo para a sobretensão nos isoladores da estrutura atingida considerando a condição de aterramento irregular na estrutura adjacente.

Palavras-chave: ATP; Função de Heidler; impedância impulsiva; modelo multicondutores; poste de concreto.

ABSTRACT

This work displays in detail the modelling, using the graphical preprocessor ATPDraw, of a 69 kV overhead line, whose line supports consist in concrete poles. Both this operating voltage and this class of structure are infrequently approached in the literature. The overvoltage waveforms across the insulators caused by lightning strikes on the shield wire were analysed, considering two models of lightning sources, with 1 or 7 Heidler Functions. The grounding conductor along the concrete pole were modelled through a multiconductor model and represented as lossless transmission lines. Regarding the simulations scenarios, besides the effects of the soil resistivity variation, both regular and irregular grounding conditions were considered. The overvoltage peak values across the insulators for the 7 Heidler current source model were superior in 80 % of the cases, characterizing a more conservative approach. Major impacts were observed in both amplitude and shape of waveforms of the overvoltage across the insulators for the irregular grounding condition in the struck pole. Nevertheless, this effect was minimal for the overvoltage across the insulators of the struck pole considering the irregular grounding condition in the adjacent pole.

Keywords: ATP; concrete pole; Heidler Function; impulsive impedance; multiconductor model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Geração de eletricidade no Brasil e no Mundo	12
Figura 2	– Causas de desligamentos em rede de distribuição de 69 kV	15
Figura 3	– Causas de desligamentos das linhas de transmissão da rede básica	16
Figura 4	– Fluxograma para execução da pesquisa	19
Figura 5	– Distribuição de cargas na nuvem de tempestade	22
Figura 6	– Formação dos canais precursores de descarga	23
Figura 7	– Fechamento do canal de descarga	24
Figura 8	– Classificação de descargas pela polaridade e direção de propagação	25
Figura 9	– Densidade de descargas atmosféricas no Brasil	27
Figura 10	– Parâmetros de tempo para onda de corrente de impulso	28
Figura 11	– Curva dupla exponencial e seu circuito gerador	30
Figura 12	– Principais componentes de uma linha aérea	32
Figura 13	– Disposição horizontal em uma linha de transmissão de alta tensão	33
Figura 14	– Disposição vertical dos condutores em uma linha de distribuição	34
Figura 15	– Disposição triangular de condutores	35
Figura 16	– Esquemático de forças atuantes em uma estrutura em ângulo	37
Figura 17	– Estrutura em ângulo	37
Figura 18	– Esquemático de estruturas de transposição de fases	38
Figura 19	– Representação de estrutura estaiada	39
Figura 20	– Simulações da densidade de corrente em um condutor	42
Figura 21	– Efeito corona em cadeia de isoladores	43
Figura 22	– Diagrama de forças para vãos nivelados	45
Figura 23	– Modelo eletrogeométrico e raio de atração	46
Figura 24	– Influência da corrente de pico da descarga no raio de atração do cabo guarda .	47
Figura 25	– Exemplo de isolador de porcelana	49
Figura 26	– Exemplo de isolador de vidro temperado	50
Figura 27	– Exemplo de isolador polimérico	51
Figura 28	– Isoladores tipo roldana instalados em poste	52
Figura 29	– Isoladores monocorpos do tipo pino instalados em poste	53
Figura 30	– Isoladores do tipo pilar	53
Figura 31	– Exemplo de isolador de suspensão	54
Figura 32	– Componentes do sistema de aterramento	56
Figura 33	– Fontes de corrente associadas a cada elemento do sistema de aterramento	57
Figura 34	– Circuito equivalente do aterramento em alta frequência	58
Figura 35	– Circuito equivalente do aterramento em baixa frequência	58
Figura 36	– Estratificação do solo	60
Figura 37	– Influência da umidade na resistividade do solo	61
Figura 38	– Influência da concentração de sais na resistividade do solo	61
Figura 39	– Comportamento da impedância harmônica em um solo de resistividade de 2500 Ω .m	65
Figura 40	– Comportamento da impedância harmônica em solos de resistividades de 100, 300, 600, 1000 Ω .m	66

Figura 41	– Aumento do potencial elétrico do solo	68
Figura 42	– Atenuação e distorção da corrente ao longo do eletrodo de aterramento	68
Figura 43	– Impedância impulsiva e resistência em baixa frequência x comprimento do eletrodo de aterramento	70
Figura 44	– Representação da incidência de uma descarga direta em uma linha de transmissão	72
Figura 45	– Representação da incidência de uma descarga indireta em uma linha de transmissão	73
Figura 46	– Tensão resultante no topo de estrutura de suporte	75
Figura 47	– Influência da tensão instantânea na linha na sobretensão na cadeia de isoladores	76
Figura 48	– Detalhes do método de medição direto	78
Figura 49	– Aproximação de silhueta de torre através de formas geométricas cilíndricas e cônicas	79
Figura 50	– Distribuição de campos elétricos e magnéticos para determinada estrutura através de simulação no <i>software</i> FLUX3D	80
Figura 51	– Aplicação do método das imagens para condutores verticais paralelos	83
Figura 52	– Exemplo de aplicação do modelo multicondutor para torre de três condutores	85
Figura 53	– Exemplo de aplicação do modelo multicondutores para torre treliçada	86
Figura 54	– Registro de descarga no cabo guarda de uma linha de transmissão de 500 kV com ocorrência de <i>backflashover</i>	88
Figura 55	– Isolador danificado por arco elétrico	88
Figura 56	– Estrutura de suporte da linha modelada	90
Figura 57	– Isolador polimérico <i>linepost</i> de classe de tensão 69 kV	91
Figura 58	– Topologia dos condutores de descida	92
Figura 59	– Segmentação dos condutores de descida	93
Figura 60	– Componente a representar a estrutura e sua forma de inserção no <i>software</i> ATPDraw	96
Figura 61	– Caixa de diálogo do componente LINEZT_1 com valores padrão	97
Figura 62	– Representações da estrutura de suporte no <i>software</i> ATPDraw	99
Figura 63	– Arranjos de eletrodos de aterramento	100
Figura 64	– Ícones e forma de inserção do componente HEIDLER no <i>software</i> ATPDraw	102
Figura 65	– Janela de diálogo do componente HEIDLER no <i>software</i> ATPDraw com valores padrão	103
Figura 66	– Representação de curvas medianas do Morro do Cachimbo através de 1 HEIDLER e 7 HEIDLER	107
Figura 67	– Modelos de fonte utilizados nas simulações	108
Figura 68	– Exemplo da utilização da curva de suportabilidade	109
Figura 69	– Curva da suportabilidade do isolador	110
Figura 70	– Circuito TACS gerador da curva de suportabilidade utilizada	110
Figura 71	– Componentes utilizados para a representação dos vãos e suas formas de inserção no ATPDraw	111
Figura 72	– Aba <i>Model</i> do componente <i>Line/Cable Data</i>	113
Figura 73	– Aba <i>Data</i> do componente <i>Line/Cable Data</i>	115
Figura 74	– Seção transversal dos condutores <i>Penguin</i> e <i>Grosbeak</i>	116
Figura 75	– Modelo do trecho de linha utilizado nas simulações	119
Figura 76	– Comparação entre sobretensões obtidas com 9 e 17 estruturas	120
Figura 77	– Comportamento da onda de corrente injetada na linha	122
Figura 78	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para diferentes valores	

	de resistividade do solo - 1 Heidler	125
Figura 79	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para diferentes valores de resistividade do solo - 7 Heidler	126
Figura 80	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 1 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$	128
Figura 81	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$	129
Figura 82	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 1 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$	130
Figura 83	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$	131
Figura 84	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 1 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$	132
Figura 85	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$	133
Figura 86	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 1 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$	135
Figura 87	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 7 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$	136
Figura 88	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 1 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$	137
Figura 89	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 7 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$	138
Figura 90	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 1 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$	139
Figura 91	– Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Valores medianos (50 %) medidos na estação de San Salvatore	29
Tabela 2	– Faixas de resistividade típicas de materiais que compõem o solo	60
Tabela 3	– Variação da resistividade com a temperatura para um solo arenoso	62
Tabela 4	– Valores típicos de resistividade para diferentes períodos geológicos	63
Tabela 5	– Valores típicos de resistividade para diferentes períodos geológicos	64
Tabela 6	– Parâmetros influentes na amplitude da tensão na cadeia de isoladores	77
Tabela 7	– Parâmetros de cada segmento da torre da Figura 53	87
Tabela 8	– Impedância de surto dos condutores de descida	95
Tabela 9	– Coeficientes de impulso para diferentes resistividades do solo	101
Tabela 10	– Impedâncias de aterramento	101
Tabela 11	– Parâmetros medianos das descargas descendentes negativas primeiras medidos na estação do Morro do Cachimbo	104
Tabela 12	– Parâmetros das 7 funções Heidler para a geração da curva MCS_FST#2	105
Tabela 13	– Parâmetros de entrada do modelo com 7 componentes HEIDLER no ATPDraw	106
Tabela 14	– Parâmetros de entrada do modelo com 1 componente HEIDLER no ATPDraw	107
Tabela 15	– Percentual de tempo em que cada isolador da estrutura central apresentou o maior valor de tensão para a condição de aterramento regular	123
Tabela 16	– Percentual de tempo em que cada isolador da estrutura central apresentou o maior valor de tensão para a condição de aterramento irregular na estrutura central	124
Tabela 17	– Percentual de tempo em que cada isolador da estrutura central apresentou o maior valor de tensão para a condição de aterramento irregular na estrutura adjacente	124
Tabela 18	– Valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular	127
Tabela 19	– Valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular na estrutura central	134
Tabela 20	– Valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular na estrutura adjacente	141
Tabela 21	– Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 75 \Omega$) na estrutura central em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular	142
Tabela 22	– Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 150 \Omega$) na estrutura central em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular	142
Tabela 23	– Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 75 \Omega$) na estrutura adjacente em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular	143
Tabela 24	– Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 150 \Omega$) na estrutura adjacente em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular	143

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Tema	12
1.1.1	Delimitação do tema.....	17
1.2	Problemas e premissas	17
1.3	Objetivos	18
1.3.1	Objetivo geral.....	18
1.3.2	Objetivos específicos.....	18
1.4	Justificativa	18
1.5	Procedimentos metodológicos	19
1.6	Estrutura do trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Descrição do fenômeno físico	21
2.2	Caracterização das descargas atmosféricas	24
2.3	Parâmetros das descargas atmosféricas	26
2.3.1	Densidade de descargas atmosféricas.....	26
2.3.2	Parâmetros de onda de corrente de descarga.....	27
2.3.3	Formas de onda.....	28
2.3.3.1	Curva dupla exponencial.....	29
2.3.3.2	Função de Heidler.....	30
2.4	Linhas aéreas	31
2.4.1	Aspectos construtivos.....	31
2.4.1.1	Disposição dos condutores.....	32
2.4.1.2	Classificação das estruturas.....	35
2.4.1.3	Dimensões das estruturas.....	39
2.4.2	Cabos condutores.....	39
2.4.2.1	Cabos guarda.....	43
2.4.2.2	Flecha.....	44
2.4.2.3	Modelo eletrogeométrico.....	45
2.4.3	Isoladores.....	47
2.4.3.1	Materiais.....	48
2.4.3.2	Tipos de isoladores.....	51
2.4.4	Sobretensão em linhas de transmissão.....	54
2.5	Aterramento	55
2.5.1	Representação do sistema de aterramento.....	57
2.5.2	Resistividade do solo.....	59
2.5.3	Impedância harmônica.....	64
2.5.4	Elevação de potencial no aterramento.....	67
2.5.5	Comprimento efetivo e impedância impulsiva.....	68
2.5.6	Coefficiente de impulso.....	71
2.6	Descargas atmosféricas em linhas aéreas	71
2.6.1	Descarga direta.....	71

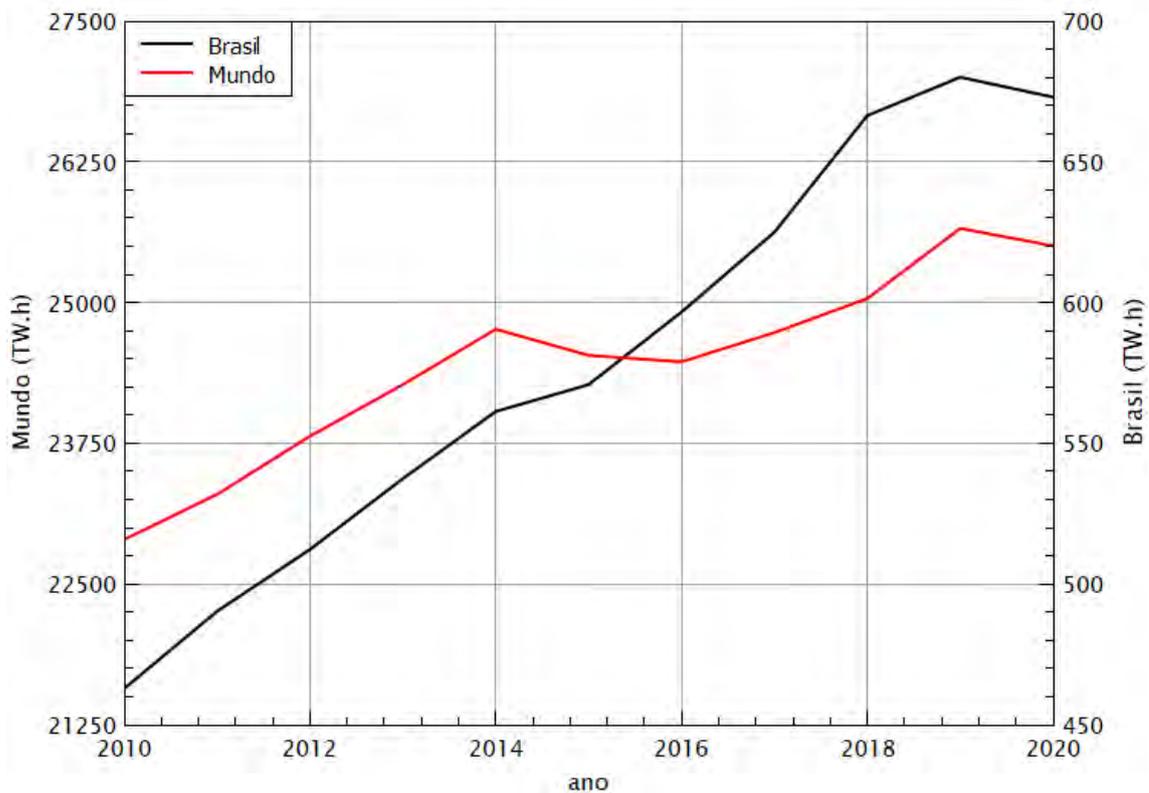
2.6.2	Descarga indireta	73
2.6.3	Impedância de surto	77
2.6.4	Equação para cálculo da impedância de surto	81
2.6.5	Modelo multicondutores	83
2.7	Sobretensão causada por descargas atmosféricas	87
2.8	Considerações finais	89
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	90
3.1	Características da linha de distribuição modelada	90
3.2	Cálculo da impedância de surto dos condutores de descida	92
3.2.1	Representação da estrutura de suporte no <i>software</i> ATPDraw	95
3.3	Impedância impulsiva de aterramento	100
3.4	Descarga atmosférica	102
3.4.1	Componente utilizado	102
3.4.2	Parâmetros utilizados	104
3.5	Suportabilidade do isolador	108
3.6	Cabo guarda e condutores fase	111
3.6.1	Aba <i>Model</i> do componente <i>Line/Cable Data</i>	112
3.6.2	Aba <i>Data</i> do componente <i>Line/Cable Data</i>	114
3.7	Modelo final	117
3.8	Considerações finais	121
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	122
4.1	Considerações iniciais	122
4.2	Resultados	124
4.2.1	Simulações com aterramento regular	124
4.2.2	Simulações com aterramento irregular na estrutura central	127
4.2.3	Simulações com aterramento irregular na estrutura adjacente	134
4.3	Considerações finais	141
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS	144
	REFERÊNCIAS	146
	Apêndice A – COMPORTAMENTO DO COMPONENTE LINEZT_1	155
	Apêndice B – COMPACTAÇÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE	158

1 INTRODUÇÃO

1.1 Tema

Um dos fatores essenciais para a evolução da qualidade de vida da sociedade é o acesso à energia elétrica, vital para o crescimento econômico dos países e imprescindível para o desenvolvimento humano (SILVA; GUIMARAES, 2012). Apesar dos pontuais decréscimos em função de crises socioeconômicas, o consumo de energia elétrica e, portanto, sua geração, tende a aumentar no decorrer dos anos, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Geração de eletricidade no Brasil e no Mundo.



Fonte: adaptado de British Petroleum (2021).

Em 2020, em função da crise sanitária associada à pandemia da COVID-19, em relação ao ano anterior, houve uma retração na demanda de energia elétrica, a qual configurou 1,6 % no Brasil e 1 % no mundo (EPE, 2021b; IEA, 2021). Apesar da pandemia, em 2021 é esperado um crescimento global de 4,5 % na demanda de energia elétrica (IEA, 2021). Por sua vez, no Brasil, entre 2019 a 2030, o Plano Decenal da Expansão de Energia prevê um crescimento médio na

demanda de energia elétrica de 3,1 % (EPE, 2021a).

Em conformidade com tais estimativas de crescimento e de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), no Brasil, além de um total de 9 471 empreendimentos em operação, totalizando cerca de 176,2 TW de potência fiscalizada, está prevista uma adição de aproximadamente 48,2 TW na capacidade de geração do país para os próximos anos, através de 1159 empreendimentos (ANEEL, 2021c). Ademais, para a rede básica¹, é esperado ao longo do decênio um investimento de R\$ 62,5 bilhões em linhas de transmissão e R\$ 27,1 bilhões em subestações (EPE, 2021a).

O aumento da demanda de energia elétrica aliado a um sistema interligado cada vez mais complexo, torna o aperfeiçoamento do sistema elétrico de potência (SEP) imprescindível, visando garantir uma operação normal e segura. No caso de faltas, espera-se que a recuperação do sistema ocorra o mais rápido possível a fim de garantir em condições normais ou de contingência, uma operação confiável (SILVA *et al.*, 2005). Quando o sistema deixa de operar conforme o esperado, pode ocorrer a interrupção do fornecimento de energia elétrica, trazendo diversos transtornos para a sociedade e prejudicando a operação de processos fundamentais, relacionados à saúde (CORSAN, 2019) e ao abastecimento de água (Prefeitura Municipal de Barbacena, 2018).

Ademais, a interrupção no fornecimento de energia elétrica causa impactos econômicos. A título de ilustração, de acordo com notícia publicada no Jornal Exame, da editora Abril, um blecaute ocorrido em março de 2018 gerou um prejuízo econômico financeiro estimado em R\$ 200 milhões ao governo federal (DINO, 2018).

Segundo um relatório de análise de perturbação publicado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em novembro de 2020 um curto-circuito interno incendiou um transformador da subestação Macapá e desencadeou uma série de desligamentos automáticos, indisponibilidade de todos os transformadores da subestação e a interrupção na alimentação de 242 MW, representando 95 % da carga do estado do Amapá (ONS, 2020a).

A recomposição do Sistema Amapá contemplou 22 dias de fornecimento em rodízio (COUTINHO, 2020a), com turnos de 3, 4 e 6 horas, afetando os setores de saúde e segurança pública e gerando problemas no fornecimento de água potável e prejuízos ao comércio (COUTINHO, 2020b). Além disso, segundo G1 (2020), a polícia militar registrou 119 protestos no estado contra o apagão e o rodízio de energia.

Por conseguinte, nota-se a necessidade de fiscalização dos agentes do setor de energia

¹Entende-se por rede básica do sistema interligado nacional as linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e equipamentos de subestação em tensão igual ou superior a 230 kV (ONS, 2021).

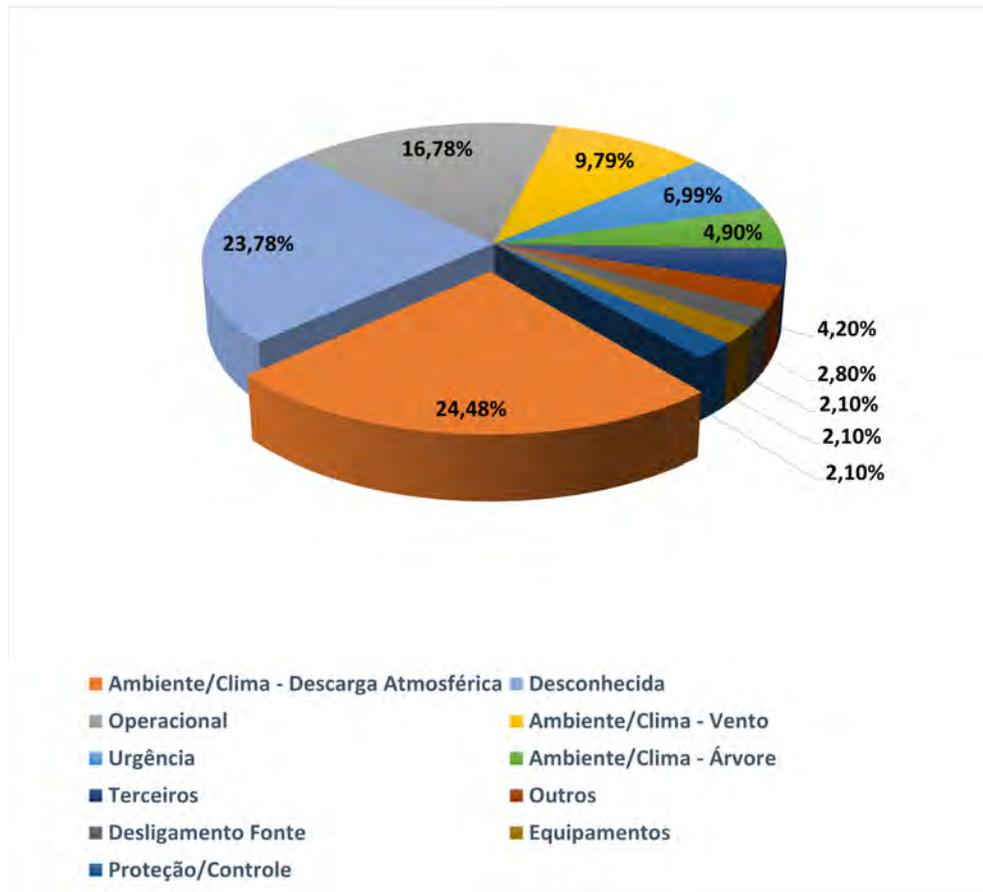
elétrica. Segundo o artigo 2º da Lei Nº 9427, de 26 de dezembro de 1996 (BRASIL, 1996), a ANEEL é responsável por regular a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Exigências e multas são impostas aos agentes do setor de energia elétrica conforme Resolução Normativa Nº 846, de 11 de junho de 2019 (BRASIL, 2019).

A ANEEL aplicou uma multa de 3,6 milhões de reais ao detentor Linhas de Macapá Transmissora de Energia (LMTE) pelo desligamento do Sistema Amapá, representando 3,54 % do valor da Receita Operacional Líquida (ROL) da concessionária e configurando a maior multa aplicada pela agência em termos percentuais (ANEEL, 2021b). Ademais, o Instituto de Defesa do Consumidor (PROCON) aplicou uma multa de cerca de 270 mil reais à LMTE, pela interrupção no fornecimento de energia, além de outra de cerca de 180 mil reais à Gemini Energy S.A, por não apresentar defesa no prazo estabelecido (CARVALHO, 2021).

Portanto, para reduzir os desligamentos não planejados decorrentes das faltas no sistema e, conseqüentemente, os transtornos socioeconômicos associados, necessita-se garantir uma operação confiável, contínua e de qualidade. Para isso, espera-se que todas as parcelas do SEP operem de forma adequada. Dentre elas, destacam-se as linhas de transmissão (LTs) e as linhas de distribuição (LDs), as quais são responsáveis por transportar a energia elétrica até grandes centros e, posteriormente, aos consumidores. Por envolver grandes construções de altura elevada, com cabos e componentes atrelados, as LTs e LDs são consideradas as estruturas mais expostas do SEP, tornando-as vulneráveis frente aos possíveis desligamentos decorrentes dos mais variados fenômenos naturais e humanos, afetando a qualidade da energia transmitida e os seus componentes.

É de conhecimento dos autores que o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas em linhas de 69 kV no ano de 2020 em uma unidade federativa do Brasil representou 24,48 % dos desligamentos não planejados da rede de distribuição de determinada concessionária, conforme a Figura 2.

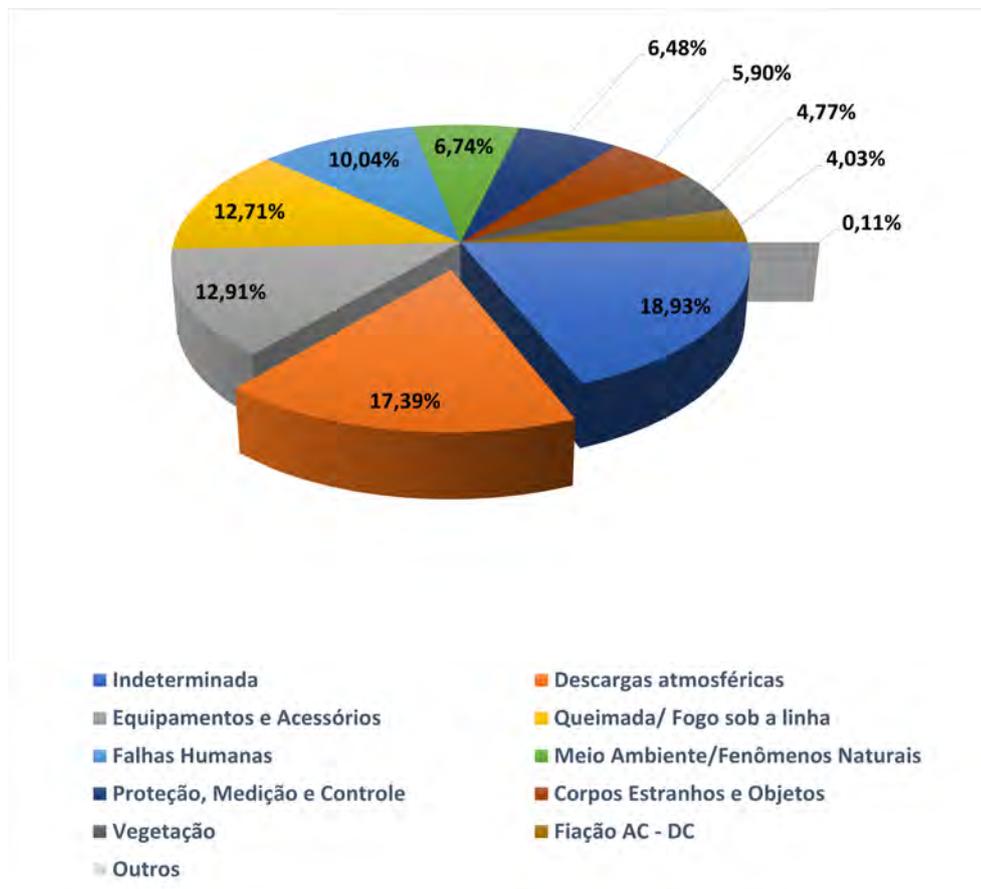
Figura 2 – Causas de desligamentos em rede de distribuição de 69 kV.



Fonte: autoria própria (2021).

Por se tratar de uma informação com um horizonte de dados pequeno, apenas 1 ano, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) buscou traçar um paralelo com os dados do Sistema Interligado Nacional (SIN) a fim de validar esta informação. Dada a sua acessibilidade, por se tratar de dados abertos da rede básica e por apresentar um horizonte de dados considerável, no período compreendido entre janeiro de 2013 a setembro de 2021, a rede básica apresentou 28 327 desligamentos não planejados (ANEEL, 2021a). Destes, conforme a Figura 3, destaca-se uma maior frequência de ocorrência das causas indeterminadas (18,93 %), descargas atmosféricas (17,39 %), equipamentos e acessórios (12,91 %) e queimada/fogo sob a linha (12,71 %). Isso posto, conclui-se que o número de desligamentos causados por descargas atmosféricas tanto nas linhas de 69 kV como na rede básica são muito próximos, atestando, estatisticamente, a relevância deste fenômeno frente aos desligamentos não planejados em linhas aéreas.

Figura 3 – Causas de desligamentos das linhas de transmissão da rede básica.



Fonte: adaptado de ANEEL (2021a).

O alto índice de desligamentos das LTs causados por descargas atmosféricas, segunda maior parcela no período, corrobora as informações que o Brasil, de extensão continental, é um dos países com a maior ocorrência do fenômeno no mundo (PINTO JÚNIOR; PINTO, 2000). No Brasil, no período correspondente aos anos de 2013 até 2018, ocorreram em média 77,6 milhões de descargas atmosféricas ao ano, implicando um prejuízo anual estimado da ordem de 1 bilhão de reais, incluindo danos às redes elétricas atingidas e a morte de animais (MORAES, 2018).

Em relação ao verão de 2017/2018, o verão de 2018/2019 apresentou um aumento de 750 % na incidência de descargas atmosféricas na cidade de Curitiba (MAROS, 2019). Dentre os fatores para tal aumento, destaca-se o fenômeno atmosférico-oceânico conhecido como *El Niño*. Sem entrar no mérito do fenômeno, este afeta a região sul do Brasil causando repercussões atmosféricas, favorecendo a formação de nuvens de tempestade e, conseqüentemente, o aumento da ocorrência de descargas atmosféricas (SALINI, 2012).

1.1.1 Delimitação do tema

A intensa descarga elétrica que por vezes atinge a superfície da Terra trata-se de um fenômeno natural complexo. Este se expressa através do fluxo de uma corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração cuja característica de variação rápida da corrente de descarga torna o fenômeno uma importante fonte de distúrbios eletromagnéticos. Dentre os efeitos mais relevantes, destacam-se as tensões induzidas, fontes de distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos de baixa e média tensão (VISACRO, 2005).

A sobretensão nos isoladores decorrente da incidência de descargas atmosféricas pode resultar no desligamento da linha e tal cenário pode ser modelado computacionalmente através de *softwares* especializados em transitórios eletromagnéticos.

Quando comparadas as redes básica e de distribuição para a tensão de 69 kV, o percentual de desligamentos causados por descargas atmosféricas mostraram-se similares. Apesar de apresentarem estruturas de menor altura, a extensão de LDs, ao menos para o estado do Paraná (202 085 km) é superior àquela de LTs do SIN (145 600 km) (COPEL, 2020; ONS, 2020c). Desta forma, dada essa semelhança e o restrito material disponível para o nível de tensão deste trabalho, será analisada a sobretensão nos isoladores em uma linha de distribuição de alta tensão de 69 kV frente a descargas atmosféricas.

1.2 Problemas e premissas

Simulações computacionais são utilizadas para toda gama de eventos e cenários de difícil reprodução. Em particular, é pouco viável a reprodução de descargas atmosféricas nos elevados cabos das linhas de distribuição, a ser exemplificado na seção 2.6.3.

O *Alternative Transients Program* (ATP) é um dos mais utilizados *softwares* para simulação digital de transitórios eletromagnéticos (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002). Ademais, o ATP apresenta uma vasta capacidade de modelagem e importantes ferramentas adicionais que transcendem transitórios (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002).

Neste TCC foi utilizado o ATPDraw 6.3, um pré-processador gráfico para a versão ATP do *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) que possibilita a construção de circuitos através da seleção de componentes preestabelecidos (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Quanto aos parâmetros de simulação, foram adotadas informações consagradas na literatura.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Modelar computacionalmente e analisar uma linha de distribuição de 69 kV sob o efeito da sobretensão causada por descargas atmosféricas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a temática de descargas atmosféricas e os seus impactos em linhas de distribuição;
- Pesquisar e determinar os parâmetros de uma linha de distribuição de 69 kV;
- Determinar e justificar os parâmetros a serem variados na simulação;
- Representar a linha de distribuição de 69 kV no *software* ATP;
- Executar as simulações computacionais do modelo, frente à variação dos parâmetros preestabelecidos;
- Analisar o impacto da variação dos parâmetros nas simulações.

1.4 Justificativa

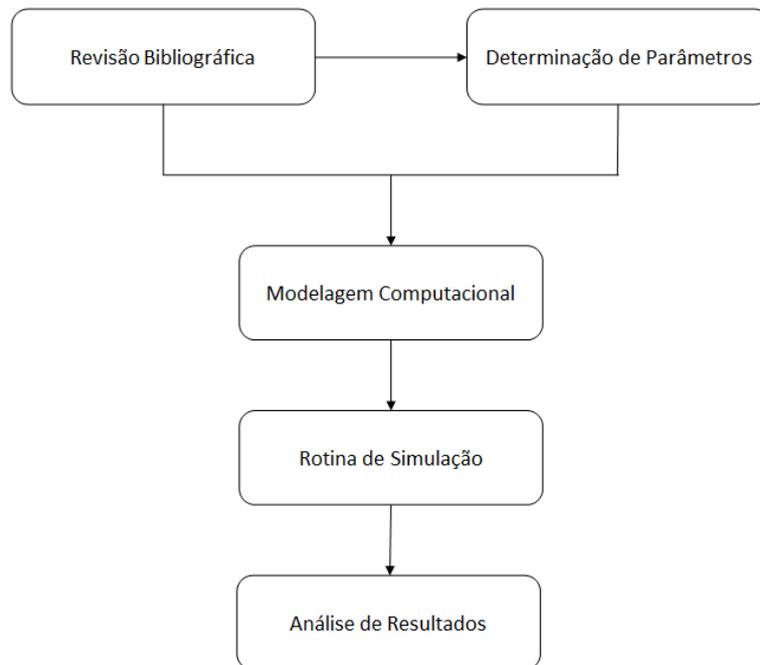
De acordo com o apresentado na seção 1.1, as descargas atmosféricas representaram a segunda maior causa de desligamentos de LTs da rede básica e a maior na amostra referente a LDs de 69 kV e impactando, portanto, de forma significativa na confiabilidade do sistema elétrico e da economia. Ademais, assim como exemplificado pelo desligamento do Sistema Amapá em novembro de 2020, a falta de energia elétrica afeta importantes setores como saúde e segurança e gera problemas no fornecimento de água e prejuízos ao comércio.

Conforme visto na seção 1.1.1, desligamentos decorrentes de descargas atmosféricas podem ser causados pela sobretensão nos isoladores. Este TCC visa contribuir com um estudo para um nível de tensão pouco abordado na literatura e que apresenta por vezes um percentual de desligamentos superior ao da rede básica. Ademais, neste trabalho será discutida a variação de determinados parâmetros do modelo escolhido e implementado no *software* ATPDraw a fim de traçar cenários de simulação a serem analisados.

1.5 Procedimentos metodológicos

Com o intuito de alcançar o objetivo proposto, o desenvolvimento do TCC foi dividido em cinco etapas, estas representadas no diagrama de blocos da Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma para execução da pesquisa.



Fonte: autoria própria (2021).

A primeira consiste em uma revisão bibliográfica, a qual auxiliará no desenvolvimento das etapas subsequentes. Com base nos conhecimentos adquiridos serão determinados os parâmetros a serem implementados na modelagem computacional a ser elaborada. A partir desta será realizada uma rotina de simulação mediante *software* ATP e, por fim, a análise de resultados.

1.6 Estrutura do trabalho

- O capítulo 1 tem por objetivo apresentar o contexto em que esta pesquisa se insere, os objetivos definidos, a metodologia proposta, o planejamento da pesquisa, bem como a organização deste documento;

- O capítulo 2 tem por objetivo apresentar a revisão bibliográfica a respeito da temática de descargas atmosféricas e seus efeitos em LTs e LDs;
- O capítulo 3 tem por objetivo apresentar em detalhes a simulação computacional da linha de distribuição de 69 kV, realizada com o uso do *software* ATP;
- O capítulo 4 tem por objetivo discutir os resultados, considerando os pré-requisitos já mencionados;
- O capítulo 5 tem por objetivo apresentar as conclusões e o fechamento da pesquisa a partir dos resultados, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Por fim serão apresentadas as referências bibliográficas utilizadas e apêndices.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica a respeito da temática de descargas atmosféricas e seus efeitos em LTs e LDs. Para tanto, será considerada uma abordagem mais ampla acerca da temática, buscando esclarecer conceitos básicos, descrição, tipificação e parâmetros do fenômeno de descargas atmosféricas e seus principais efeitos nas estruturas a serem analisadas.

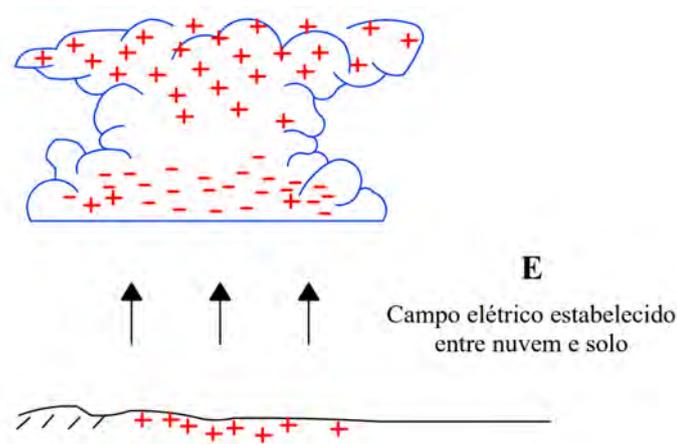
2.1 Descrição do fenômeno físico

Um dos sinais mais distintivos do ser humano é a sua mente indagadora e imaginativa que sempre despertou o interesse ao que se refere os fenômenos naturais à sua volta. Devido ao seu caráter aleatório e aos seus efeitos audiovisuais, ao longo dos séculos, o fenômeno de descargas atmosféricas deu origem aos mais diversos mitos e lendas nas mais diversas culturas. Tal fenômeno advém majoritariamente das chamadas *Cumulus Nimbus*, as nuvens de tempestade, cuja formação ocorre principalmente a partir do encontro de correntes ascendentes de ar quente e úmido e de frentes frias superiores (VISACRO, 2005).

Os processos macro e micro físicos responsáveis pelo processo de eletrificação das nuvens de tempestade não serão abordados neste trabalho, pois constituem um problema ainda não inteiramente resolvido pela comunidade científica (MATTOS, 2009). Entretanto, é de fundamental importância destacar a disposição das cargas ionizadas no interior das nuvens de tempestade para uma correta análise dos campos elétricos associados.

Conforme exposto na Figura 5 e de forma simplificada, a distribuição típica de cargas elétricas em uma nuvem de tempestade caracteriza-se pelo posicionamento de cargas positivas no topo da nuvem e de cargas negativas na base da nuvem.

Figura 5 – Distribuição de cargas na nuvem de tempestade.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

Devido a esta disposição, serão formados dois campos elétricos de grande intensidade e diferença de potencial que eventualmente serão os responsáveis pela formação das descargas atmosféricas. O primeiro, formado no interior da nuvem e o segundo, formado devido a indução de cargas positivas no solo em razão da grande concentração de cargas negativas na base da nuvem (VISACRO, 2005).

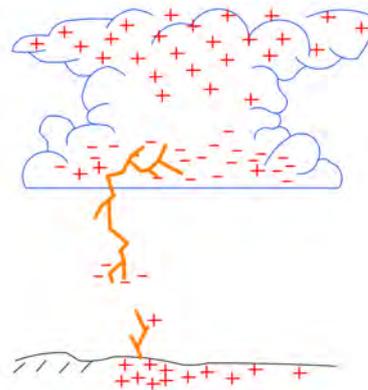
Em algumas circunstâncias, a intensidade do campo elétrico na nuvem supera o valor da rigidez dielétrica do ar, desencadeando uma descarga elétrica. Esta, por sua vez, é constituída por um canal ionizado de plasma, de características condutoras, o qual promove a transferências do centro de carga da nuvem para a extremidade inferior do canal, devido ao poder das pontas² (VISACRO, 2005).

A concentração de cargas negativas nas proximidades da base do canal, resulta na intensificação do campo elétrico local, podendo promover uma nova descarga, semelhante à primeira. Este processo tende a se repetir, gerando uma série de descargas elétricas consecutivas cuja tendência é formar um canal descendente externo à nuvem, chamado de canal precursor de descarga (VISACRO, 2005).

Conforme a Figura 6, a medida que as ramificações daquele canal descendente se aproximam do solo, a densidade de cargas positivas influenciada pelo relevo local, em conjunto com o campo elétrico de intensidade elevada, promove o surgimento de canais ascendentes positivos, formados pelo deslocamento de elétrons para baixo (VISACRO, 2005).

²O poder das pontas é uma propriedade física caracterizada pela tendência das cargas elétricas de se concentrarem nas extremidades de corpos eletricamente carregados (VISACRO, 2005).

Figura 6 – Formação dos canais precursores de descarga.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

Conforme ilustrado pela Figura 7, com a evolução dos canais precursores (a), ao atingir uma distância crítica entre o canal descendente e um dos ascendentes (b), ocorre o fechamento do canal de descarga (c), o qual será percorrido por uma corrente de alta intensidade e curta duração, denominada corrente de retorno, formada majoritariamente pelo descarregamento das cargas depositadas no envelope de corona criado durante a evolução do canal precursor de descarga (VISACRO, 2005). A todo este processo, se dá o nome de descarga atmosférica, popularmente chamada de raio (VISACRO, 2005).

Uma vez fechado o canal de descarga, a passagem de corrente através do canal ionizado gera um intenso aquecimento, podendo atingir temperaturas expressivas de até 30 000 °C (PINTO JÚNIOR; PINTO, 2000). Associado à este aquecimento, surge o fenômeno luminoso conhecido como relâmpago e devido a expansão abrupta do ar, o fenômeno sonoro conhecido como trovão (VISACRO, 2005).

Figura 7 – Fechamento do canal de descarga.



Fonte: adaptado de Saba *et al.* (2017).

Passado o fluxo da corrente de retorno, o canal de ar pré-ionizado se mantém por cerca de 100 milissegundos, podendo ser realimentado por outros centros de carga da nuvem, através de uma corrente de recarregamento (VISACRO, 2005). O armazenamento de carga pode desencadear o fechamento de um segundo canal, associado à uma nova descarga de menor intensidade, denominada descarga subsequente, a qual ocorre no mínimo uma vez em cerca de 80 % dos casos (VISACRO, 2005).

2.2 Caracterização das descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas podem ser categorizadas quanto ao seu percurso em descargas: para a estratosfera, intra-nuvem, entre-nuvens e nuvem-solo (VISACRO, 2005). Sendo as últimas de maior interesse de estudo.

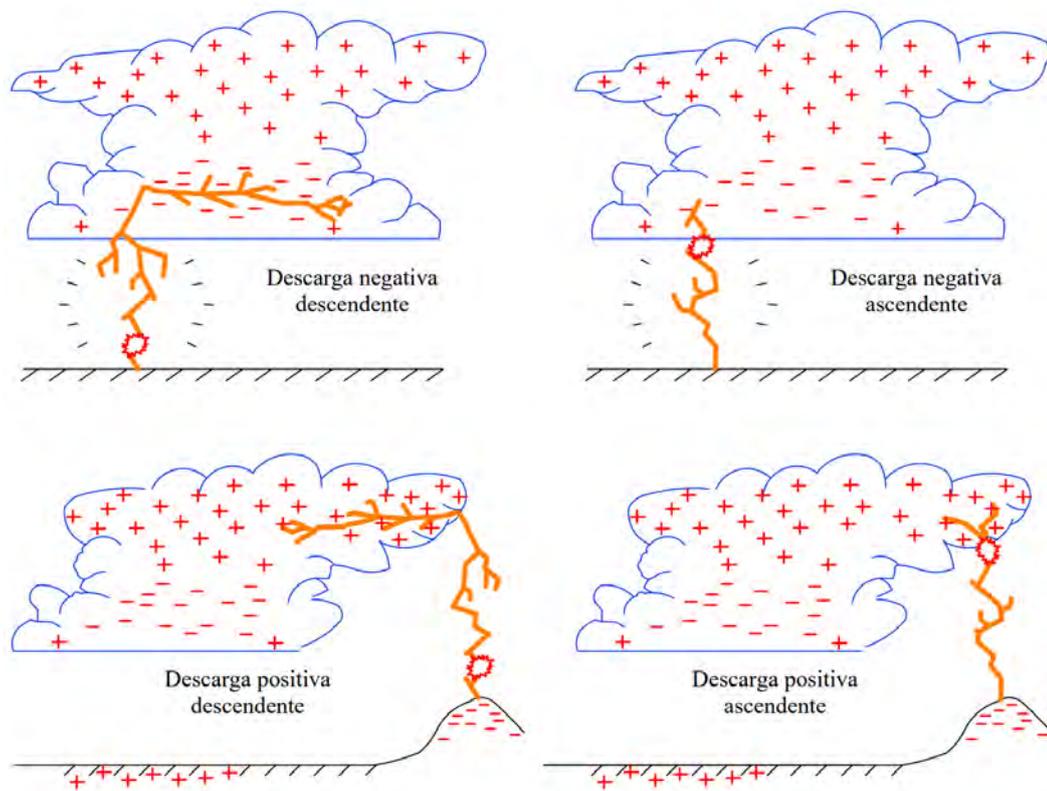
As descargas nuvem-solo podem ser classificadas quanto à direção de propagação do seu canal precursor. Desta forma, estas podem consistir em descargas descendentes, nas quais o canal precursor de descarga se propaga majoritariamente da nuvem para o solo, ou em descargas ascendentes, quando este canal se propaga majoritariamente do solo para a nuvem (VISACRO,

2005).

As descargas nuvem-solo podem, ainda, ser classificadas de acordo com a polaridade da carga transferida para o solo, correspondendo a uma descarga positiva, quando o centro de carga da nuvem que originou a descarga está carregado positivamente, ou a uma descarga negativa, quando este está carregado negativamente (VISACRO, 2005).

Desta forma, a categorização de descargas nuvem-solo quanto à sua polaridade e direção de propagação do canal precursor resulta em quatro tipos distintos, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Classificação de descargas pela polaridade e direção de propagação.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

Segundo Zanetta Júnior (2003, p. 445): “[...] os raios com polaridade negativa têm uma maior probabilidade de ocorrência (aproximadamente 90 % dos casos) [...]” e confirmado por Visacro (2005, p. 58): “Estima-se que 90 % das descargas observadas por medição direta no Brasil são negativas descendentes [...]”. Portanto, toma-se as descargas negativas descendentes como o principal tipo para a caracterização de descargas neste TCC.

2.3 Parâmetros das descargas atmosféricas

2.3.1 Densidade de descargas atmosféricas

Ressaltando a natureza aleatória das descargas atmosféricas, a quantificação da taxa de incidência de descargas nuvem-solo em determinada região auxilia a adoção de medidas cabíveis de proteção contra os efeitos associados ao fenômeno.

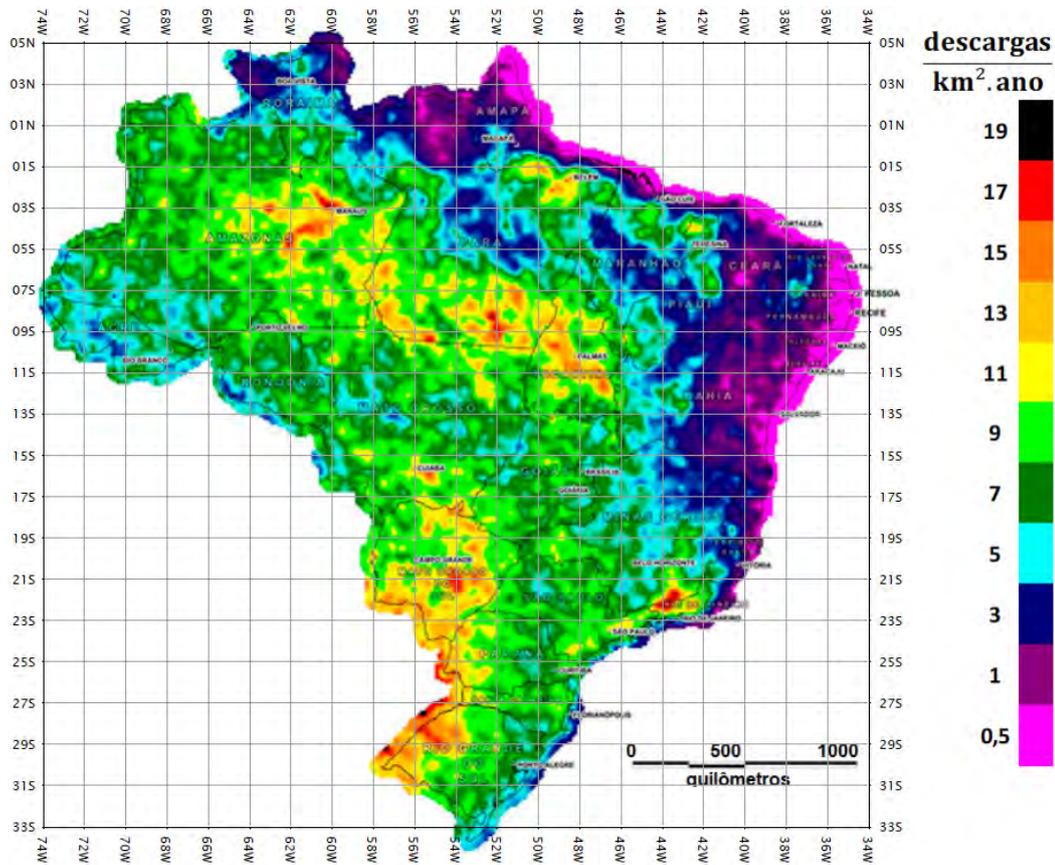
De acordo com a Norma Brasileira (NBR) 5419 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a densidade de descargas atmosféricas para a terra corresponde ao índice N_G , dado em número de descargas atmosféricas por km^2 por ano (ABNT, 2015). Atrelado à região escolhida, este índice é influenciado por fatores como latitude, condições de relevo, precipitação, entre outros, sendo recomendado períodos de observação superiores à 10 anos (VISACRO, 2005).

Dados provindos de satélites não diferenciam as descargas entre nuvens de descargas nuvem-solo, sendo necessário estimar um índice para traduzir estes dados em descargas nuvem-solo (VISACRO, 2005).

A par disso, Visacro (2005) sugere a preferência por dados provindos de redes de contadores de descargas, ou ainda, redes de detecção e localização de descargas, se disponível, pois estas apresentam maior confiabilidade de informações.

Registros de redes de detecção podem ser utilizados para melhor estimar o percentual de descargas nuvem-solo de determinada região e extrapolar esta estimativa para macrorregiões monitoradas apenas por satélites. Essa foi a abordagem utilizada na elaboração dos mapas de densidade de descargas atmosféricas, com período de observação de 1998 a 2011, presentes na NBR 5419 (ABNT, 2015), a qual estabelece os requisitos para proteção contra descargas atmosféricas. A Figura 9 ilustra o mapa de densidade de descargas atmosféricas do Brasil.

Figura 9 – Densidade de descargas atmosféricas no Brasil.



Fonte: adaptado de ABNT (2015).

2.3.2 Parâmetros de onda de corrente de descarga

A Figura 10 apresenta os principais parâmetros de onda de corrente de descargas atmosféricas, dentre os quais, destacam-se: amplitude (I), tempo de frente (T1), tempo de cauda (T2) e tempo total.

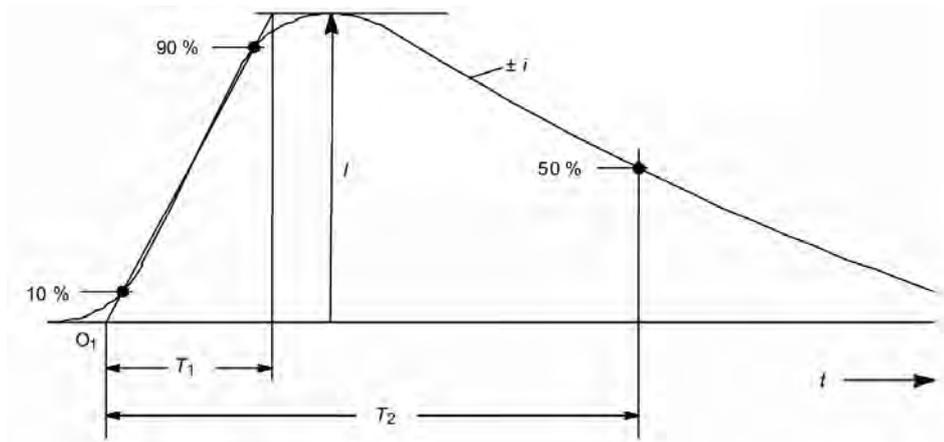
A amplitude, valor de pico, ou valor de crista da corrente de descarga corresponde ao maior valor atingido pela onda de corrente de descarga (ABNT, 2015; VISACRO, 2005).

O tempo de frente da onda de corrente de impulso pode ser definido como o produto entre um fator de 1,25 e o intervalo de tempo necessário para que a corrente atinja de 10 % a 90 % do seu valor máximo (ABNT, 2015; VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

O tempo de cauda, ou tempo de meia onda, corresponde ao intervalo de tempo entre o início da onda impulsiva de corrente até o instante, após a crista, no qual a corrente atinge metade do seu valor máximo (ABNT, 2015; VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Ademais, o tempo total de descarga, de modo autoexplicativo, corresponde ao intervalo de tempo entre o início da onda impulsiva de corrente, até o instante em que esta se anula (VISACRO, 2005).

Figura 10 – Parâmetros de tempo para onda de corrente de impulso.



Fonte: adaptado de ABNT (2015).

2.3.3 Formas de onda

É comum na literatura a subclassificação de descargas nuvem-solo em três tipos de descarga: positiva, negativa primeira ou negativa singular, e negativa subsequente. Este tratamento pode ser observado na NBR 5419 (ABNT, 2015).

A Tabela 1 retrata valores medianos dos parâmetros de descargas atmosféricas registrados na estação de San Salvatore. É possível observar como a amplitude mediana da corrente da descarga positiva (35 kA) é levemente superior ao valor correspondente da onda de descarga negativa primeira (30 kA), bem como ambos são superiores ao valor correspondente para a descarga negativa subsequente (12 kA).

Tabela 1 – Valores medianos (50 %) medidos na estação de San Salvatore.

	Descarga positiva	Descarga negativa primeira ou única	Descarga negativa subsequente
I_p [kA]	35	30	12
t_{frente} [μ s]	22	5,6	0,75
t_{cauda} [μ s]	230	75	32

Fonte: adaptado de Visacro (2005).

Ainda referente à Tabela 1, em termos de tempo de frente, a onda de descarga positiva tem um crescimento lento ($t_{frente} = 22 \mu\text{s}$) em relação à sua análoga negativa, de crescimento moderado ($t_{frente} = 5,6 \mu\text{s}$). A alta amplitude de corrente da descarga positiva, bem como seu tempo de cauda relativamente longo, configuram maiores parâmetros de energia dissipada e carga transferida, podendo resultar na instabilidade térmica de isoladores (VISACRO, 2005). Quanto à descarga negativa subsequente, seu rápido crescimento ($t_{frente} = 0,75 \mu\text{s}$) é justificado pela pré-ionização do ar em função da descarga antecedente (VISACRO, 2005).

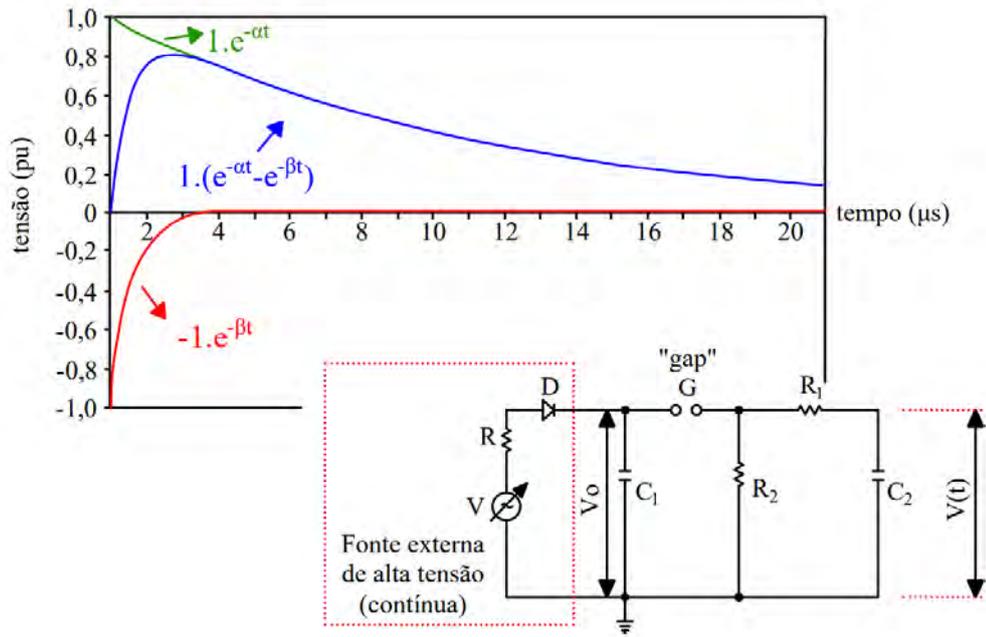
2.3.3.1 Curva dupla exponencial

A análise do comportamento de componentes elétricos frente à surtos atmosféricos requer a adoção de uma curva reproduzível cuja forma de onda seja suficientemente semelhante àquela gerada por uma descarga atmosférica.

A Figura 11 retrata uma onda de tensão denominada curva dupla exponencial, bem como o circuito associado à sua geração (VISACRO, 2005). Ainda referente à Figura 11, esta curva é composta de duas funções exponenciais de sinais opostos e os parâmetros α e β representam constantes de tempo de valores muito diferentes (VISACRO, 2005).

A curva dupla exponencial é utilizada em função de sua fácil reprodução em laboratório, além do conveniente ajuste de parâmetros de tempo através da alteração dos valores resistivos e indutivos (VISACRO, 2005).

Figura 11 – Curva dupla exponencial e seu circuito gerador.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

2.3.3.2 Função de Heidler

A equação (1), denominada Função de Heidler *et al.* (1999) é caracterizada por uma melhor representação, em relação à curva dupla exponencial, das curvas médias ou medianas das ondas de corrente de descargas atmosféricas reais (VISACRO, 2005). A título de ilustração, uma variante da Função de Heidler, com o parâmetro $n = 10$, foi utilizada para gerar os gráficos das formas de onda para impulsos positivos, negativos e subsequentes no Anexo B da NBR 5419 (ABNT, 2015).

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

$$\eta = e^{-\left[(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{1/(n+1)} \right]}$$

para as quais:

I_0 : amplitude da corrente na base do canal

τ_1 : constante relacionada ao tempo de frente da onda de corrente

τ_2 : constante relacionada ao tempo de cauda da onda de corrente

η : fator de correção da amplitude

n : fator de inclinação da corrente

Dado o exposto, os modelos de fonte supracitados não abrangem toda da caracterização da formação do complexo fenômeno de descargas atmosféricas. Entretanto, contemplam os principais parâmetros de interesse. Diante disso, maiores considerações referentes aos modelos de fonte utilizados neste TCC serão realizadas no capítulo 3.

2.4 Linhas aéreas

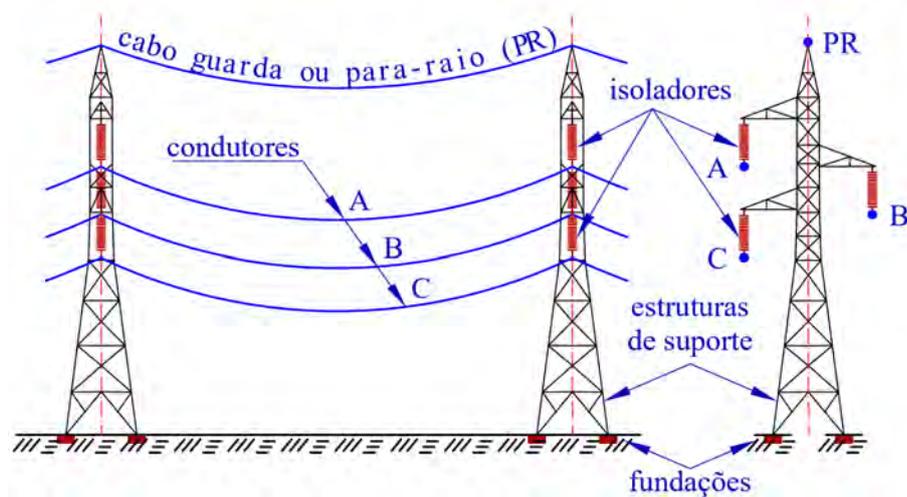
Com o propósito de interligar as usinas geradoras até os mais distantes centros de distribuição e por fim ao consumidor final, as linhas aéreas de transmissão de energia, cuja extensão do SIN supera os 145 000 km (ONS, 2020b), precisam atravessar diferentes regiões geográficas passando tanto por áreas rurais quanto urbanas.

2.4.1 Aspectos construtivos

Estruturas de concreto, metálicas com perfis de aço ou postes de aço podem ser utilizadas para construir uma LTs como LDs. A escolha depende de vários fatores, tais como espaçamento máximo e mínimo entre condutores, configuração dos isoladores, ângulo de proteção do cabo guarda, distâncias elétricas mínimas entre as partes energizadas e a torre, flecha dos condutores, número de circuitos e altura de segurança (ABNT, 1985).

Visando atender a todas as condições de segurança e eficiência no transporte de energia elétrica, uma linha aérea é composta por diversos elementos, conforme a Figura 12, os quais, de forma resumida, serão apresentados no decorrer desta seção.

Figura 12 – Principais componentes de uma linha aérea.



Fonte: adaptado de Labegalini *et al.* (1992).

As LTs apresentam grandes estruturas, cujas dimensões e formas dependem de múltiplos fatores, os quais influenciam diretamente seu desempenho elétrico e mecânico. De acordo com Fuchs (1977), as LTs podem ser categorizadas de diversas formas, destacando-se as seguintes classificações:

- Disposições dos condutores;
- Classificação das estruturas;
- Dimensões das estruturas.

2.4.1.1 Disposição dos condutores

Segundo Labegalini *et al.* (1992), nas linhas de transmissão de energia trifásicas, a disposição dos condutores é um fator importante na determinação das dimensões das estruturas e estes podem ser empregados em três arranjos básicos:

- Disposição horizontal:

Caracterizada pela disposição horizontal de seus condutores, conforme a Figura 13, esta disposição pode ser utilizada, de forma geral, em todos os níveis de tensão (LABEGALINI *et al.*, 1992). Todavia, esta disposição é amplamente utilizada em linhas de extra alta tensão em circuito simples (FUCHS, 1977).

Para efeitos de comparação com outras disposições, considerando um mesmo tipo de condutor e extensão de vão³, sua principal vantagem reside no fato da estrutura apresentar uma menor altura, porém, exige uma base mais larga (FUCHS, 1977; LABEGALINI *et al.*, 1992).

Figura 13 – Disposição horizontal em uma linha de transmissão de alta tensão.



Fonte: (HJT, 2020).

- Disposição vertical:

De acordo com Labegalini *et al.* (1992), este arranjo caracteriza-se pela disposição vertical dos condutores, podendo ser composta por circuito simples ou circuito duplo. Em razão de sua faixa de servidão reduzida, essa disposição é amplamente utilizada em vias públicas urbanas (FUCHS, 1977; LABEGALINI *et al.*, 1992). Esta disposição é ilustrada na Figura 14.

³Segundo a ABNT (1992), vão pode se referir tanto à distância horizontal quanto ao trecho de uma linha aérea entre dois suportes consecutivos.

Figura 14 – Disposição vertical dos condutores em uma linha de distribuição.



Fonte: autoria própria (2021).

- Disposição triangular:

Segundo Labegalini *et al.* (1992), este tipo de arranjo apresenta uma altura intermediária e pode ser utilizado em todas as faixas de tensão. Quanto à disposição dos condutores, são posicionados de acordo com os vértices de um triângulo equilátero, denominada disposição triangular simétrica, ou outro triângulo qualquer, conhecida por disposição triangular assimétrica (FUCHS, 1977). A Figura 15 exemplifica a utilização das disposições triangulares assimétrica (a) e simétrica (b).

Figura 15 – Disposição triangular de condutores.



Fonte: adaptado de Earth (2020).

2.4.1.2 Classificação das estruturas

As estruturas de suporte, geralmente de concreto ou compostas por perfis de aço, devem resistir às solicitações mecânicas associadas ao peso dos cabos suspensos e demais componentes, sob diferentes condições climatológicas (LABEGALINI *et al.*, 1992). De acordo com Fuchs (1977), as forças atuantes podem ser classificadas em forças verticais ou forças horizontais.

As forças verticais advêm principalmente do peso dos componentes de uma linha de transmissão, destacando-se entre eles os cabos condutores, dispositivos para-raios, isoladores, ferragens, acessórios e componentes de suporte (FUCHS, 1977; LABEGALINI *et al.*, 1992).

Ainda segundo Fuchs (1977), as forças horizontais apresentam-se em diferentes direções devido a diversas causas, sendo classificadas em transversais ou longitudinais.

As solicitações associadas às forças horizontais transversais advêm principalmente das trações dos cabos e eventuais solicitações horizontais introduzidas pelo estaiamento, bem como da ação do vento sobre o suporte na direção normal da linha, os cabos e seus respectivos acessórios de fixação (FUCHS, 1977; LABEGALINI *et al.*, 1992).

Os esforços relacionados às forças horizontais longitudinais resultam principalmente da pressão exercida pelo vento na estrutura e das forças axiais de tração (cabos suspensos), as

quais são variáveis de acordo com a temperatura (FUCHS, 1977; LABEGALINI *et al.*, 1992). De acordo com Labegalini *et al.* (1992), as estruturas ainda podem ser classificadas de acordo com os esforços supracitados, sendo elas:

- Estruturas de suspensão:

Segundo Labegalini *et al.* (1992), este tipo de estrutura tem como função sustentar os cabos condutores e cabos guarda, mantendo-os afastados do solo e entre si. São dimensionadas para resistir aos esforços verticais devido ao vento e ao peso dos cabos, dos isoladores e suas ferragens (FUCHS, 1977).

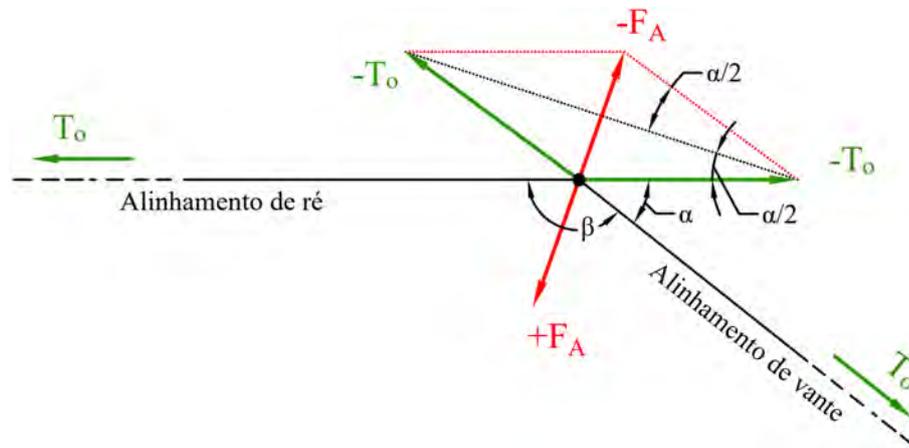
- Estruturas de ancoragem:

Quando utilizadas no início ou no final da linha, são chamadas de estruturas de ancoragem total, responsáveis por resistir à todas as cargas normais e excepcionais (FUCHS, 1977). Por sua vez, quando utilizadas em pontos intermediários da linha são chamadas de estruturas de ancoragem parcial, menos reforçadas que estruturas de ancoragem total (LABEGALINI *et al.*, 1992; FUCHS, 1977).

- Estruturas em ângulo:

Eventualmente, no transporte da energia elétrica, torna-se necessário uma mudança de direção para contornar eventuais obstáculos, sejam eles naturais ou construídos pelo homem. A fim de atender essa necessidade, é comum o emprego da estrutura em ângulo. Segundo Labegalini *et al.* (1992), essa estrutura deve suportar esforços adicionais, causados por uma força horizontal F_A dirigida para o seu interior cuja direção é ao longo da bissetriz do ângulo β , conforme a Figura 16, para a qual T_o representa a componente horizontal da tração nos cabos e α é o ângulo de deflexão da linha no vértice considerado. A Figura 17 representa um exemplo de estrutura em ângulo.

Figura 16 – Esquemático de forças atuantes em uma estrutura em ângulo.



Fonte: adaptado de Labegalini *et al.* (1992).

Figura 17 – Estrutura em ângulo.

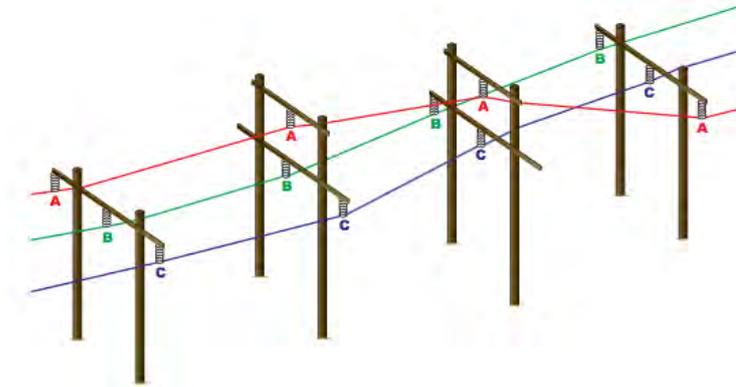


Fonte: autoria própria (2021).

- Estrutura de transposição:

Com o objetivo de alcançar o equilíbrio eletromagnético das linhas, garantindo assim a igualdade das quedas de tensão nas três fases, a estrutura de transposição de fases pode ser aplicada em qualquer tipo de arranjo. Segundo Labegalini *et al.* (1992), recomenda-se pelo menos uma rotação completa no trecho de uma linha, exigindo-se, portanto, estruturas específicas para isso.

Figura 18 – Esquemático de estruturas de transposição de fases.



Fonte: (REVIEWS, 2016).

Além das estruturas supracitadas, segundo Labegalini *et al.* (1992), é possível classificá-las, ainda, de acordo com a sua forma de resistir aos esforços solicitados. Anteriormente, foi visto como as estruturas de uma linha de transmissão sofrem três solicitações diferentes: axial vertical, horizontal transversal e horizontal longitudinal. Logo, devido ao seu aspecto construtivo e sua altura, o comportamento da estrutura em decorrência dos esforços horizontais a qual está sujeita, propicia o surgimento de um elevado momento. A partir desta informação, é possível classificar as estruturas quanto a forma de resistir, em dois grupos:

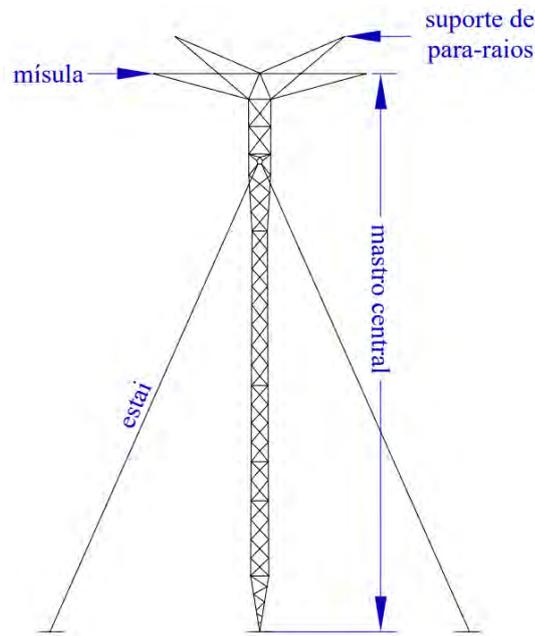
- Estrutura autoportante:

Ilustrada pela Figura 13, nestas estruturas os esforços são transmitidos diretamente para as fundações, promovendo momentos fletores junto à linha do solo mais elevados (LABEGALINI *et al.*, 1992).

- Estrutura estaiada:

São estruturas flexíveis ou mistas enrijecidas por estais. Uma parcela dos esforços horizontais é parcialmente absorvida pelos estais e transmitida diretamente ao solo pelas âncoras, sendo a outra parcela dos esforços, transmitida axialmente pelas estruturas (LABEGALINI *et al.*, 1992). Esta estrutura é ilustrada na Figura 19.

Figura 19 – Representação de estrutura estaiada.



Fonte: adaptado de Menezes (2015).

2.4.1.3 Dimensões das estruturas

Quando se trata do projeto de uma LT não basta se preocupar apenas com os esforços mecânicos solicitados pela estrutura, também é necessário garantir níveis mínimos de segurança a sua volta e limitar perturbações em instalações próximas. De acordo com a NBR 5422 - Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica (ABNT, 1985), para projetos de linhas cujo valor eficaz fase-fase esteja acima de 138 kV e não superior a 800 kV, os principais parâmetros e diretrizes a serem considerados para se determinar a dimensão de uma LT são: tensão nominal da linha, sobretensões previstas, tipo do solo e aterramento, velocidade do vento do projeto, vão de vento e de peso de um suporte, obtenção dos dados de temperatura (máxima e mínima do local), flecha máxima dos condutores, suportes e fundações, forma de sustentação dos condutores, distâncias de segurança dos condutores, travessias, faixas de segurança, limpeza de faixa, entre outros.

2.4.2 Cabos condutores

Responsáveis pelo transporte de energia elétrica, os cabos condutores são considerados elementos ativos das LTs e possuem grandes implicações econômicas, cujo valor pode

representar entre 21 % e 39 % do valor total de uma LT dependendo da configuração adotada (FUCHS, 1977; SAAVEDRA; FRONTIN, 2010). Para atender as melhores condições econômicas, mecânicas e elétricas, espera-se que os cabos condutores atendam a uma série de características. De acordo com Labegalini *et al.* (1992), estas são:

1. Alta condutibilidade elétrica, portanto, uma baixa resistividade a fim de garantir perdas por efeito Joule dentro de limites toleráveis;
2. Baixo custo do material, sempre visando o melhor custo-benefício;
3. Baixo peso específico, pois como visto anteriormente, as estruturas de suporte são dimensionadas a fim de resistir a todos os esforços mecânicos transmitidos pelos condutores. A utilização de materiais de baixo peso específico, possibilita a utilização de estruturas menos reforçadas quando comparadas a estruturas cujo cabo condutor possui um alto peso específico;
4. Alta resistência a oxidação e a corrosão por agentes químicos poluentes, cujo objetivo é garantir a integridade física da instalação, buscando evitar a redução na seção transversal dos cabos.

De acordo com Sadiku e Alexander (2008), para materiais isotrópicos homogêneos de seção uniforme, a resistência à passagem de corrente contínua em um condutor é determinada pela equação (2).

$$R = \frac{\rho \ell}{A} \quad (2)$$

para a qual:

R : resistência elétrica do condutor

ρ : resistividade elétrica do material

ℓ : comprimento do condutor

A : área da seção transversal do condutor

É importante enfatizar que o termo resistência é uma propriedade física de um dispositivo e o termo resistividade é uma propriedade física do material (HALLIDAY *et al.*,

2012). A resistividade elétrica do condutor metálico é influenciada pelo grau de impureza, deformação plástica e temperatura (CALLISTER JÚNIOR, 1999).

Segundo Halliday *et al.* (2012), assim como a grande maioria das grandezas físicas, a resistividade do material varia de forma quase linear para uma ampla faixa de temperaturas e pode ser calculada conforme a equação (3).

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha(T - T_0) \quad (3)$$

para a qual:

ρ_0 : resistividade elétrica na temperatura de referência

α : coeficiente de temperatura de referência

T : temperatura do material

T_0 : temperatura de referência

Partindo da equação (3), considerando um condutor de comprimento ℓ e área de secção transversal A constantes, multiplica-se ambos os lados da equação pela relação ℓ/A , conforme equação (4). Em seguida, substitui-se os termos para a obtenção da variável resistência elétrica R , de acordo com a equação (5). Por fim, é apresentada a equação (6) em função de R_{op} :

$$(\rho - \rho_0) \frac{\ell}{A} = [\rho_0 \alpha(T - T_0)] \frac{\ell}{A} \quad (4)$$

$$(R_{op} - R_0) = R_0 \alpha(T - T_0) \quad (5)$$

$$R_{op} = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (6)$$

para as quais:

R_{op} : resistência elétrica de operação

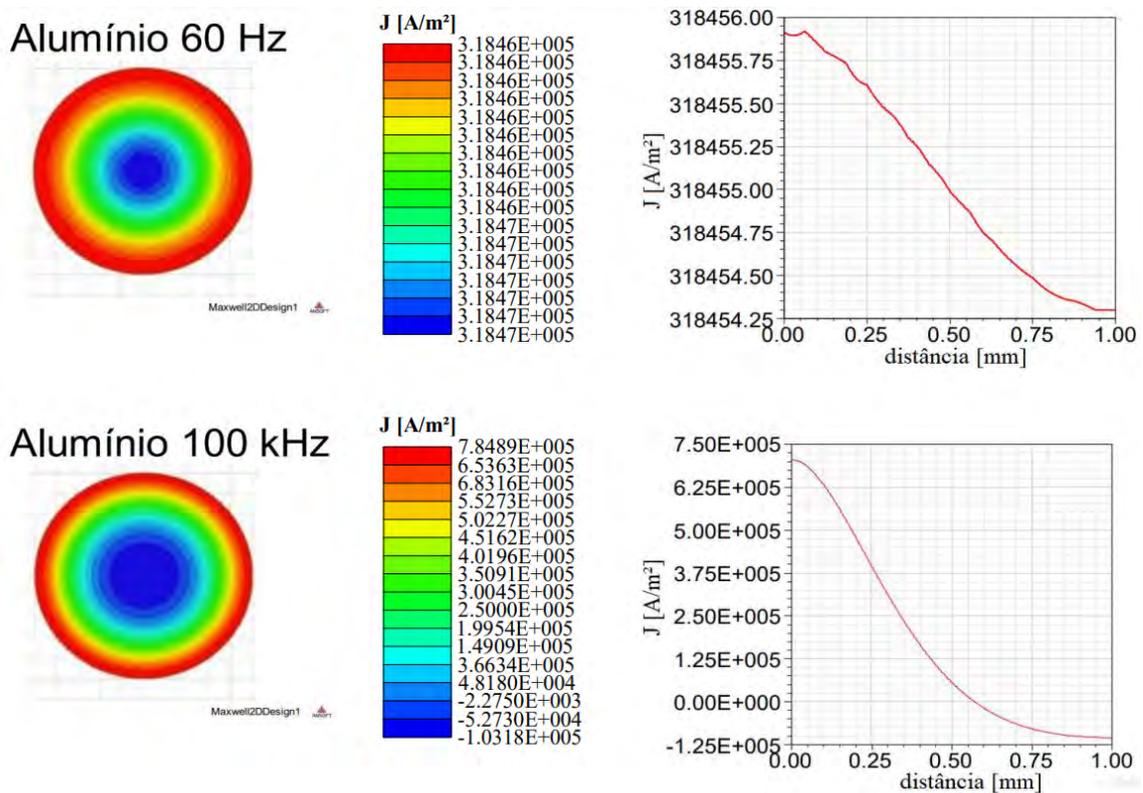
R_0 : resistência elétrica na temperatura de referência

Além das características supracitadas, quando percorrido por uma corrente alternada os cabos condutores apresentam o chamado efeito pelicular, um fenômeno físico, dependente

da frequência, campo elétrico e resistividade do material, no qual a distribuição da corrente elétrica não ocorre de forma uniforme, concentrando-se mais intensamente próximo a superfície (ROBERT, 2000). Ainda segundo Robert (2000), devido ao efeito pelicular, a resistência efetiva em corrente alternada supera o valor da resistência em corrente contínua e, conseqüentemente, devido a este aumento, haverá uma maior perda por efeito Joule.

A fim de ilustrar este fenômeno, mas sem se aprofundar no tema, a Figura 20 ilustra cabos sob correntes elétricas de frequências 60 Hz e 100 kHz. Nesta figura, é possível perceber como a densidade de corrente elétrica tende a ser mais intensa na periferia do condutor e que o fenômeno se torna mais acentuado, à medida em que a frequência aumenta.

Figura 20 – Simulações da densidade de corrente em um condutor.



Fonte: adaptado de Chaves e Chagas (2020).

É importante salientar que Chaves e Chagas (2020) optaram por realizar a simulação através do *software* Maxwell, utilizando uma solução em elementos finitos, no qual, foram considerados condutores de cobre e alumínio, os quais possuem um raio de 0,1 cm e uma corrente de 1 A, portanto, não retratando a situação específica de um cabo condutor de uma LT. Impende observar como esta situação objetiva-se apenas a demonstrar o efeito pelicular, que em diferente grau, ainda sim, estará presente em uma LT.

Além da resistividade do material e do efeito pelicular, também se destaca o efeito corona. Retratado na Figura 21 através de uma câmera ultravioleta, o termo efeito corona é utilizado em LTs para se referir a descargas parciais que ocorrem em torno dos condutores e isoladores quando o gradiente de potencial existente na região supera o valor do gradiente crítico disruptivo do ar. Devido às descargas do efeito corona, o ar próximo do condutor e do isolador é ionizado, gerando gás ozônio, substância que pode causar fissura ou a erosão em isoladores poliméricos (BEZERRA *et al.*, 2012).

Outrossim, este fenômeno é responsável por perdas de energia elétrica, rádio interferência e ruídos audíveis (COSTA *et al.*, 2011). Normalmente, este fenômeno não ocorre em sistemas cuja tensão é inferior a 200 kV, entretanto, é possível observá-lo nestes sistemas quando os condutores são atingidos por descargas atmosféricas (COELHO, 2010).

Figura 21 – Efeito corona em cadeia de isoladores.



Fonte: (CIGRE, 2008).

Por derradeiro, os cabos condutores possuem grandes implicações econômicas em uma linha de transmissão e, portanto, devem ser dimensionados de tal maneira a garantir o melhor desempenho elétrico, minorando as perdas; mecânico, garantindo a integridade mecânica dos cabos e da linha; financeiro, buscando sempre o equilíbrio entre o custo-benefício (FUCHS, 1977; LABEGALINI *et al.*, 1992; SAAVEDRA; FRONTIN, 2010).

2.4.2.1 Cabos guarda

A fim de proteger os cabos condutores de descargas diretas e garantir a continuidade do serviço, as LTs responsáveis por alimentar grandes blocos de carga, ou situadas em regiões

de altos índices de densidade de descargas atmosféricas, utilizam um ou dois cabos guarda, a depender da configuração da linha (VISACRO, 2005).

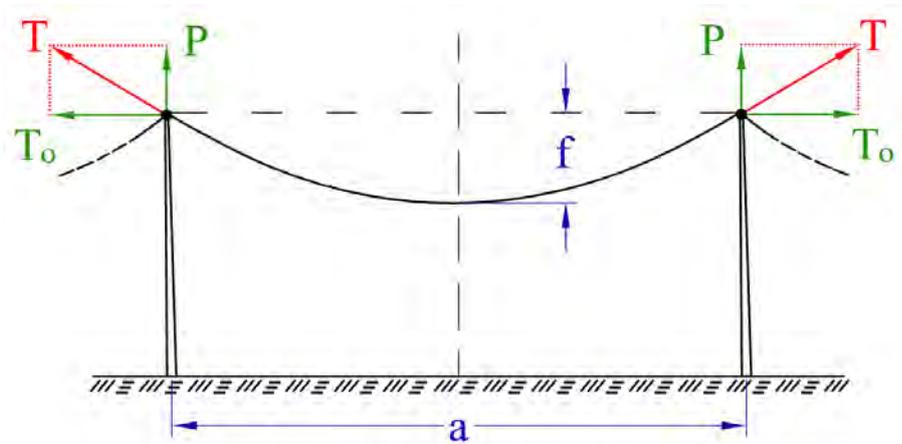
Sua principal função é proteger os cabos condutores de descargas atmosféricas, oferecendo um caminho alternativo para a corrente, reduzindo assim, as possibilidades de interrupções no fornecimento de energia (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Embora sua principal utilidade seja a proteção da linha contra descargas atmosféricas, os cabos guarda podem possuir funções acessórias. Devido a imunidade da fibra óptica a campos magnéticos, os cabos OPGW (*Optical Power Ground Wire*) apresentam uma alta capacidade de transmissão de dados (ALMEIDA *et al.*, 2010). Ainda devido às suas características construtivas, os cabos OPGW apresentam uma alta condutibilidade elétrica e uma elevada resistência mecânica, viabilizando a sua utilização em linhas aéreas. Segundo Pereira e Zanetta Júnior (2006), em curto-circuito envolvendo a terra com rompimento do dielétrico da cadeia de isoladores, estes cabos e a estrutura, quando metálica, são os responsáveis por escoar a corrente de falta para a terra.

2.4.2.2 Flecha

A flecha é uma das distâncias mais notáveis em projetos mecânicos de linhas aéreas. A Figura 22 retrata o diagrama de forças para um vão cujas estruturas de suporte encontram-se na mesma altura, no qual a flecha é representada pela letra f e pode ser definida como a maior distância vertical entre um segmento de reta que conecta os pontos de apoio do cabo e a curva delimitada pelo condutor. Segundo Labegalini *et al.* (1992), a tração T da Figura 22 corresponde à força axial do condutor e pode ser representada através de sua componente horizontal T_o e de uma força vertical P de módulo equivalente ao peso do condutor até a metade do vão a .

Figura 22 – diagrama de forças para vãos nivelados.



Fonte: adaptado de Labegalini *et al.* (1992).

Isso posto, de acordo com Labegalini *et al.* (1992), para vãos nivelados a flecha de um condutor pode ser calculada através da equação (7), considerando a curva descrita pelo condutor como uma catenária ou, ainda, mediante equação (8) ao aproximar esta curva por uma parábola, com erros insignificantes para problemas práticos.

$$f = \frac{T_0}{p} \cosh \left(\frac{p \cdot a}{2 \cdot T_0} - 1 \right) \quad (7)$$

$$f = \frac{p \cdot a^2}{8 \cdot T_0} \quad (8)$$

para as quais:

f : flecha de um condutor

p : peso do condutor por unidade de comprimento

a : vão

T_0 : tração horizontal

2.4.2.3 Modelo eletrogeométrico

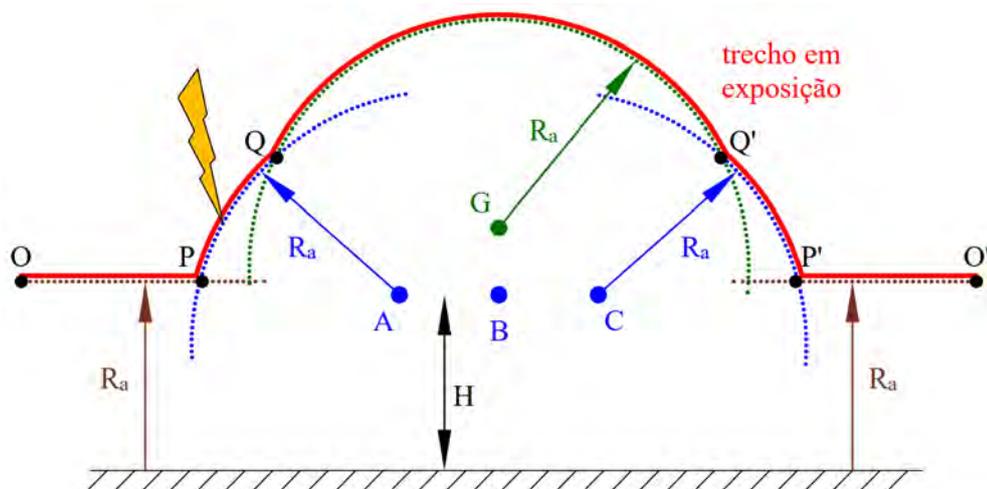
Em função da natureza aleatória das descargas atmosféricas, existem modelos de incidência que visam definir o local de maior probabilidade de incidência de descarga

atmosférica. Dentre eles, destaca-se o Modelo Eletrogeométrico (EGM), que foi amplamente utilizado ao longo dos anos, entregando resultados satisfatórios na maioria dos casos (VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Sua formulação se baseia no chamado raio de atração, de acordo com Visacro (2005, p. 219): “o raio de atração é a distância estimada entre um canal descendente e a estrutura terrestre a partir do qual ocorrerá eventual fechamento do percurso pela conexão entre o canal descendente e o canal ascendente que se origina na estrutura terrestre”.

Conforme a Figura 23, a altura dos cabos fase é representada pela letra H e as letras A, B, C e G representam, respectivamente, os cabos de fase e o cabo guarda, os quais possuem um raio de atração R_a . As curvas PQ e P'Q' representam os trechos de falha de blindagem, nos quais as descargas atmosféricas podem incidir diretamente nos cabos fase (VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Figura 23 – Modelo eletrogeométrico e raio de atração.



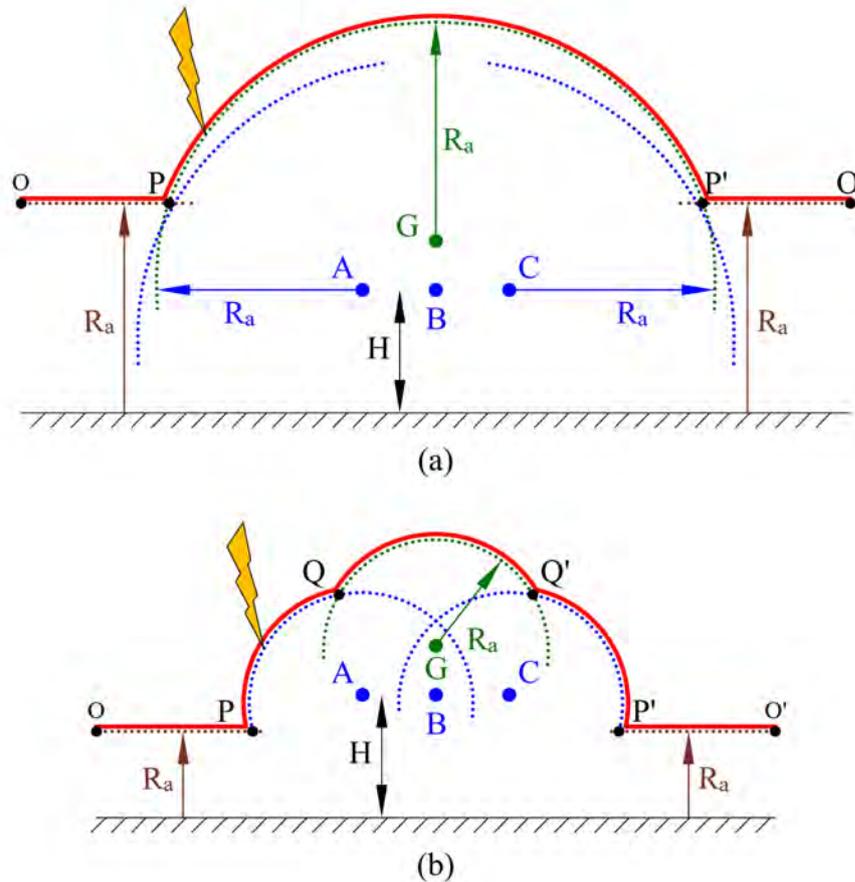
Fonte: adaptado de Visacro (2005).

A par disso, percebe-se que a envoltória de proteção do cabo guarda na Figura 23 não abrange todos os cabos fase. Na literatura, existem diversas formas para se calcular o raio de atração, contudo, em todas elas, este parâmetro depende da intensidade da corrente de pico da descarga atmosférica (VISACRO, 2005).

Logo, conforme a Figura 24 (a), na medida em que o valor da corrente de pico aumenta, a envoltória do cabo guarda passa a abranger todas as demais, garantindo a blindagem dos cabos de fase. Ao contrário disso, a medida que o valor da corrente de pico diminui, essas envoltórias tendem a apresentar uma redução de tamanho, podendo ocasionar a falha da

blindagem (VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003), conforme exposto na Figura 24 (b).

Figura 24 – Influência da corrente de pico da descarga no raio de atração do cabo guarda.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

2.4.3 Isoladores

Responsável pela sustentação mecânica dos cabos e pela isolamento elétrica, os isoladores são parte fundamental de uma LT. Quando dimensionados, necessitam atender a critérios mínimos para satisfazer as necessidades mecânicas e elétricas do sistema. Estes critérios são definidos pelas normas brasileiras, dentre as quais, destacam-se:

- NBR 5032 - Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1.000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada (ABNT, 2014b);
- NBR 7109 - Isolador de disco de porcelana ou vidro - Dimensões e características (ABNT, 2009a);

- NBR 7110 - Isolador de pino de porcelana ou vidro - Padronização de dimensões e características (ABNT, 1998b);
- NBR 10510 - Isolador-bastão de porcelana - Padronização de dimensões e características (ABNT, 1998a);
- NBR 15232: Isolador composto tipo pilar para linhas aéreas de corrente alternada, com tensões acima de 1 000 V - Definições, métodos de ensaio e critério de aceitação (ABNT, 2013a);
- NBR 15643 - Isoladores poliméricos para uso interno e externo, com tensão nominal superior a 1000 V - Ensaio de projeto (ABNT, 2018).

A par disso, a depender das características a serem atendidas, diferentes tipos e modelos de isoladores podem ser utilizados.

2.4.3.1 Materiais

Segundo Labegalini *et al.* (1992), quanto ao material, os isoladores podem ser de:

- Porcelana vitrificada:

Exemplificado na Figura 25, os isoladores de porcelana vitrificada devem apresentar uma composição homogênea e compacta, livre de trincas, rebarbas, bolhas de ar ou inclusões de materiais estranhos que possam comprometer sua rigidez dielétrica, bem como, devem ser recobertos com por uma camada de esmalte liso vitrificado (ABNT, 2014b).

De acordo com Rosa Junior (2010), isoladores de porcelana vitrificada se destacam por sua alta resistência mecânica, boa resistência dielétrica, desempenho conhecido, boa intercambialidade e durabilidade. Entretanto, deixam a desejar devido ao seu peso, sua suscetibilidade ao vandalismo e a dificuldade em identificar possíveis trincas (ROSA JUNIOR, 2010).

Ademais, com o surgimento de novas tecnologias, os fabricantes de isoladores cerâmicos têm enfrentado algumas complicações, dentre elas destacam-se a dificuldade em obter matérias primas adequadas para o processo de fabricação, redução do tempo de fabricação e a necessidade em reduzir o preço do produto para se manter no mercado (ROSA JUNIOR, 2010).

Figura 25 – Exemplo de isolador de porcelana.



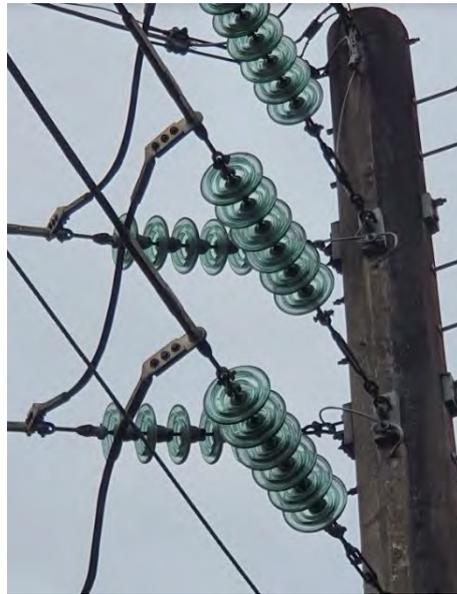
Fonte: adaptado de Germer. (2021).

- Vidro temperado:

Em sua fabricação, os isoladores de vidro temperado passam pelo processo de têmpera. Este visa o aumento de sua rigidez mecânica, contudo, quando danificado, o isolador de vidro temperado tende a estilhaçar (LABEGALINI *et al.*, 1992). Suas principais vantagens advêm principalmente do seu longo histórico de uso e seu conhecido desempenho em LT, bem como sua intercambialidade e defeitos facilmente perceptíveis. Além disso, apresentam características dielétricas superiores às da porcelana vitrificada (MARAN, 2010).

Entretanto, destacam-se negativamente pelo seu peso, sua suscetibilidade ao vandalismo e pela percepção quanto à sua fragilidade. Mesmo com o advento tecnológico de novos materiais, dadas as suas vantagens, os isoladores vítreos continuam a ser os mais utilizados em LT de alta tensão no Brasil (MARAN, 2010). O isolador de vidro temperado é ilustrado pela Figura 26.

Figura 26 – Exemplo de isolador de vidro temperado.



Fonte: autoria própria (2021).

- **Materiais sintéticos:**

Os isoladores de materiais sintético, exemplificados na Figura 27, também conhecidos por isoladores poliméricos, são dimensionados para resistir a elevados esforços mecânicos e elétricos (DEUTSCH, 2016). Estes isoladores apresentam um núcleo de fibra de vidro ou carbono em forma de haste ou bastão e, assim como as aletas, este núcleo é comumente reforçado por um polímero do tipo epóxi, poliéster ou vinil (DEUTSCH, 2016).

Convém destacar que devido a utilização de material polimérico, quando comparado a isoladores de diferentes materiais e de mesmo nível de tensão, apresentam menor fragilidade e peso reduzido (BONOMO, 2003). Entretanto, quando danificados, suas trincas são de difícil visualização, por vezes, sendo necessário o emprego de técnicas mais avançadas como tomografia digital, radiografia digital e raios x (PROTZEK, 2010). Ademais, são mais sensíveis a umidade, e quando utilizados em ambientes externos necessitam de proteção contra raios ultravioleta e intempéries, pois, esses dois agentes são prejudiciais aos polímeros, reduzindo de forma significativa sua vida útil (BONOMO, 2003).

Ademais, algumas pesquisas apontam uma forte correlação entre o envelhecimento do material polimérico e a intensificação do efeito corona no isolador (BEZERRA *et al.*, 2012).

Figura 27 – Exemplo de isolador polimérico.



Fonte: (SIKLOWATT, 2015).

2.4.3.2 Tipos de isoladores

Conforme visto neste trabalho, os níveis de tensão de operação das LDs podem ser separados em três intervalos: baixa tensão, média tensão e alta tensão. Decorrente dos efeitos eletromagnéticos, para cada nível supracitado, diferentes estruturas, materiais, cabos condutores, cabos guarda e equipamentos de proteção devem ser utilizados. Portanto, para cada faixa de tensão, tipos distintos de isoladores são empregados. Segundo Mamede Filho (2013), em LTs, destacam-se os seguintes tipos:

- Isolador tipo roldana:

Retratado através da Figura 28, os isoladores tipo roldana são amplamente utilizados em redes secundárias de distribuição urbana e rural, cuja tensão pode ser de 220 V ou 380 V. Estes isoladores podem ser encontrados tanto em porcelana como em vidro temperado (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 28 – Isoladores tipo roldana instalados em poste.



Fonte: autoria própria (2021).

- Isolador tipo pino:

De acordo com Mamede Filho (2013), este tipo de isolador é amplamente utilizado em redes de distribuição rural e urbana de até 38 kV, os isoladores tipo pino podem ser utilizados, embora com menor frequência, em linhas de até 72 kV.

Quanto a sua construção, segundo Mamede Filho (2013), estes isoladores podem ser classificados em monocorpo e multicorpo. O primeiro, é constituído de uma única peça e costuma ser fabricado até uma tensão nominal de 25 kV, enquanto o isolador multicorpo, caracteriza-se pela união de duas ou mais peças, rigidamente unidas através do uso de cimento, podendo alcançar uma tensão de até 72 kV (MAMEDE FILHO, 2013).

A Figura 29, representa um exemplo do emprego de isoladores monocorpos do tipo pino em porcelana.

Figura 29 – Isoladores monocorpos do tipo pino instalados em poste.



Fonte: autoria própria (2021).

- Isolador tipo pilar:

Por apresentar corpos maciços, os isoladores tipo pilar constituem alternativa aos isoladores do tipo pino devido a sua constituição, núcleo de fibra de vidro encapsulado por material polimérico, que lhe garante baixos níveis de rádio interferência, restrição a entrada de umidade e outras partículas, além da excelente resistência mecânica que se traduz em redução de custo que envolve transporte, lavagem e armazenamento (JS Isoladores, 2021).

Figura 30 – Isoladores do tipo pilar.



Fonte: adaptado de Germer. (2021).

- Isolador tipo suspensão:

De acordo com Fuchs (1977), empregam-se dois tipos de isoladores de suspensão: os isoladores de disco e os isoladores monocorpo ou barra longa. Representados pela Figura 31, os isoladores de disco podem ser utilizados em qualquer nível de tensão, pois dependem apenas do número de isoladores instalados em série para atender os requisitos de isolamento

da linha (FUCHS, 1977).

Em LTs, costumam ser empregados em estruturas de ancoragem e estruturas de alinhamento tipo suspensão. Este isolador normalmente é fabricado em porcelana ou vidro temperado, materiais que possibilitam sua utilização em ambientes normais e de elevada poluição. Entretanto, quando utilizados em meios de maior poluição, são desenhados de tal maneira a dificultar a penetração e deposição de sólidos (MAMEDE FILHO, 2013).

A despeito dos isoladores de suspensão barra longa, Labegalini *et al.* (1992) destaca que estes são fabricados em porcelana, vidro ou material polimérico. Seu comprimento e o número de aletas dependem do nível desejado de isolamento, sendo possível utilizar duas ou mais peças conectadas em série (LABEGALINI *et al.*, 1992).

Figura 31 – Exemplo de isolador de suspensão.



Fonte: (PXFUEL, 2021).

2.4.4 Sobretensão em linhas de transmissão

Oriunda dos transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos, as sobretensões são classificadas como tensões variáveis no tempo cujo valor de crista supera o valor da tensão máxima do sistema quando em operação normal (MAMEDE FILHO, 2013). De acordo com Labegalini *et al.* (1992), as sobretensões em LTs podem ser de origem interna ou externa e podem ser classificadas como:

- Sobretensões temporárias:

Caracterizadas por uma onda de tensão oscilatória, com valor de crista superior ao da operação normal e longa duração, as sobretensões temporárias decorrem principalmente de defeitos monopolares, perda de carga por abertura de disjuntores, fenômeno ferro ressonante e

efeito ferranti (MAMEDE FILHO, 2013).

- Sobretensões de manobra:

Mais severas que as sobretensões de natureza temporária, as sobretensões de manobra, também chamadas de sobretensões de chaveamento, possuem origem interna e podem ser motivadas pela energização de uma linha de transmissão, de um banco de capacitores, de um transformador, religamento de uma linha de transmissão, interrupção de um circuito, entre outras (GIAROLA, 2016). Quando comparadas às sobretensões temporárias, apresentam picos de tensão superiores e tempos de duração ainda menores, da ordem de centenas de microssegundos (LABEGALINI *et al.*, 1992).

- Sobretensões impulsiva:

De origem externa, a sobretensão impulsiva, também chamada de sobretensão atmosférica, envolve as fases do sistema ou apenas uma das fases e a terra (MAMEDE FILHO, 2013). Quando comparada às demais causas, apresenta o maior valor de sobretensão em um menor intervalo de tempo, da ordem de apenas algumas dezenas de microssegundos (LABEGALINI *et al.*, 1992). Conforme será visto na seção 2.6, as sobretensões impulsivas podem ser classificadas em função do local de incidência na linha.

2.5 Aterramento

A primeira função do sistema de aterramento é a segurança e visa garantir a integridade de usuários, animais e profissionais que necessitam manipular equipamentos e estruturas que usufruem da energia elétrica ou que tenham sido afetadas por algum tipo de distúrbio (VISACRO, 2002). A segunda função é a proteção dos equipamentos e tem por objetivo garantir o correto funcionamento destes frente a descargas elétricas e, conseqüentemente, sobretensões ou picos de energia que poderiam causar avarias, queimaduras e até mesmo a passagem indevida de corrente elétrica através dos corpos que estão em contato com o equipamento ou estrutura (VISACRO, 2002). No Brasil, as normas que regem os aterramentos são:

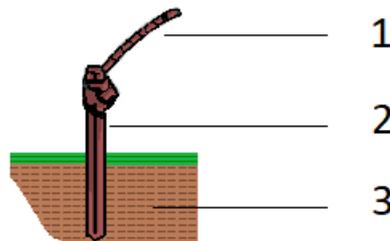
- NBR 7117: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos (ABNT, 2020);
- NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento (ABNT, 2009b);
- NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos (ABNT, 2013b);

- NBR 16527: Aterramento para sistemas de distribuição (ABNT, 2016);
- NBR 16254: Materiais para sistemas de aterramento (ABNT, 2014a).

O conceito de aterramento está diretamente associado aos termos “Aterramento de Sistema” e “Sistema de Aterramento”. De acordo com Visacro (2002), o primeiro termo corresponde à forma com que o sistema é conectado ao solo e pode ser um sistema isolado, solidamente aterrado ou, ainda, aterrado por impedância. Por sua vez, “um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo” (VISACRO, 2002, p. 11). A Figura 32 ilustra os componentes de um sistema de aterramento e, segundo Visacro (2002), são:

1. conexões elétricas, responsáveis pela conexão entre a carcaça ou a estrutura até o eletrodo de aterramento;
2. eletrodos de aterramento, corpos metálicos enterrados no solo, desde hastes até cabos, os quais podem assumir diversas configurações conforme a necessidade do projeto;
3. solo que envolve o eletrodo de aterramento.

Figura 32 – Componentes do sistema de aterramento.



Fonte: adaptado de Visacro (2002).

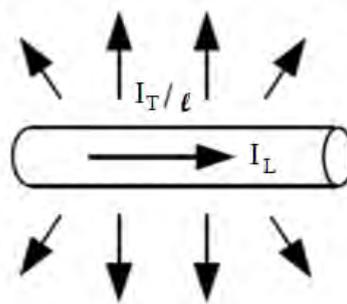
Um dos fatores a ser considerado no projeto de um sistema de aterramento elétrico é o seu comportamento frente a frequência (VISACRO, 2002). Dentre as principais solicitações, destacam-se as correntes de curto-circuito, normatizadas em 60 Hz, bem como os efeitos associados a transitórios eletromagnéticos (VISACRO, 2002).

2.5.1 Representação do sistema de aterramento

O sistema de aterramento pode ser representado através de resistências, capacitâncias e indutâncias e segundo (VISACRO, 2002), cada qual influi na capacidade de condução de corrente para a terra. Desta associação de elementos, surge o conceito de impedância de aterramento, a qual retrata a oposição oferecida pelo solo à injeção de corrente elétrica (VISACRO, 2002).

Isso posto, de acordo com Alípio (2013), o comportamento eletromagnético do conjunto de eletrodos que formam a malha de aterramento pode ser representado de forma simplificada pela corrente longitudinal I_L e pela densidade linear de corrente transversal I_T/ℓ , conforme a Figura 33.

Figura 33 – Fontes de corrente associadas a cada elemento do sistema de aterramento.



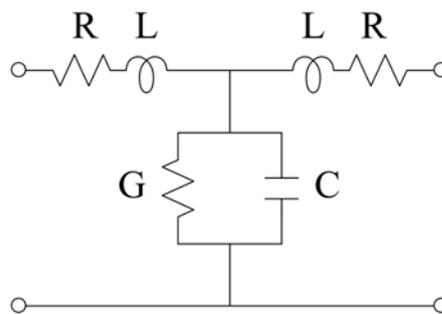
Fonte: adaptado de Miranda (2019).

As correntes longitudinais I_L estão associadas às perdas internas do próprio condutor e ao efeito do campo magnético, interno e externo, gerado devido à passagem de corrente elétrica, a qual é parcialmente transferida para o comprimento de todo o eletrodo de aterramento (ALÍPIO, 2008). Do ponto de vista de circuitos elétricos, este comportamento pode ser representado por uma resistência e uma indutância em série (VISACRO, 2002).

Dado o campo magnético gerado, surge um campo elétrico de natureza não-conservativa que é responsável pela determinação do fluxo de corrente elétrica de características capacitivas e indutivas no meio, neste caso, o solo (SEGANTINI, 2018). Este campo é o responsável por gerar uma elevação de potencial em relação ao infinito em pontos genéricos no meio em que o elemento se encontra e aos demais elementos do eletrodo de aterramento (MIRANDA, 2019). Este comportamento é representado pela densidade linear de corrente transversal I_T/ℓ , a qual é parcialmente dispersada do eletrodo de aterramento para o solo (VISACRO, 2002).

Convém ressaltar que a relação entre as correntes longitudinais e transversais não depende da geometria dos eletrodos que formam o aterramento elétrico, mas sim, da relação $\sigma/(\omega\epsilon)$, para a qual σ representa a condutividade elétrica e ϵ representa a permissividade elétrica (ALÍPIO, 2008; VISACRO, 2002). Isso posto, de forma análoga às correntes longitudinais, as correntes transversais podem ser representadas por uma condutância e uma capacitância em paralelo ao circuito equivalente (VISACRO, 2002), representado pela Figura 34.

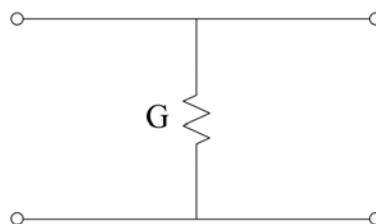
Figura 34 – Circuito equivalente do aterramento em alta frequência.



Fonte: adaptado de Visacro (2002).

Para condições de baixa frequência, o circuito apresentado na Figura 34 pode ser simplificado, pois as parcelas de reatâncias longitudinais e a susceptância transversal podem ser desprezadas (VISACRO, 2002). Outrossim, decorrente da elevada condutividade do eletrodo e da ausência do efeito pelicular, as resistências longitudinais também podem ser desconsideradas (VISACRO, 2002). Portanto, o circuito equivalente representado pela Figura 34, passa a ser representado apenas por um conjunto de condutâncias conectadas em paralelo, conforme explicitado na Figura 35.

Figura 35 – Circuito equivalente do aterramento em baixa frequência.



Fonte: adaptado de Visacro (2002).

A partir desta perspectiva, a solução deste conjunto de condutâncias equivale à

resistência de aterramento R_{AT} , a qual possui uma relação diretamente proporcional à resistividade do solo ρ e à uma constante de proporcionalidade K que depende da dimensão e forma dos eletrodos (VISACRO, 2002; COELHO; RAIZER, 2021), conforme a equação (9).

$$R_{AT} = K\rho \quad (9)$$

para a qual:

R_{AT} : resistência de aterramento

K : constante de proporcionalidade dependente da topologia do sistema de aterramento

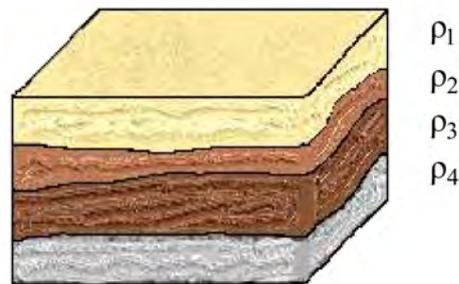
ρ : resistividade do solo

2.5.2 Resistividade do solo

A depender da região, os solos podem adquirir valores de resistividade muito elevados e, conseqüentemente, resistências de aterramento com valores igualmente elevados (VISACRO, 2002). Nestas situações, ressalta-se o fenômeno de reflexão de ondas a ser abordado na seção 2.6. Diante do exposto, o comportamento da resistividade elétrica do solo é influenciado por diversos fatores, dos quais, destacam-se:

- Tipo de solo:

Cada camada do solo costuma apresentar valores distintos de resistividade e espessura, conforme a Figura 36 (VISACRO, 2002). O tipo de solo varia de acordo com a região e geralmente apresentam pedregulhos, cascalhos e uma mistura — em diferentes proporções — de três sedimentos: argila, limo e areia (ABNT, 2020). Reproduzida na Tabela 2, estão alguns valores de resistividade dos materiais que podem fazer parte desta composição:

Figura 36 – Estratificação do solo.

Fonte: adaptado de ABNT (2020).

Tabela 2 – Faixas de resistividade típicas de materiais que compõem o solo.

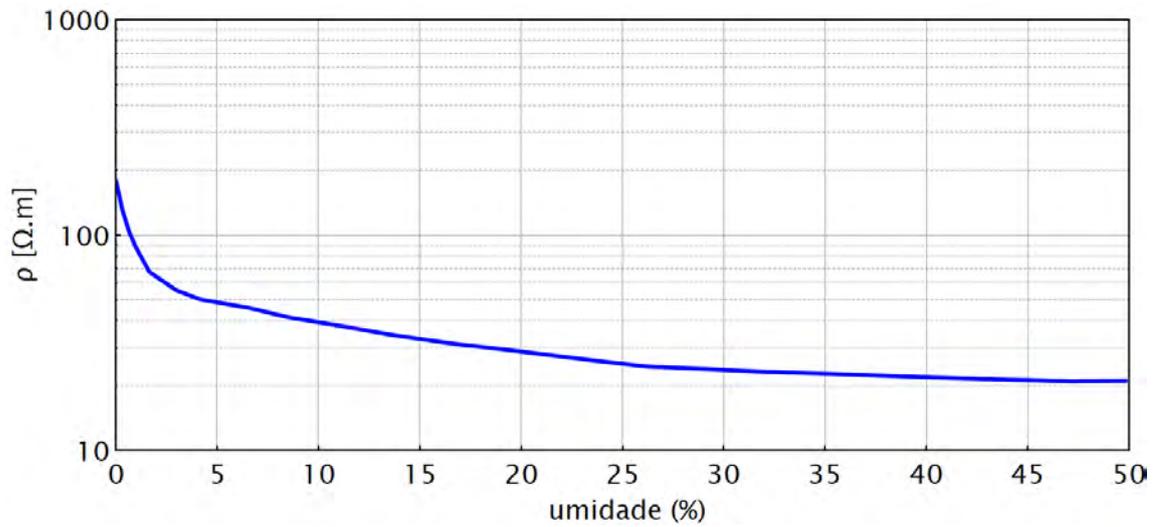
Meio físico	Faixa de resistividade do solo ($\Omega.m$)
Água do Mar	$\sim 0,3$
Água do rio	~ 30
Água destilada	300
Alagadiço, limo, húmus, lama	<150
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000
Areia	1 000 – 8 000
Granito e basalto fraturados	500 – 10 000
Granito e basalto íntegros	$>10\ 000$

Fonte: adaptado de ABNT (2020).

- Índice de umidade do solo, concentração e tipos de sais dissolvidos na água:

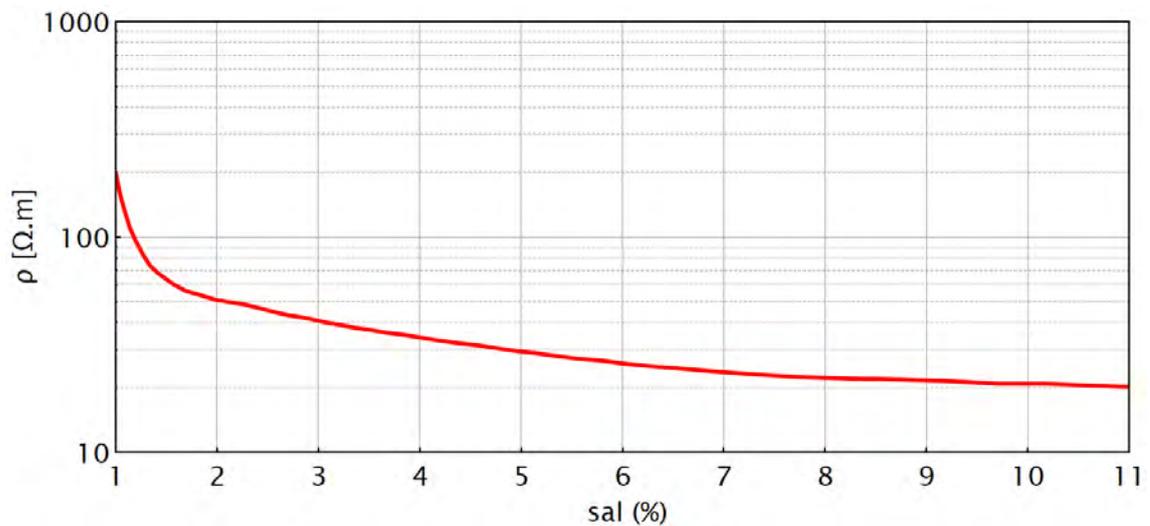
A condutividade elétrica do solo é influenciada pela sua umidade que em baixa frequência ocorre principalmente através de mecanismos eletrolíticos e, portanto, é essencial a presença de sais dissolvidos no solo (VISACRO, 2002). Por conseguinte, quanto maior for a umidade e a concentração de sais em um determinado solo, maior será sua condutividade e, conseqüentemente, menor será sua resistividade elétrica, conforme o exposto na Figura 37 e na Figura 38.

Figura 37 – Influência da umidade na resistividade do solo.



Fonte: adaptado de ABNT (2020).

Figura 38 – Influência da concentração de sais na resistividade do solo.



Fonte: adaptado de ABNT (2020).

- Compacidade do solo:

De acordo com Visacro (2002), quanto mais compacto for um solo, maior será sua continuidade física e, conseqüentemente, menor será sua resistividade.

- Granulometria do solo:

A presença de grãos de diversos tamanhos pode impactar a resistividade do solo ao

afetar diretamente na capacidade de retenção de água nas camadas do solo, bem como ao influenciar a continuidade física do solo (VISACRO, 2002). Portanto, quanto maior for a granulometria de um solo, maior será sua resistividade, pois este apresentará uma capacidade reduzida de retenção de água, deixando-a fluir para camadas mais profundas ou evaporar, além disso, quanto menor o contato entre grãos, menor será a sua continuidade elétrica (VISACRO, 2002).

- Temperatura do solo:

Conforme visto anteriormente, a umidade do solo associada à concentração de sais possui papel fundamental no comportamento frente a condutividade elétrica do solo. Também relacionada à umidade do solo, está a temperatura, pois a água, devido ao seu comportamento físico-químico, quando exposta a altas temperaturas tende a evaporar, diminuindo o índice de umidade e, conseqüentemente, sua condutividade (VISACRO, 2002). É conveniente destacar que este comportamento possui sua relevância aumentada em regiões tropicais, haja vista que estas regiões alcançam elevadas temperaturas e índices de insolação (VISACRO, 2002). Outrossim, é importante levar em conta que nem sempre esta análise pode ser feita de forma tão trivial, isto é, deve-se levar em conta a localização geológica deste fenômeno, se ele ocorre apenas nas camadas superficiais do solo e se este é homogêneo (VISACRO, 2002). Caso este comportamento esteja restrito apenas a camadas superficiais, a resistividade elétrica de camadas mais profundas se mantém reduzida (VISACRO, 2002). Também relacionado ao comportamento da água, o alto coeficiente negativo de temperatura torna razoável a suposição que à medida que a temperatura reduz, a resistividade da água tende a aumentar (VISACRO, 2002). Estes comportamentos estão representados de forma simplificada na Tabela 3.

Tabela 3 – Variação da resistividade com a temperatura para um solo arenoso.

Temperatura (°C)	Resistividade do solo ($\Omega.m$)
+ 20	72
+ 10	33
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
-15	3 300

Fonte: adaptado de Markovits e Leon (1977).

- Estrutura geológica do solo:

Decorrente da movimentação da crosta terrestre ao longo de milhares de anos, diferentes tipos de solo podem ser encontrados ao redor do mundo (VISACRO, 2002). Devido a esta movimentação, diversos tipos de materiais foram compactados em camadas, dando origem ao solo com características heterogêneas que conhecemos hoje (ABNT, 2020). Diante do exposto, é comum encontrar diferentes valores de resistividade em diferentes regiões do Brasil e do mundo. A Tabela 4 expressa valores típicos de resistividade de acordo com o período geológico.

Tabela 4 – Valores típicos de resistividade para diferentes períodos geológicos.

Período	Resistividade característica ($\Omega.m$)
Pré-Cambriano e combinações de Pré-Cambriano e Cambriano	1 000 a 10 000
Combinações de Cambriano e Ordoviciano	100 a 1 000
Ordoviciano, Devoniano e combinações destes	50 a 600
Carbonífero, Triássico e combinações do Carbonífero com períodos mais recentes	10 a 300
Cretáceo, Terciário, Quaternário e combinações destes períodos	2 a 30

Fonte: adaptado de Card (1935).

De uma forma geral, no Brasil, os valores de resistividade do solo tendem a apresentar valores elevados (VISACRO, 2002), conforme Tabela 5. Porém, não é incomum encontrar solos cuja resistividade possa ultrapassar o valor de 10 000 $\Omega.m$, chegando a valores de aproximadamente 60 000 $\Omega.m$ como é o caso das regiões de Mato Grosso e Rondônia (VISACRO *et al.*, 2019). A título de curiosidade, segundo Visacro (2002), países como França e Alemanha possuem um solo de resistividade média de 50 $\Omega.m$, que,

quando comparadas à resistividade média no Brasil torna evidente que as considerações para a elaboração de aterramentos devem respeitar as características locais, ou seja, não se recomenda metodologias utilizadas em países cuja resistividade do solo é diferente, pois irão carecer de precisão (VISACRO, 2002).

Tabela 5 – Valores típicos de resistividade para diferentes períodos geológicos.

Região	Valores típicos de resistividade do solo ($\Omega.m$)
Mato Grosso	500 – 2 000
Minas Gerais	2 450
Paraná	200 – 1 000
Pernambuco	100 – 2 000
São Paulo	700

Fonte: adaptado de Visacro (2002).

2.5.3 Impedância harmônica

No caso de descargas atmosféricas que incidem de forma direta ou indireta em LTs e LDs, a corrente impulsiva do fenômeno será direcionada do ponto de incidência até o eletrodo de aterramento⁴ através da própria estrutura quando metálica, ou dos cabos de descida quando postes de concreto (VISACRO, 2005; COELHO; RAIZER, 2021). Por ser um fenômeno de alta frequência, o comportamento do solo será mais complexo, apresentando, além das características condutivas, comportamentos capacitivos e indutivos (ALÍPIO, 2008).

Como dito nesta seção, os efeitos supracitados possuem grande influência no comportamento elétrico do solo, tornando imprescindível considerá-los quando analisados os efeitos fenômenos transitórios (ALÍPIO, 2008; VISACRO, 2002). Posto isso, a melhor forma de representar este comportamento é através da impedância harmônica $\bar{Z}(j\omega)$, dada pela equação (10).

$$\bar{Z}(j\omega) = \frac{\dot{V}(j\omega)}{\dot{I}(j\omega)} \quad (10)$$

para a qual:

⁴Os eletrodos de aterramento utilizados em LTs e LDs costumam ser hastes verticais em estruturas de concreto ou cabos horizontais, popularmente chamados de cabos contrapeso, em estruturas metálicas (COELHO; RAIZER, 2021)

$\bar{Z}(j\omega)$: impedância harmônica de aterramento

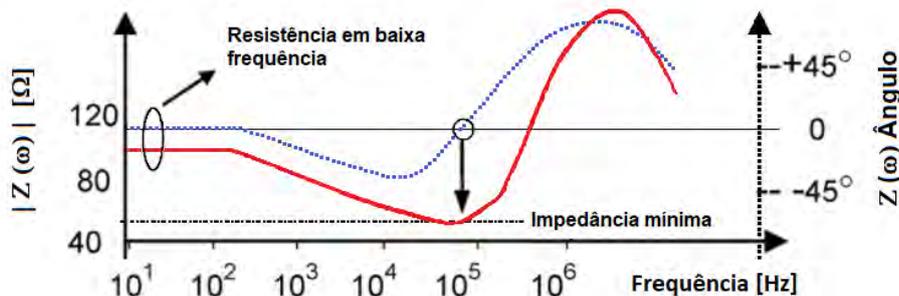
$\dot{V}(j\omega)$: fasor da elevação de potencial em relação ao infinito

$\dot{I}(j\omega)$: fasor da corrente injetada

Definida no domínio da frequência, a impedância harmônica possui certas características, dentre as quais, a corrente injetada não irá interferir no comportamento da impedância harmônica, caso o solo seja linear, ou seja, os efeitos não lineares tal como a ionização do solo são desconsiderados (ALÍPIO, 2008; AMARAL, 2017; MIRANDA, 2019). Ademais, o comportamento desta dependerá da geometria do aterramento, das características eletromagnéticas do meio em que se encontra e dos eletrodos de aterramento (BORGES, 2018; ALÍPIO, 2008).

A fim de ilustrar a dependência do solo em relação a frequência, a Figura 39 retrata o comportamento da impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 50 metros de extensão enterrado em um solo de resistividade 2500 $\Omega\cdot\text{m}$ (VISACRO, 2007). Conforme ilustrado, para baixas frequências, próximas à frequência industrial de operação do sistema elétrico (60 Hz), a impedância harmônica de aterramento tende a apresentar um ângulo (linha pontilhada azul) próximo de zero e, portanto, o seu comportamento pode ser aproximado ao de uma resistência. Porém, à medida que a frequência aumenta, atingindo os patamares de frequência de descargas atmosféricas — algumas dezenas de kHz até algumas centenas de kHz (COELHO; RAIZER, 2021) — observa-se um ângulo negativo, caracterizando um comportamento predominantemente capacitivo, ou seja, o módulo da impedância harmônica (linha vermelha) passa a apresentar uma redução quando comparada ao seu valor em baixa frequência.

Figura 39 – Comportamento da impedância harmônica em um solo de resistividade de 2500 $\Omega\cdot\text{m}$.

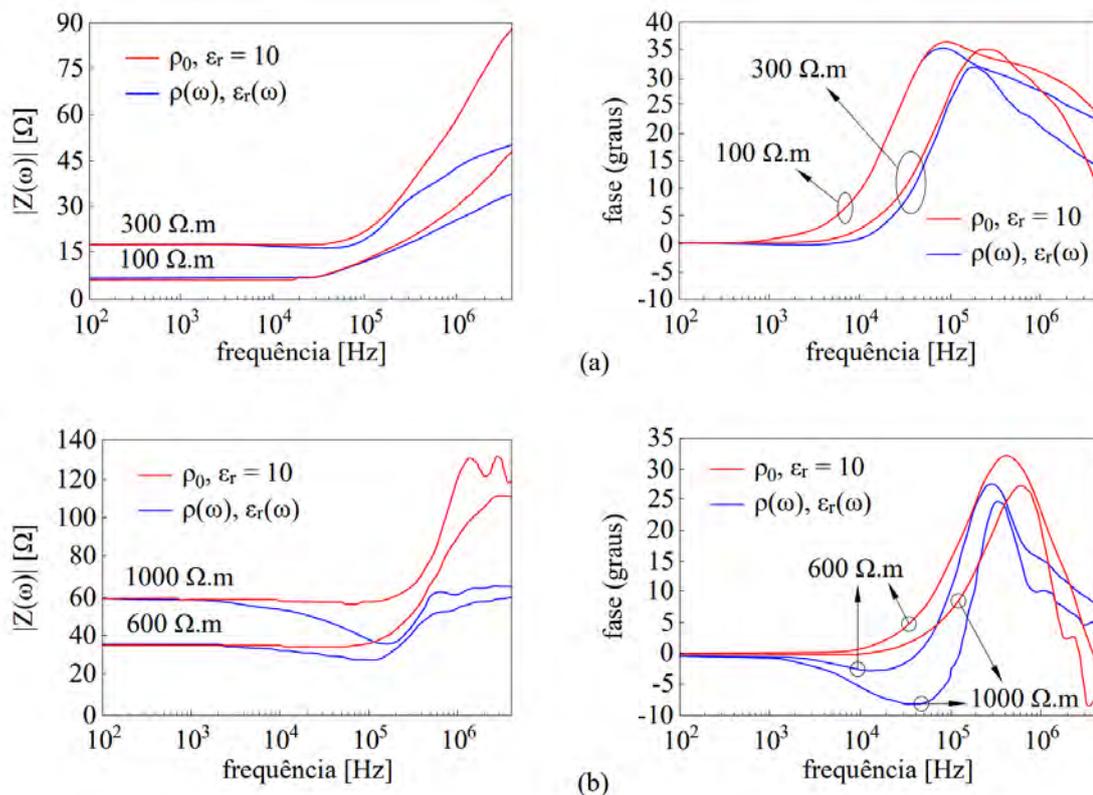


Fonte: adaptado de Visacro (2007).

Este comportamento característico torna-se mais acentuado quanto maior for a resistividade do solo, porém, quanto menor for a resistividade do solo, menor será esta redução, podendo inclusive, em alguns casos, apresentar uma tendência de aumento da impedância devido à um ângulo positivo, que caracteriza um comportamento indutivo. Estes comportamentos, aumento e redução da impedância harmônica, podem ser observados na Figura 40. Nestas simulações, Alípio (2013) considerou eletrodos de aterramento horizontais, com 30 m de comprimento e enterrados a 0,5 m de profundidade em solos de diferentes resistividades.

A Figura 40 representa o módulo e ângulo da impedância harmônica para a resistividade do solo de 100 $\Omega\cdot\text{m}$ e 300 $\Omega\cdot\text{m}$ (a) e 600 $\Omega\cdot\text{m}$ e 1000 $\Omega\cdot\text{m}$ (b). Ainda referente a Figura 40, as linhas vermelhas representam o cenário em que foram consideradas uma resistividade do solo em baixa frequência ρ_0 e uma permissividade elétrica relativa ϵ_r constante. Por sua vez, a linha azul representa o cenário dependente da frequência, em que os parâmetros $\rho(\omega)$ e $\epsilon_r(\omega)$ representam a resistividade e a permissividade relativa do solo, respectivamente.

Figura 40 – Comportamento da impedância harmônica em solos de resistividades de 100, 300, 600, 1000 $\Omega\cdot\text{m}$.



Fonte: adaptado de Alípio (2013).

2.5.4 Elevação de potencial no aterramento

De acordo com Borges (2018), a elevação do potencial no aterramento — em inglês, *Grounding Potential Rise* (GPR)— é de fundamental importância para se avaliar o comportamento transitório desenvolvido no aterramento, pois, através dele, é possível determinar as tensões máximas a que os dispositivos e o aterramento ficam submetidos. Representada pela equação 11, o GPR pode ser obtido através da transformada inversa do produto entre a impedância harmônica e a corrente injetada no aterramento (ALÍPIO, 2013).

$$GPR = \mathcal{F}^{-1} \{ \bar{Z}(j\omega) \dot{I}(j\omega) \} \quad (11)$$

para a qual:

\mathcal{F}^{-1} : transformada inversa de Fourier

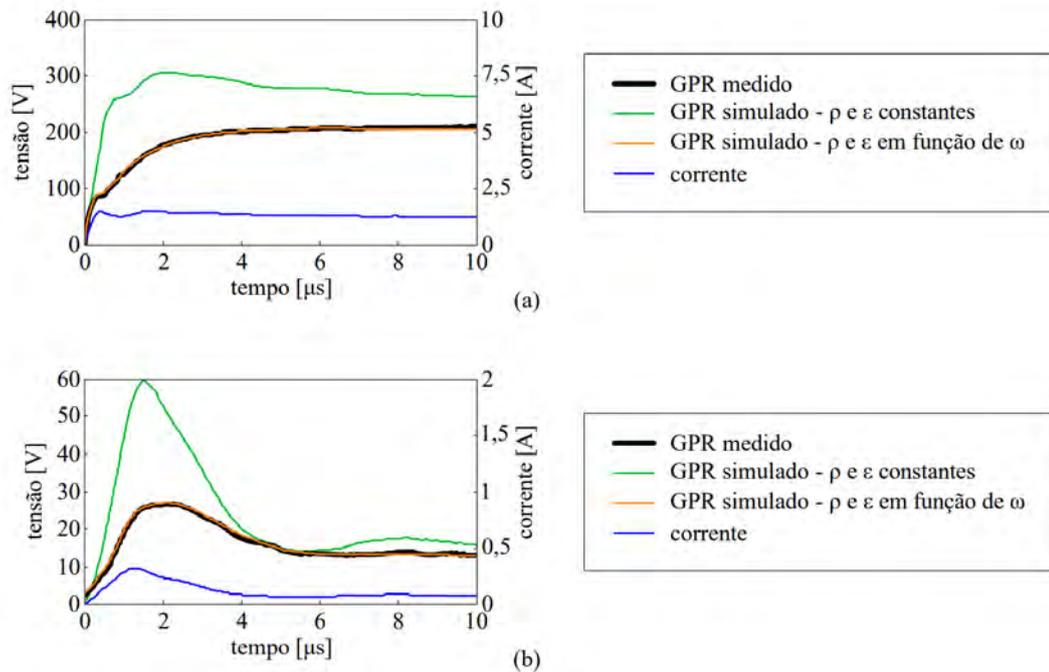
GPR : elevação de potencial no aterramento

$\bar{Z}(j\omega)$: impedância harmônica de aterramento

$\dot{I}(j\omega)$: fasor da corrente injetada no aterramento

A fim de avaliar a importância da dependência do solo frente a transitórios, Alípio (2013) realizou simulações considerando um eletrodo de aterramento de 9,6 m frente às correntes impulsivas. Assim, de acordo com Alípio (2013), a Figura 41 retrata o GPR medido pelos eletrodos de aterramento e comparado com duas hipóteses de simulação. As curvas representadas na cor preta retratam os valores medidos da elevação de potencial. Para as curvas representadas na cor verde, foram considerados os parâmetros elétricos do solo constantes, ou seja, resistividade igual ao valor medido em baixa frequência e uma permissividade relativa igual a 20. Por fim, para as curvas representadas na cor laranja, foram considerados parâmetros elétricos variáveis com a frequência. Ademais, em ambos os gráficos da Figura 41 estão representadas as ondas de corrente, sendo que na Figura 41 (a) foi utilizada uma onda de corrente com tempo de frente de 0,4 μs e na Figura 41 (b) um tempo de frente de 1,4 μs . Para estes cenários, assim como para àqueles mostrados na Figura 40, é possível afirmar que o comportamento do solo é dependente da frequência.

Figura 41 – Aumento do potencial elétrico do solo.

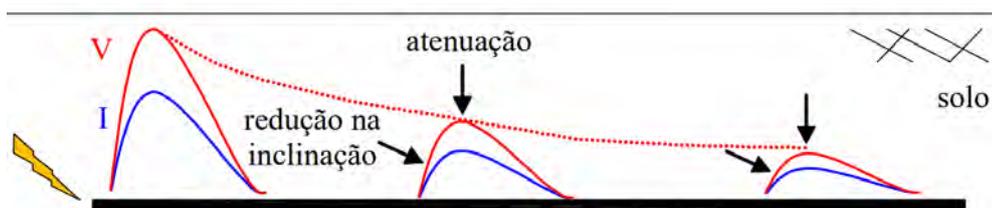


Fonte: adaptado de Alípio (2013).

2.5.5 Comprimento efetivo e impedância impulsiva

O comportamento do sistema de aterramento frente a descargas atmosféricas pode ser aproximado ao de uma linha de transmissão com perdas, imersa em um meio, no caso o solo (VISACRO, 2007). Representadas na Figura 42, a atenuação e a distorção ocorrem, respectivamente, devido às perdas para o solo e às diferentes velocidades de propagação de cada componente de frequência presente na onda impulsiva (AMARAL, 2017; SEGANTINI, 2018).

Figura 42 – Atenuação e distorção da corrente ao longo do eletrodo de aterramento.



Fonte: adaptado de Visacro (2007).

Estes comportamentos, atenuação e distorção, caracterizam uma propagação não uniforme, que implicam em uma menor corrente de dispersão ao longo do eletrodo (ALÍPIO, 2013; VISACRO, 2007). Isso posto, conclui-se que a partir de um dado comprimento — denominado comprimento efetivo — não será possível observar uma maior redução da impedância de aterramento frente a fenômenos de alta frequência, tornando-se, portanto, desnecessária a utilização de eletrodos de aterramento com comprimentos superiores (ALÍPIO, 2013; VISACRO, 2007).

Por sua vez, diferentemente da impedância harmônica que é representada no domínio da frequência, a impulsiva é representada no domínio do tempo, através do quociente do GPR pelo valor de pico da corrente injetada, conforme a equação (12) (ALÍPIO, 2013; VISACRO, 2007).

$$Z_P = \frac{V_P}{I_P} \quad (12)$$

para a qual:

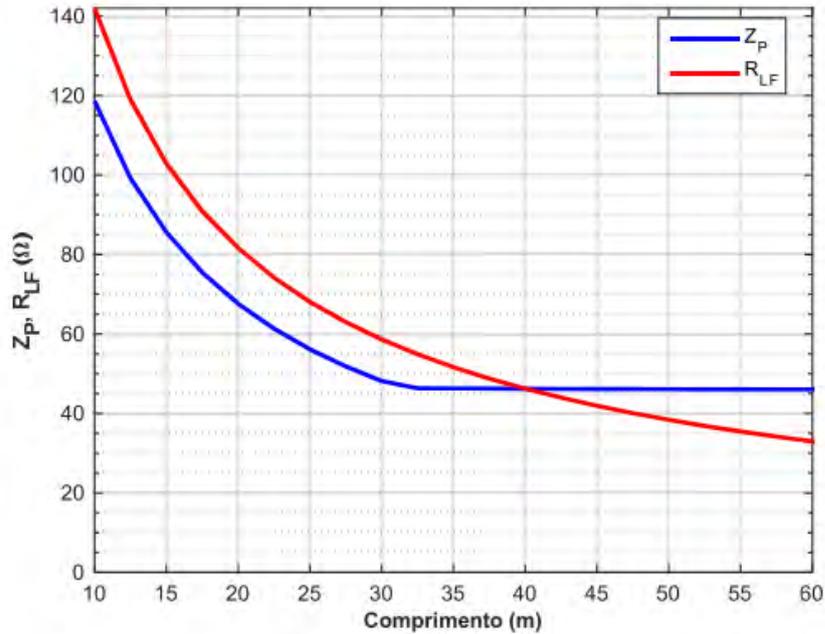
Z_P : impedância impulsiva

V_P : elevação de potencial no aterramento

I_P : valor de pico da corrente injetada

Ao analisar o comportamento da impedância impulsiva e da resistência em baixa frequência frente a variação de comprimento de um eletrodo de aterramento, percebe-se, de um modo geral, como o aumento do comprimento do eletrodo de aterramento está associado à uma redução no valor da impedância de impulso até um determinado ponto — comprimento efetivo — e a partir deste, a impedância tende a ficar constante (BORGES, 2018). Em contrapartida, quando analisada, a resistência em baixa frequência apresenta uma curva que tende a decrescer ao longo de todo o comprimento do eletrodo analisado. Ambos os comportamentos podem ser observados na Figura 43, a qual ilustra a impedância impulsiva e a resistência em baixa frequência de um eletrodo horizontal, enterrado em um solo de $1000 \Omega.m$, em função do seu comprimento (BORGES, 2018).

Figura 43 – Impedância impulsiva e resistência em baixa frequência x comprimento do eletrodo de aterramento.



Fonte: (BORGES, 2018).

De acordo com Alípio (2013), sob a hipótese de parâmetros dependentes da frequência, a impedância impulsiva sempre apresentará — até o comprimento efetivo — um menor valor quando comparada à resistência em baixa frequência. É importante ressaltar que este comportamento está relacionado a diminuição dos níveis de GPR e, portanto, quanto maior for a resistividade do solo, mais acentuada será esta redução (ALÍPIO, 2013).

Desta forma, diferentemente da impedância harmônica, representada no domínio da frequência, a impulsiva é representada no domínio do tempo e garante uma série de vantagens frente a sua análoga na frequência. Dentre estas, destaca-se um comportamento independente da geometria do aterramento e, especialmente, dependente da forma de onda do fenômeno, principalmente do seu tempo de frente (AMARAL, 2017; BORGES, 2018).

2.5.6 Coeficiente de impulso

Por fim, segundo Alípio e Visacro (2014), é possível relacionar o conceito da impedância impulsiva com a resistência em baixa frequência de acordo com a equação 13

$$I_C = \frac{Z_P}{R_{BF}} \quad (13)$$

para a qual:

I_C : coeficiente de impulso

Z_P : impedância impulsiva

R_{BF} : resistência do aterramento em baixa frequência

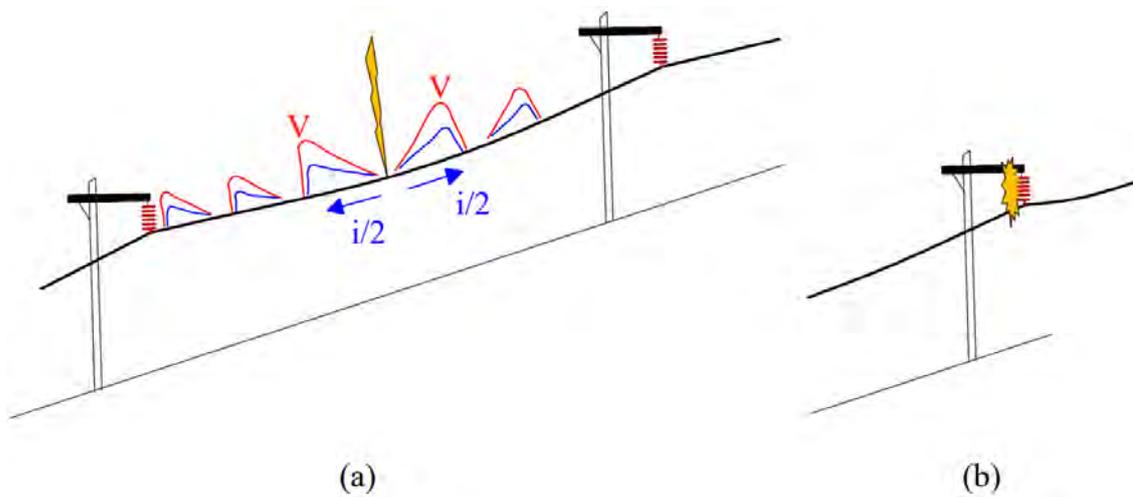
Por se tratar de um número real puro, a impedância impulsiva pode ser representada através de uma resistência em *softwares* de transitórios como o ATP/EMPT (BORGES, 2018). Diante das vantagens aqui expostas, optou-se pela utilização da impedância impulsiva para a representação da impedância de aterramento nas simulações a serem conduzidas neste TCC. A metodologia adotada será abordada no capítulo 3.

2.6 Descargas atmosféricas em linhas aéreas

2.6.1 Descarga direta

De acordo com Visacro (2005), a incidência de uma descarga atmosférica sobre um condutor de uma LT origina duas ondas de corrente, as quais se propagam em sentidos opostos. A amplitude destas ondas corresponde à aproximadamente metade do valor de pico da corrente da descarga e cada qual apresenta uma onda de tensão associada, conforme a Figura 44 (a).

Figura 44 – Representação da incidência de uma descarga direta em uma linha de transmissão.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

A impedância de onda da linha Z_ℓ é representada pela equação (14) (VISACRO, 2005). Conforme apontado por Zanetta Júnior (2003, p. 449): “As sobretensões atmosféricas contêm altas frequências, da ordem de centenas de kHz”. Desta forma, temos $j\omega L' \gg R$ e $j\omega C' \gg G$, resultando na aproximação dada pela impedância de surto da linha Z_S de acordo com a equação (15) (VISACRO, 2005).

$$Z_\ell = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (14)$$

$$Z_S = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (15)$$

para as quais:

Z_L : impedância de onda da linha

Z_S : impedância de surto da linha

ω : frequência angular

R' : resistência por unidade de comprimento

G' : condutância por unidade de comprimento

L' : indutância por unidade de comprimento

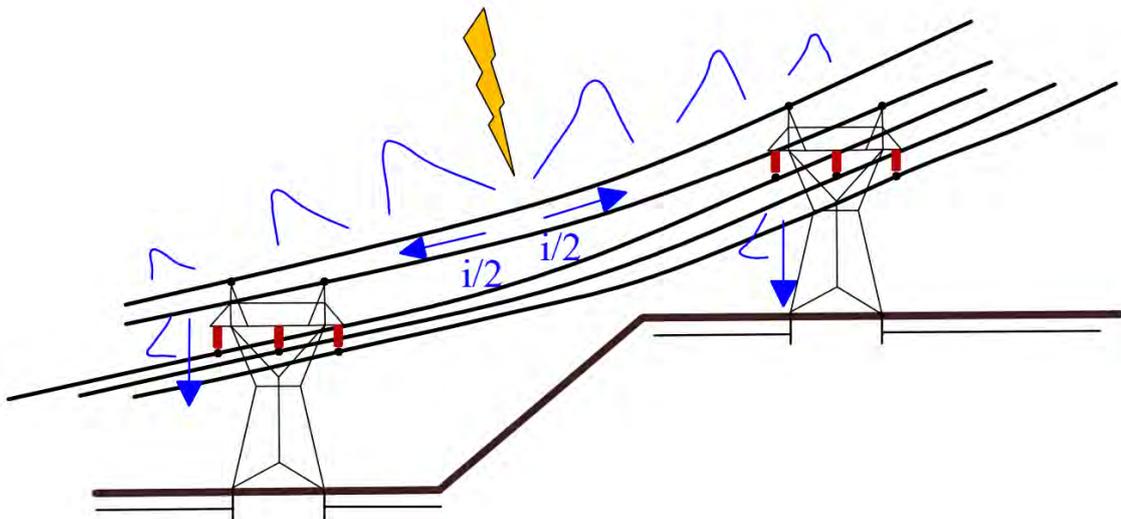
C' : capacitância por unidade de comprimento

A amplitude da onda de tensão pode ser aproximada por $V = Z_S (I_p/2)$, para a qual I_p corresponde ao valor de pico da descarga atmosférica. As ondas se propagam ao longo da linha até encontrar a cadeia de isoladores. Se a sobretensão for superior à suportabilidade da cadeia, pode se estabelecer um arco elétrico (*flashover*), entre o condutor atingido e à estrutura de suporte, conforme ilustrado pela Figura 44 (b) (VISACRO, 2005).

2.6.2 Descarga indireta

“As quedas indiretas ocorrem quando o raio atinge o cabo-guarda.” (ZANETTA JÚNIOR, 2003, p. 457). De forma semelhante à descarga direta, a incidência da descarga atmosférica no cabo guarda provoca a propagação, em sentidos opostos, de duas ondas de corrente pelo condutor, conforme a Figura 45.

Figura 45 – Representação da incidência de uma descarga indireta em uma linha de transmissão.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

A cada onda de corrente está associada uma onda de tensão e, diferentemente do caso da descarga direta, a propagação das ondas pelo condutor se dá até a estrutura de suporte e não até a cadeia de isoladores. Neste ponto, uma pequena componente das ondas segue pelo condutor, enquanto a maior parcela desce pela estrutura (VISACRO, 2005). O intervalo de tempo τ , despendido para a propagação da onda pela torre pode ser estimado pela

equação (16) (VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

$$\tau = \frac{h}{c} \quad (16)$$

para a qual:

τ : tempo de trânsito

h : altura da torre

c : velocidade da luz no vácuo

Na base da estrutura, há uma descontinuidade entre a impedância de surto da torre e a impedância de aterramento. Neste ponto, o coeficiente de reflexão, representado pela equação (17), determina a natureza da reflexão da onda de tensão (VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_t}{Z_a + Z_t} \quad (17)$$

para a qual:

Γ : coeficiente de reflexão

Z_a : impedância de aterramento

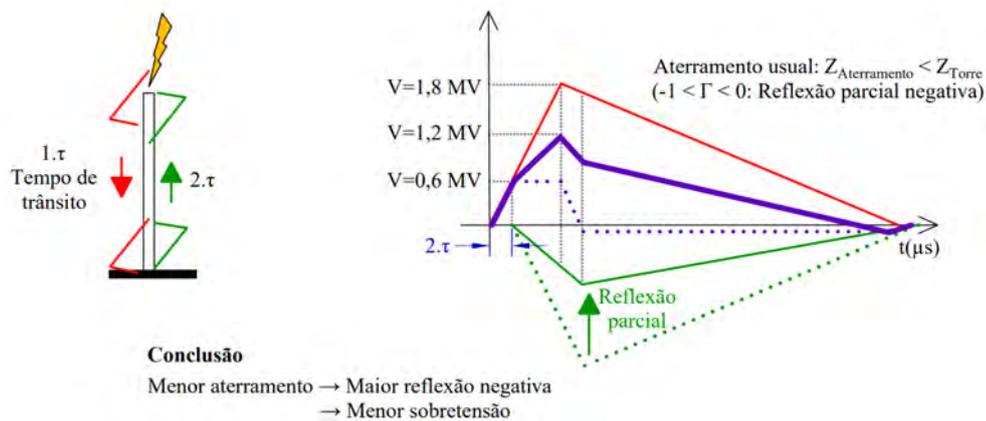
Z_t : impedância de surto da torre

Se $Z_a \neq Z_t$, haverá uma onda refletida no ponto de descontinuidade, cuja amplitude será dada pelo produto entre o coeficiente de reflexão e a amplitude da onda de tensão incidente. Esta onda refletida se propagará através da estrutura de suporte até seu topo, onde a tensão será resultado da interferência entre a onda original e a refletida, estas defasadas entre si em um intervalo de tempo 2τ (VISACRO, 2005). Esta defasagem se dá em função do tempo despendido ao propagar-se pela estrutura até o solo e novamente em direção ao topo da torre (VISACRO, 2005).

A Figura 46 retrata a tensão incidente em linha vermelha, as tensões refletidas em linha verde e as tensões resultantes no topo da estrutura em linha roxa. As linhas pontilhadas do gráfico da Figura 46 representam o cenário de aterramento ideal enquanto as linhas cheias representam o cenário de aterramento usual em que o valor da impedância de aterramento

é inferior à impedância de surto da torre. Dado o exposto, pode-se observar como nestas condições a componente refletida é responsável por amenizar a sobretensão no topo da torre (VISACRO, 2005).

Figura 46 – Tensão resultante no topo de estrutura de suporte.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

Conforme apontado por Visacro (2005), o aumento do tempo de trânsito pela torre, associado à uma estrutura de maior altura, retardaria esta amenização, configurando uma maior tensão resultante no topo da torre. De forma relacionada, um tempo de frente inferior permitiria um maior crescimento na sobretensão resultante no intervalo $[0, 2\tau]$, configurando um valor de tensão superior no topo da estrutura (VISACRO, 2005).

Ademais, assim como evidenciado na Figura 46, a redução do valor da impedância de aterramento, conforme a equação (17), ocasionaria uma reflexão negativa de maior amplitude absoluta e, portanto, uma menor sobretensão resultante no topo da torre (VISACRO, 2005).

De acordo com Visacro (2005), a amplitude da sobretensão no topo da torre, pode ser dada pela equação (18), a qual representa a interferência entre as componentes incidente (primeira parcela) e refletida (segunda parcela).

$$V_{\text{TOPO}} = Z_t I^+ + \Gamma Z_t I^+ \quad (18)$$

para a qual:

V_{TOPO} : sobretensão resultante no topo da torre

Z_t : impedância de surto da torre

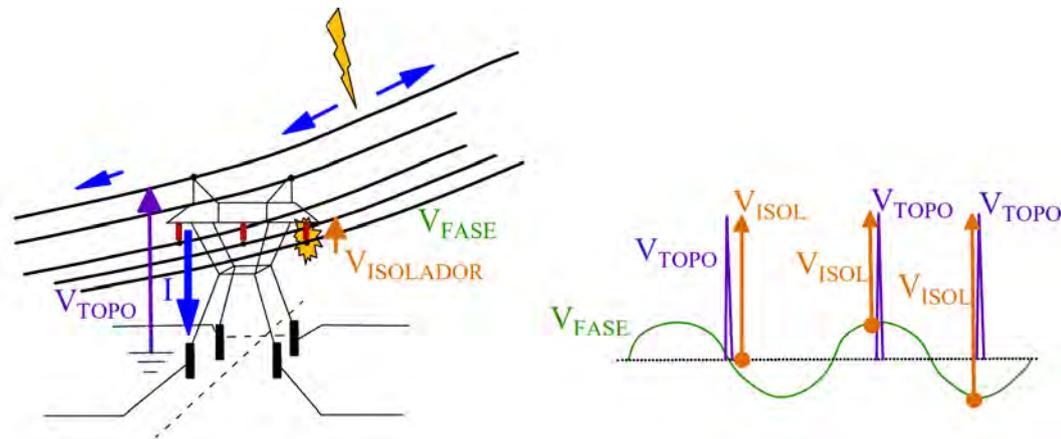
I^+ : amplitude da onda de corrente incidente

Γ : coeficiente de reflexão

Ao evidenciar os termos $Z_t I^+$ observa-se como a tensão de topo V_{TOPO} é proporcional tanto à impedância de surto da torre Z_t quanto à amplitude da onda de corrente I^+ , a qual se propaga pela estrutura em direção ao solo.

Assim como ilustrado pela Figura 47, a sobretensão imposta à uma cadeia de isoladores pode ser calculada, considerando a tensão instantânea da linha no momento da solicitação, através da equação (19) (VISACRO, 2005).

Figura 47 – Influência da tensão instantânea na linha na sobretensão na cadeia de isoladores.



Fonte: adaptado de Visacro (2005).

$$V_{\text{ISOLADOR}} = V_{\text{TOPO}} - V_{\text{FASE}} \quad (19)$$

para a qual:

V_{ISOLADOR} : sobretensão imposta à cadeia de isoladores

V_{TOPO} : tensão no topo da estrutura de suporte

V_{FASE} : tensão instantânea na fase

Para uma análise mais aprofundada, pode-se, ainda, considerar o efeito do acoplamento eletromagnético entre condutores próximos e a parte superior da torre. Este efeito causa a

elevação do potencial da fase, resultando em uma sobretensão na cadeia de isoladores entre 70 % a 90 % da tensão no topo da estrutura (VISACRO, 2005).

Em síntese, os diversos parâmetros supracitados capazes de influenciar na sobretensão resultante na cadeia de isoladores encontram-se compilados na Tabela 6. De forma semelhante ao caso da descarga direta, quando a sobretensão imposta à cadeia é superior a sua tensão suportável, pode ser estabelecido um arco entre a estrutura de suporte e o condutor conectado à cadeia de isoladores, potencialmente resultando no desligamento da linha (VISACRO, 2005).

Tabela 6 – Parâmetros influentes na amplitude da tensão na cadeia de isoladores.

Parâmetro	Variação	Efeito na amplitude da sobretensão na cadeia de isoladores
Impedância de aterramento	Redução	Redução
Amplitude de corrente	Redução	Redução na mesma proporção
Impedância de surto da torre	Redução	Redução na mesma proporção
Tempo de frente da onda de corrente	Redução	Aumento
Altura da torre	Redução	Redução
Acoplamento capacitivo	Redução	Aumento

Fonte: adaptado de Visacro (2005).

2.6.3 Impedância de surto

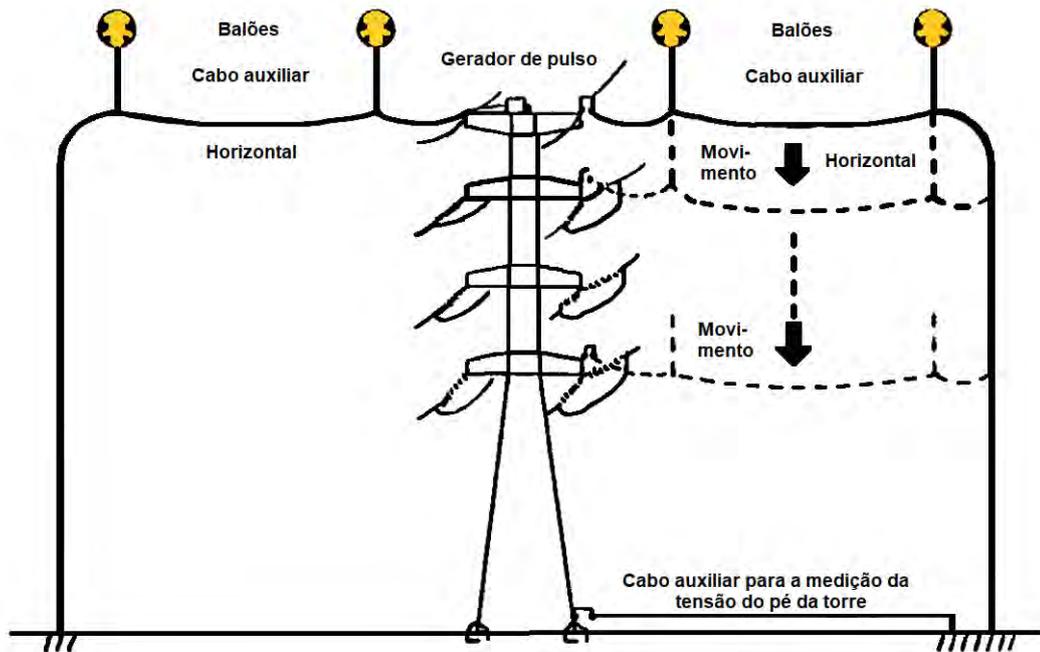
Assim como apontado por Zanetta Júnior (2003), a impedância de surto de determinada estrutura depende de sua geometria. Diversos métodos teóricos e experimentais são utilizados para a determinação deste parâmetro, cada qual com suas vantagens, desvantagens e particularidades. Dada a influência da impedância de surto da torre na sobretensão resultante na cadeia de isoladores, salienta-se a importância de uma metodologia adequada para a caracterização deste parâmetro em estudos associados.

As medições realizadas por Yamada *et al.* (1995), retratam um exemplo da aplicação do método de medição direto, o qual envolve a aplicação de corrente no topo da torre através de um gerador de pulsos instalado sobre a estrutura conforme a Figura 48.

Em seguida é realizada a medição dos parâmetros de tensão e corrente no topo e nos braços da estrutura, envolvendo diversos componentes como condutores auxiliares, um

suspensão por balões e outro conectado na base da estrutura, um registrador digital para a captura da forma de onda e transformadores de corrente para medição da corrente (YAMADA *et al.*, 1995).

Figura 48 – Detalhes do método de medição direto.



Fonte: adaptado de Yamada *et al.* (1995).

Outro método de medição denominado reflectometria no domínio do tempo foi utilizado por Chisholm *et al.* (1982), consistindo na aplicação de pulsos de corrente no topo da estrutura, seguido do monitoramento das ondas de tensão refletidas e incidentes através de osciloscópios. Por fim, foi proposto e utilizado um algoritmo para calcular as impedâncias de surto a partir dos formatos de onda obtidos (CHISHOLM *et al.*, 1982).

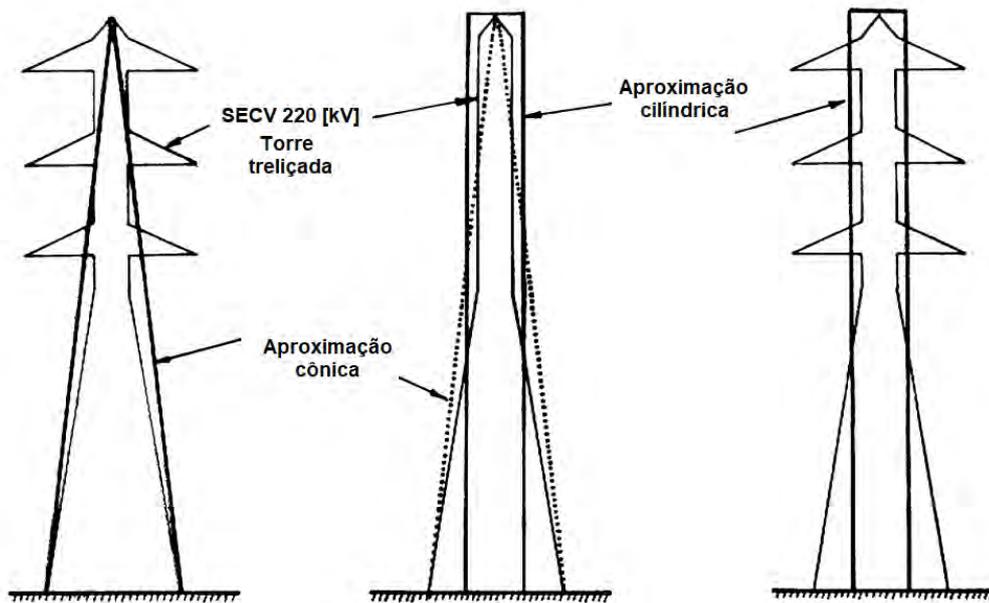
“As medições são alternativas que resultam em valores com erros mínimos” (MOTA, 2017, p. 41). Por outro lado, o custo associado, bem como a complexidade no posicionamento dos cabos e equipamentos, estes nem sempre de pequenas dimensões, podem vir a desincentivar a escolha deste método (ARAUJO; KUROKAWA, 2017; MOTA, 2017).

Métodos baseados na resolução das equações de Maxwell requerem o emprego de métodos numéricos ou ainda a aproximação da forma geométrica da torre por modelos simplificados, conforme a Figura 49 (MOTA, 2017).

A utilização de equações analíticas reside na praticidade de sua aplicação. Assim

como exposto por Mota (2017), as simplificações necessárias para sua elaboração incluem condutores ideais, distribuição de carga elétrica uniforme e velocidade do surto constante e equivalente à da luz. Estas simplificações podem implicar determinado grau de imprecisão de resultados, especialmente quando a geometria da torre é excessivamente discrepante das formas geométricas clássicas (ARAUJO; KUROKAWA, 2017; MOTA, 2017).

Figura 49 – Aproximação de silhueta de torre através de formas geométricas cilíndricas e cônicas.



Fonte: adaptado de Sargent e Darveniza (1969).

As equações (20) e (21), de autoria de Sargent e Darveniza (1969), configuram exemplos de equações analíticas propostas para o cálculo da impedância de surto de torres sob efeito de onda de corrente dupla exponencial, através da aproximação da estrutura por um cilindro e um cone, respectivamente.

$$Z_t = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 60 \quad (20)$$

$$Z_t = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) \quad (21)$$

para as quais:

Z_t : impedância de surto da torre

h : altura do sólido geométrico

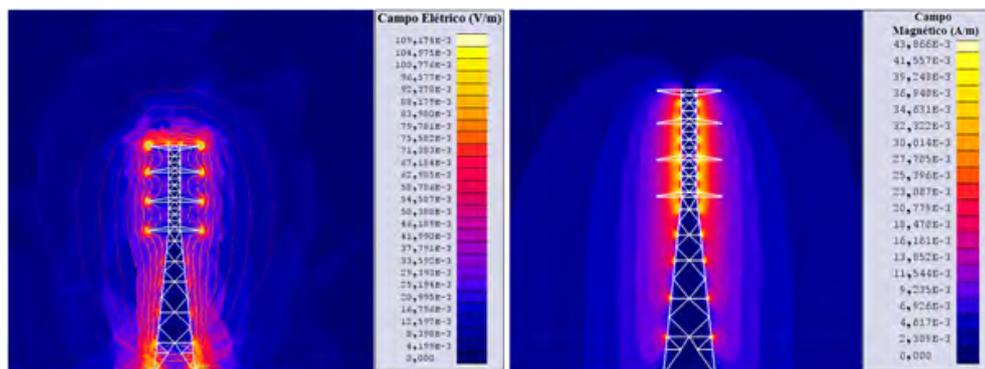
r : raio da base do sólido geométrico

A resolução das equações de Maxwell através de métodos numéricos podem permitir uma representação da geometria da torre mais detalhada (ARAUJO; KUROKAWA, 2017; MOTA, 2017).

O emprego de *softwares* especializados em determinados métodos numéricos como o método dos momentos, o método das diferenças finitas no domínio do tempo e o método dos elementos finitos auxilia a implementação deste tipo de abordagem (ARAUJO; KUROKAWA, 2017; MOTA, 2017). Entretanto, conforme apontado por Mota (2017), determinadas particularidades de cada método como a discretização do domínio ou o truncamento de funções envolvidas em técnicas de transformadas podem introduzir imprecisões nos resultados ou exigir níveis de esforços computacionais com altos custos associados.

A Figura 50 retrata a distribuição de campos elétricos e magnéticos para determinada torre, obtidas através de simulações computacionais realizadas por Mota (2017), nas quais foi empregado o método dos elementos finitos através do *software* FLUX3D.

Figura 50 – Distribuição de campos elétricos e magnéticos para determinada estrutura através de simulação no *software* FLUX3D.



Fonte: adaptado de Mota (2017).

A partir dos parâmetros de campos elétricos e magnéticos dispostos na Figura 50, associados aos valores de resistividade elétrica e permeabilidade magnética dos materiais envolvidos, além das intensidades de corrente e tensão impostas na torre pelo autor, Mota (2017) pôde calcular a impedância de surto da estrutura, com um erro de 0,56 % em relação ao valor de impedância de surto medido no topo da torre, ao passo que métodos analíticos

utilizados pelo autor apresentaram erros de 3,14 % a 45,7 %. Ressalta-se que os métodos analíticos utilizados por Mota (2017) contemplaram a aproximação de uma mesma estrutura por diferentes formas geométricas, contemplando cilindros, cones, cones invertidos e duas bases de cones. Portanto, além da fácil aplicação, presume-se que o método analítico adequado para cada estrutura apresente resultados satisfatórios.

2.6.4 Equação para cálculo da impedância de surto

Durante décadas, a equação (22) de Jordan constituiu uma das principais referências para o cálculo da impedância de surto de condutores verticais em nível do solo (JORDAN, 1934 apud CONTI *et al.*, 2006).

$$Z = 60 \ln \frac{h}{r} + 90 \frac{r}{h} - 60 \quad (22)$$

para a qual:

Z : impedância de surto do condutor

h : altura do condutor

r : raio do condutor

Visando replicar os cálculos de Jordan, Conti *et al.* (2006) aplicaram o método das imagens⁵ para calcular a indutância externa por unidade de comprimento de um condutor vertical, dada pela equação (23).

$$L' = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[2 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + r^2}}{r} + \frac{r}{h} - \frac{\sqrt{4h^2 + r^2}}{h} \right] \quad (23)$$

para a qual:

L' : indutância externa por unidade de comprimento do condutor

μ_0 : permeabilidade magnética do vácuo

h : altura do condutor

⁵O método das imagens consiste em satisfazer as condições de contorno impostas por um plano condutor ao campo elétrico de determinada configuração de cargas através da replicação desta configuração, com sinal oposto e posicionada de forma simétrica à original (HAYT; BUCK, 2013)

r : raio do condutor

Neste processo, Conti *et al.* (2006) observaram que Jordan equivocadamente considerou o sinal oposto para a corrente no condutor imagem, tornando sua contribuição subtrativa para o vetor de potencial magnético e resultando em valores subestimados de impedância de surto. Com o desenvolvimento correto, Conti *et al.* (2006) obtiveram a equação de Jordan corrigida (24) ao multiplicar a equação (23) pela velocidade da luz após adotar determinadas simplificações: altura do condutor muito superior ao seu raio; perdas desprezadas; estrutura do campo eletromagnético presumida como transversal.

$$Z = 60 \ln \frac{4h}{r} - 60 \quad (24)$$

para a qual:

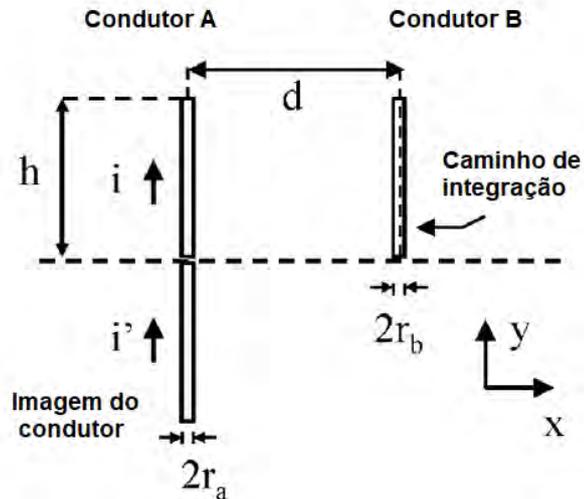
Z impedância de surto do condutor

h : altura do condutor

r : raio do condutor

Ausente na publicação original de Jordan, Conti *et al.* (2006) buscaram o desenvolvimento de uma equação para o cálculo da impedância de surto mútua entre condutores verticais, representada pela equação (25). Conforme ilustra a Figura 51, foram considerados dois condutores A e B de diâmetros $2r_a$ e $2r_b$, ambos de altura h , separados por uma distância d , enquanto i representa a corrente no condutor A e i' caracteriza a corrente em seu condutor imagem. Ademais, para o desenvolvimento da equação (25) a distância entre os condutores foi presumida como muito superior aos seus raios (CONTI *et al.*, 2006).

Figura 51 – Aplicação do método das imagens para condutores verticais paralelos.



Fonte: adaptado de Conti *et al.* (2006).

$$Z_M = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d^2}}{d} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{1 + \frac{d^2}{4h^2}} \quad (25)$$

para a qual:

Z_M : impedância de surto mútua

h : altura dos condutores

d : distância entre os centros dos condutores

2.6.5 Modelo multicondutores

O modelo multicondutores consiste na representação simplificada de estruturas através de múltiplos condutores verticais (CONTI; VISACRO, 2009). Para um sistema de n condutores verticais sem perdas, as tensões e correntes nos condutores estão relacionadas de acordo com a

equação (26) (CONTI; VISACRO, 2009).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{1,n} \\ Z_{21} & Z & & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot & Z_{n-1,n} \\ Z_{n,1} & \cdot & \cdot & \cdot & Z_{n,n-1} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} \quad (26)$$

para a qual:

V_i : tensão no i -ésimo condutor vertical

I_i : corrente no i -ésimo condutor vertical

Z : impedância de surto própria de cada condutor

Z_{ij} : impedância de surto mútua entre o i -ésimo e o j -ésimo condutor

Naturalmente, as impedâncias próprias Z e mútuas Z_{ij} podem ser calculadas através das equações (24) e (25). Segundo Conti e Visacro (2009), considerando uma interconexão entre todos os condutores verticais no ponto de injeção de corrente, as tensões V_i da equação (26) tornam-se iguais, enquanto o somatório das correntes I_i corresponde à corrente total injetada, possibilitando a representação do sistema através de uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente dada pela equação (27).

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + Z_{13} + \dots + Z_{1,n}}{n} \quad (27)$$

para a qual:

V : tensão no ponto de injeção de corrente

I : corrente total injetada no sistema

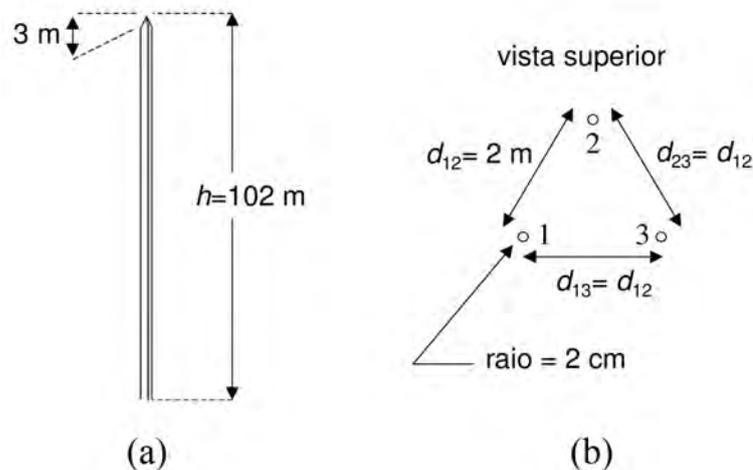
Z : impedância de surto própria de cada condutor

Z_{ij} : impedância de surto mútua entre o i -ésimo e o j -ésimo condutor

n : número de condutores verticais

A Figura 52 (a) ilustra um exemplo de estrutura estudada por Conti e Visacro (2009) através do modelo multicondutores. Trata-se de uma torre de 102 metros de altura, formada por três condutores ($n = 3$), cuja vista superior consta na Figura 52 (b), a qual possibilita observar como a disposição dos condutores, todos de raio igual a 2 centímetros, coincide com os vértices de um triângulo equilátero, de forma que as distâncias d_{12} , d_{13} e d_{23} são equivalentes e, portanto, as impedâncias de surto mútuas Z_{12} , Z_{13} e Z_{23} apresentam o mesmo valor (CONTI; VISACRO, 2009).

Figura 52 – Exemplo de aplicação do modelo multicondutor para torre de 3 condutores.

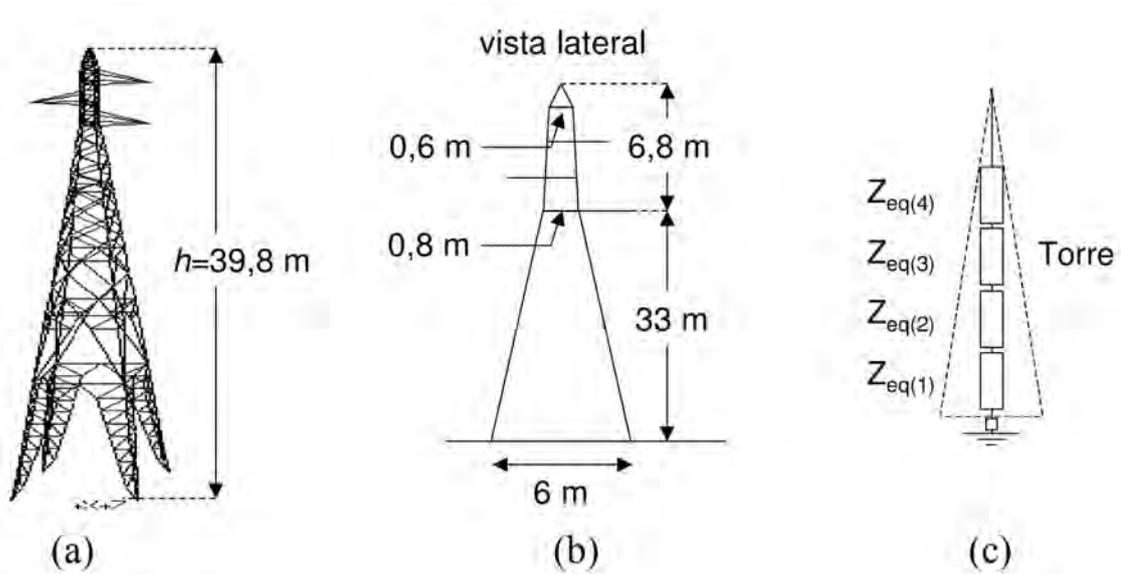


Fonte: adaptado de Conti e Visacro (2009).

Ao calcular o valor de impedância de surto equivalente (350Ω), Conti e Visacro (2009) realizaram simulações computacionais envolvendo a injeção de corrente no topo da torre e obtiveram resultados precisos. Foi observado um erro máximo de 5% em relação à referência adotada, apenas no incomum cenário em que o tempo de frente da fonte de corrente apresentava um valor mínimo ($0,34 \mu\text{s}$), comparável ao tempo de trânsito da estrutura (CONTI; VISACRO, 2009).

O modelo multicondutores também pode ser utilizado para a representação simplificada de torres treliçadas, utilizando-se de sistemas de quatro condutores ($n = 4$), dispostos de acordo com os vértices de um quadrado, conforme realizado por Giarola (2016), Almeida *et al.* (2021), Oliveira (2018) e Miranda (2019). A título de ilustração, a Figura 53 (a) representa uma torre para linhas de transmissão de 138 kV estudada por Conti e Visacro (2009), cujas dimensões constam na Figura 53 (b).

Figura 53 – Exemplo de aplicação do modelo multicondutores para torre treliçada.



Fonte: adaptado de Conti e Visacro (2009).

Visando contemplar o estreitamento da estrutura de acordo com a altura, Conti e Visacro (2009) dividiram a porção inferior da torre em três segmentos de 11 metros de comprimento, ao passo que o restante da estrutura foi representado por um segmento de 6,8 metros totalizando quatro segmentos, cada qual a ser representado por uma linha de transmissão de impedância de surto equivalente Z_{eq} , conforme Figura 53 (c).

Segundo Almeida *et al.* (2021), a divisão da torre treliçada em um maior número de segmentos beneficia a precisão deste modelo. Entretanto, a característica não vertical dos condutores da porção inferior da torre requer o cálculo de distâncias médias entre os condutores (ALMEIDA *et al.*, 2021).

Com o objetivo de reproduzir os resultados intermediários no cálculo das impedâncias de surto equivalentes Z_{eq} de Conti e Visacro (2009), a Tabela 7 representa os parâmetros dos sistemas a representar cada segmento da torre, considerando condutores de raio igual a 2 centímetros. Os comprimentos ℓ e alturas do ponto mais alto h de cada segmento foram fornecidos pelos autores, ao passo que as distâncias mínimas d_{\min} , máximas d_{\max} e médias d entre dois condutores adjacentes foram calculadas considerando a Figura 53.

Desta forma, conforme a Tabela 7, foram determinados os valores de impedâncias própria Z e mútuas Z_{12} e Z_{14} através das equações (24) e (25). Dada a disposição dos condutores, as distâncias médias d entre dois condutores adjacentes da Tabela 7 foram multiplicadas por um

fator de $\sqrt{2}$ para o cálculo das impedâncias mútuas Z_{13} através da equação (25). Por fim, os valores de impedância equivalente Z_{eq} , estes fornecidos por Conti e Visacro (2009), podem ser calculados pela equação (27).

Tabela 7 – Parâmetros de cada segmento da torre da Figura 53.

Segmento de torre k	ℓ [m]	h [m]	$d_{\text{mín}}$ [m]	$d_{\text{máx}}$ [m]	d [m]	Z [Ω]	Z_{12} [Ω]	Z_{13} [Ω]	Z_{14} [Ω]	Z_{eq} [Ω]
1	11	11	4,3	6,0	5,1	401,8	82,1	66,3	82,1	158,1
2	11	22	2,5	4,3	3,4	443,4	139,8	120,8	139,8	210,9
3	11	33	0,8	2,5	1,7	467,7	203,8	183,6	203,8	264,7
4	6,8	39,8	0,6	0,8	0,7	478,9	266,1	245,6	266,1	314,2

Fonte: adaptado de Conti e Visacro (2009).

Com determinadas considerações para implementação do modelo da Figura 53 (c) em simulações computacionais contemplando a variação do raio dos condutores verticais e dos valores de impedância de pé de torre, Conti e Visacro (2009) concluíram que as tensões de pico no topo da torre apresentavam boa concordância em relação à referência adotada, com um erro máximo de 8 %.

2.7 Sobretensão causada por descargas atmosféricas

Dado o exposto na seção 2.6, as sobretensões de impulso ocorrem devido a incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão (MAMEDE FILHO, 2013; VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Em linhas gerais, chama-se de *flashover* a disrupção no isolamento da linha devido a sobretensão de impulso quando a descarga atmosférica atinge diretamente os cabos das fases, seja por falha de blindagem ou por ausência de cabos guarda (VISACRO, 2005; ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Por sua vez, o *backflashover*, ilustrado pela Figura 54, caracteriza-se pela disrupção no isolamento da linha decorrente da sobretensão de impulso provocada pela descarga direta no cabo guarda ou na estrutura da linha (VISACRO, 2005).

Figura 54 – Registro de descarga no cabo guarda de uma linha de transmissão de 500 kV com ocorrência de *backflashover*.

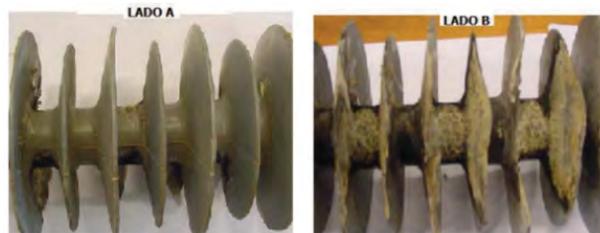


Fonte: (DBNST, 2010).

Em ambas as situações descritas, caso o valor da sobretensão seja muito elevado, ela é capaz de promover a ruptura do dielétrico do ar, estabelecendo um arco elétrico entre condutor e estrutura ou ainda, um arco volumétrico, podendo danificar o isolador, conforme a Figura 55 (VISACRO, 2005).

Ademais, caso a linha não seja desligada na ocorrência destes fenômenos, é possível que após a formação do arco elétrico, devido à baixa impedância do ar ionizado, a tensão de operação da linha o mantenha, provocando grandes danos à estrutura e aos cabos (VISACRO, 2005).

Figura 55 – Isolador danificado por arco elétrico.



Fonte: (CIGRE, 2008).

2.8 Considerações finais

Em síntese deste capítulo, o fenômeno da descarga atmosférica foi conceituado na seção 2.1, a respeito do seu processo de formação e particularidades envolvidas. Em seguida, a classificação das descargas nuvem-solo quanto a polaridade da carga transferida ao solo e o percurso de seus canais precursores, bem como a caracterização de parâmetros e formas de onda de descarga atmosférica, buscaram maior compreensão acerca deste fenômeno, conforme o exposto nas seções 2.2 e 2.3.

O segundo objeto de estudo deste TCC foi apresentado na seção 2.4, as linhas aéreas. Foram abordados os principais componentes que as constituem, envolvendo as dimensões e classificações de estruturas, caracterização dos cabos condutores, cabos guarda e isoladores, bem como sistemas de aterramento.

Por fim, na seção 2.6 foi fundamentada a interação entre os dois grandes objetos de estudo deste TCC: as descargas atmosféricas e as linhas de transmissão. Levando em consideração modelos de incidência e o teorema das ondas viajantes, foi apresentado o estudo do comportamento dos componentes da linha frente às sobretensões de origem atmosféricas, incluindo suas consequências ilustradas na seção 2.7.

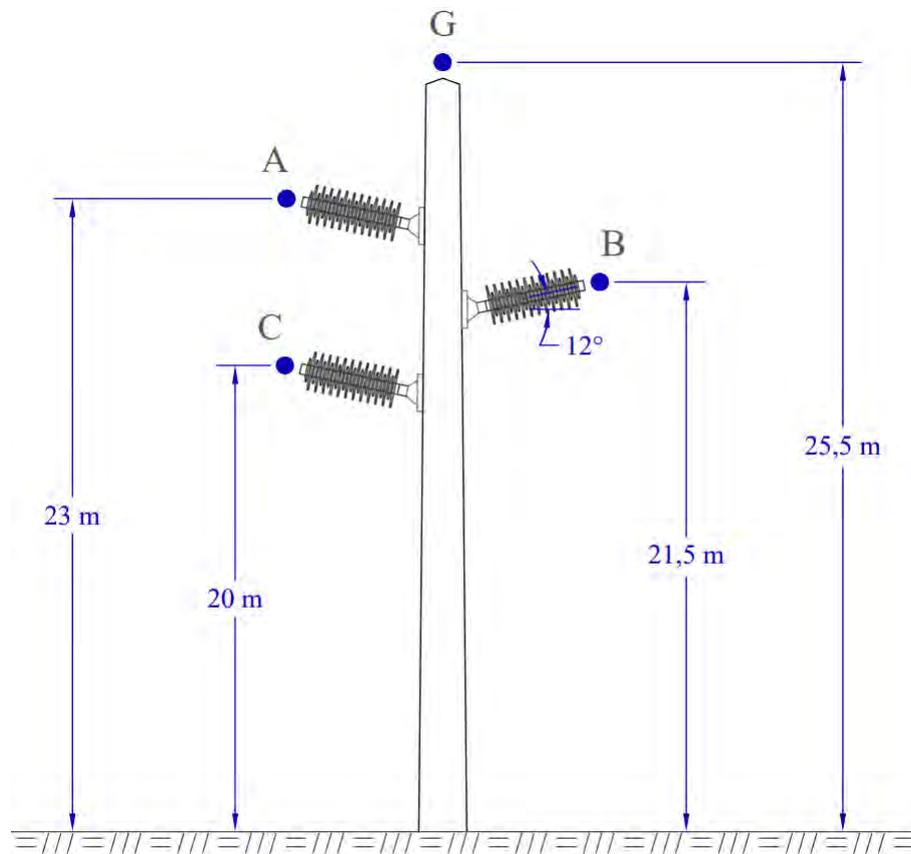
Dado o exposto, a revisão bibliográfica apresentada neste capítulo constitui uma gama de conhecimentos e ferramentas teóricas, a qual visa estabelecer uma fundação para o desenvolvimento da modelagem computacional a ser elaborada no capítulo 3.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 Características da linha de distribuição modelada

Ilustrada na Figura 56, a estrutura de suporte da linha de distribuição de 69 kV estudada consiste em um poste de concreto de base circular que suporta um cabo guarda ao topo, este indicado pela letra G, bem como condutores fase dispostos de forma triangular assimétrica, indicados pelas letras A, B e C. As alturas destes cabos constam na Figura 56 e os isoladores são do tipo *linepost*, apresentando um ângulo de 12° com o eixo horizontal (informação verbal)⁶. Ademais, conforme será melhor elaborado na seção 3.6, o cabo guarda é do tipo *Penguin* enquanto os condutores fase são do tipo *Grosbeak* com temperatura de operação de 75°C e estendem-se por vãos médios de 100 metros (informação verbal)⁶.

Figura 56 – Estrutura de suporte da linha modelada.



Fonte: autoria própria (2021).

⁶Dados fornecidos por profissionais da área.

A Figura 57 representa um isolador polimérico do tipo pilar, popularmente chamado de *linepost*, da empresa brasileira Balestro (2015), considerado na elaboração deste trabalho. Constituído por um núcleo de fibra de vidro, ferragens de aço zincado e revestimento isolante de borracha de silicone, este isolador apresenta classe de tensão de 69 kV, 24 saias e 0,968 metro de comprimento (BALESTRO, 2015).

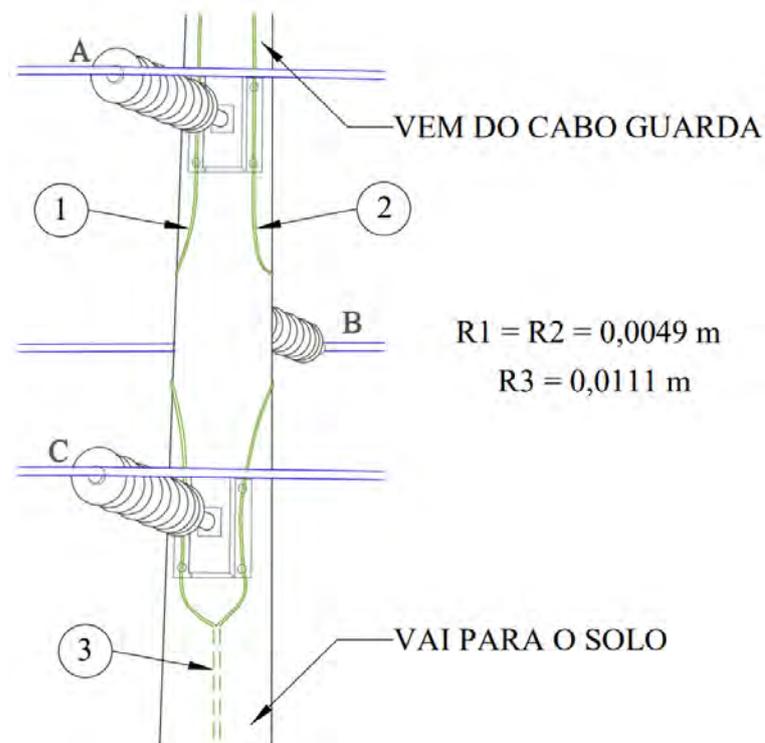
Figura 57 – Isolador polimérico *linepost* de classe de tensão 69 kV.



Fonte: adaptado de Balestro (2015).

Condutores de descida são responsáveis por constituir a conexão elétrica entre o cabo guarda e os eletrodos verticais de aterramento, os quais apresentam seis metros de comprimento e encontram-se espaçados entre si também por 6 metros (informação verbal)⁶. Quanto à topologia dos condutores de descida, conforme a Figura 58, dois condutores dispostos paralelamente interligam o cabo guarda e as ferragens dos isoladores, ao passo que um terceiro condutor, este interno à estrutura, conecta os condutores 1 e 2 ao solo. Estes condutores são compostos de aço revestido por cobre e apresentam um raio de 0,0049 metro para os condutores 1 e 2 e 0,0111 metro para o condutor 3 (informação verbal)⁶.

Figura 58 – Topologia dos condutores de descida.



Fonte: autoria própria (2021).

Os condutores de descida foram considerados responsáveis por direcionar integralmente as ondas de surto para o solo, configurando os elementos a serem modelados para a representação da estrutura no *software* ATP, conforme realizado por Souza (2020). Ademais, foram desprezados os efeitos eletromagnéticos associados à presença do poste de concreto e de sua armação.

3.2 Cálculo da impedância de surto dos condutores de descida

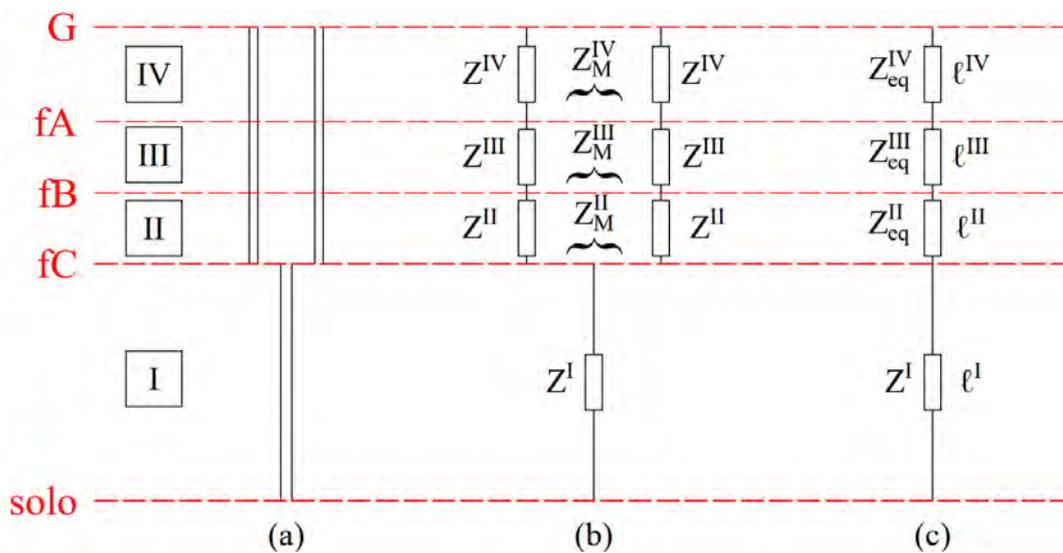
Ao simplificar a topologia dos condutores de descida descrita na seção 3.1, permite-se considerá-los condutores verticais sem perdas e objetiva-se calcular a impedância de surto destes condutores através do modelo multicondutores. Isso posto, a Figura 59 (a) demonstra a segmentação dos condutores de descida em quatro sistemas enumerados de I a IV a partir do solo e delimitados pelas alturas dos pontos de conexão ao cabo guarda G, às ferragens dos isoladores fA, fB e fC e ao solo.

Conforme ilustra a Figura 59 (b), uma impedância de surto própria Z é associada a cada segmento de condutor, ao passo que uma impedância de surto mútua Z_M é compreendida entre

segmentos paralelos para os sistemas de dois condutores. Ainda de acordo com a Figura 59 (b), o sistema I, delimitado pelo solo e a altura da ferragem do isolador da fase C, apresenta apenas um condutor e, portanto, sua impedância de surto é determinada somente por sua impedância de surto própria.

A Figura 59 (c) ilustra a representação de cada sistema por uma linha de transmissão de impedância de surto equivalente Z_{eq} , cada qual com seu comprimento ℓ associado.

Figura 59 – Segmentação dos condutores de descida.



Fonte: autoria própria (2021).

Para os sistemas II, III e IV, compostos por dois condutores verticais ($n = 2$), a equação (26) torna-se equação (28).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_{12} \\ Z_{21} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

para a qual:

V_i : tensão no i -ésimo condutor vertical

I_i : corrente no i -ésimo condutor vertical

Z : impedância de surto própria de cada condutor

Z_{12} e Z_{21} : impedância de surto mútua entre os dois condutores

Considerando o ponto de conexão ao cabo guarda e às ferragens dos isoladores como pontos de interconexão entre os dois condutores de descida, nestas condições as tensões V_1 e V_2 são iguais, ao passo que as correntes I_1 e I_2 correspondem à metade da corrente total oriunda do cabo guarda ou do sistema imediatamente acima. Portanto, a equação (28) resume-se à equação (29), da qual obtém-se a equação (30), esta equivalente à equação (27) para $n = 2$.

$$\begin{bmatrix} V \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z & Z_{12} \\ Z_{21} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I/2 \\ I/2 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$Z_{\text{eq}} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12}}{2} \quad (30)$$

para as quais:

V : tensão nos condutores verticais

I : corrente total injetada

Z : impedância de surto própria de cada condutor

Z_{12} e Z_{21} : impedância de surto mútua entre os dois condutores

Z_{eq} : impedância de surto da linha equivalente ao sistema

A Tabela 8 contém os parâmetros dos quatro sistemas de acordo com a segmentação dos condutores de descida da Figura 59. A coluna r apresenta o raio dos condutores de descida, ao passo que o comprimento ℓ de cada segmento e a altura do seu ponto mais alto h foram calculadas a partir das alturas dos condutores fase e do cabo guarda, considerando o comprimento do isolador e sua inclinação, informações declaradas na seção 3.1. A distância média d entre os condutores de descida, quando aplicável, foi considerada equivalente a 0,2 metro.

Por fim, ainda de acordo com a Tabela 8, a partir dos parâmetros supracitados foram calculadas as impedâncias de surto próprias Z , mútuas Z_M e equivalentes Z_{eq} através das equações (24), (25) e (30), respectivamente.

Tabela 8 – Impedância de surto dos condutores de descida.

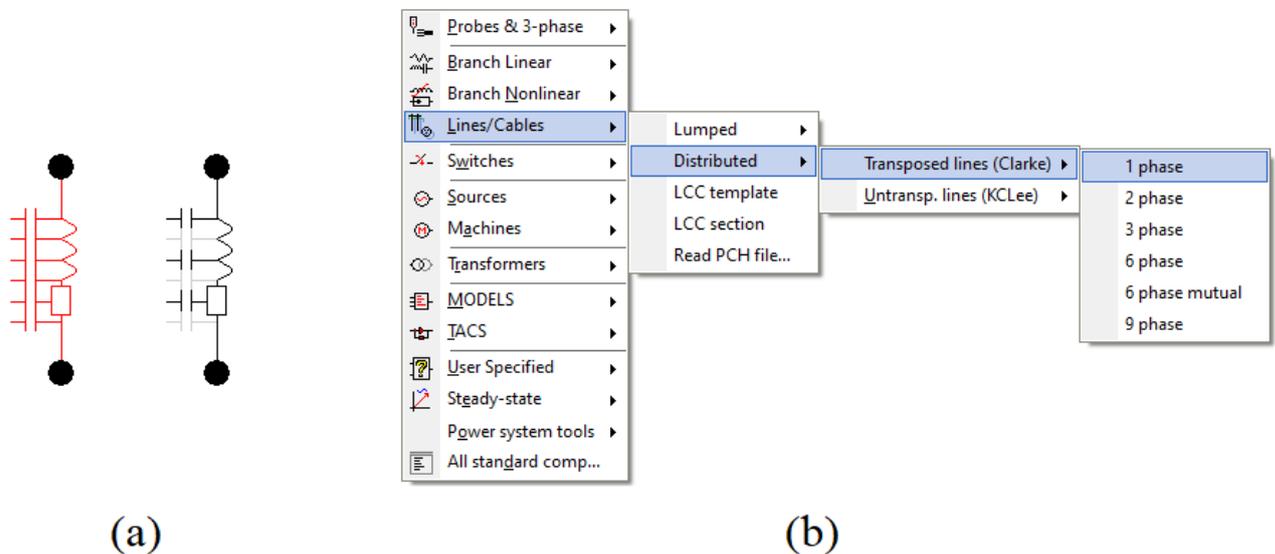
sistema	r [m]	ℓ [m]	h [m]	d [m]	Z [Ω]	Z_M [Ω]	Z_{eq} [Ω]
I	0,0111	19,8	19,8	-	472,30	-	472,30
II	0,0049	1,5	21,3	0,2	525,81	303,54	418,75
III	0,0049	1,5	22,8	0,2	529,89	307,61	414,68
IV	0,0049	2,7	25,5	0,2	536,61	314,30	472,30

Fonte: autoria própria (2021).

3.2.1 Representação da estrutura de suporte no *software* ATPDraw

A estrutura de suporte será representada através do componente ilustrado na Figura 60 (a). O ícone vermelho representa o componente quando inserido na janela de circuito, enquanto o ícone preto o representa após qualquer edição realizada pelo usuário (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Denominado LINEZT_1 no ATPDraw, trata-se de uma linha de transmissão de condutor único e parâmetros distribuídos, de acordo com o modelo Clarke (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). A inserção deste componente no ATPDraw pode ser realizada através do menu da Figura 60 (b), acessível ao clicar com o botão direito do mouse na janela de circuito (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

Figura 60 – Componente a representar a estrutura e sua forma de inserção no *software* ATPDraw.



Fonte: autoria própria (2021).

A Figura 61 representa a caixa de diálogo do componente LINEZT_1 com valores padrão. O parâmetro R' corresponde à resistência modal por comprimento da linha em Ω/m ; Z representa impedância de surto modal em Ω ; e v representa a velocidade modal de propagação em m/s (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Para o quadro *Lines* da janela da Figura 61, o parâmetro *Length* corresponde ao comprimento da linha em metros, enquanto na lista suspensa rotulada *Output* é possível configurar medições de corrente, tensão, potência e energia (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

Figura 61 – Caixa de diálogo do componente LINEZT_1 com valores padrão.

DATA	UNIT	VALUE
R'	Ohm/m	0
Z	ohm	500
v	m/s	300000000

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Fonte: autoria própria (2021).

Ainda referente à Figura 61, as opções dispostas no quadro ILINE oferecem alternativas ao fornecimento dos parâmetros Z e v , possibilitando a especificação de outros pares de parâmetros: L' e C' ou Z e τ . Os parâmetros L' e C' correspondem à indutância modal por unidade de comprimento e à capacitância modal por unidade de comprimento C' , dadas em mH/m e $\mu\text{F}/\text{m}$, ao passo que Z representa novamente a impedância de surto modal e τ corresponde ao tempo de trânsito, dado em segundos (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002). Esta flexibilidade deve-se à relação entre os parâmetros supracitados através das equações (31), (32) e (33) (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002).

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (31)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (32)$$

$$\tau = \frac{\ell}{v} = \ell\sqrt{L'C'} \quad (33)$$

para as quais:

Z : impedância de surto modal

L' : indutância modal por unidade de comprimento

C' : capacitância modal por unidade de comprimento

τ : tempo de trânsito modal

ℓ : comprimento da linha

Por fim, referente à lista de opções do quadro rotulado *Conductance* da Figura 61, para a opção $G = 0$ as perdas da linha são calculadas de acordo com R' , enquanto para a opção não usual $G = R * C / L$, este parâmetro é dividido em elementos série $R'_{série}$ e elementos *shunt* G'_{shunt} , de acordo com as equações (34) e (35), caracterizando uma linha de transmissão sem distorções (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002; HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

$$R'_{série} = 0,5R' \quad (34)$$

$$G'_{shunt} = \frac{R'_{série}C'}{L'} \quad (35)$$

para as quais:

$R'_{série}$: resistência série por unidade de comprimento

G'_{shunt} : condutância *shunt* por unidade de comprimento

R' : resistência modal por unidade de comprimento

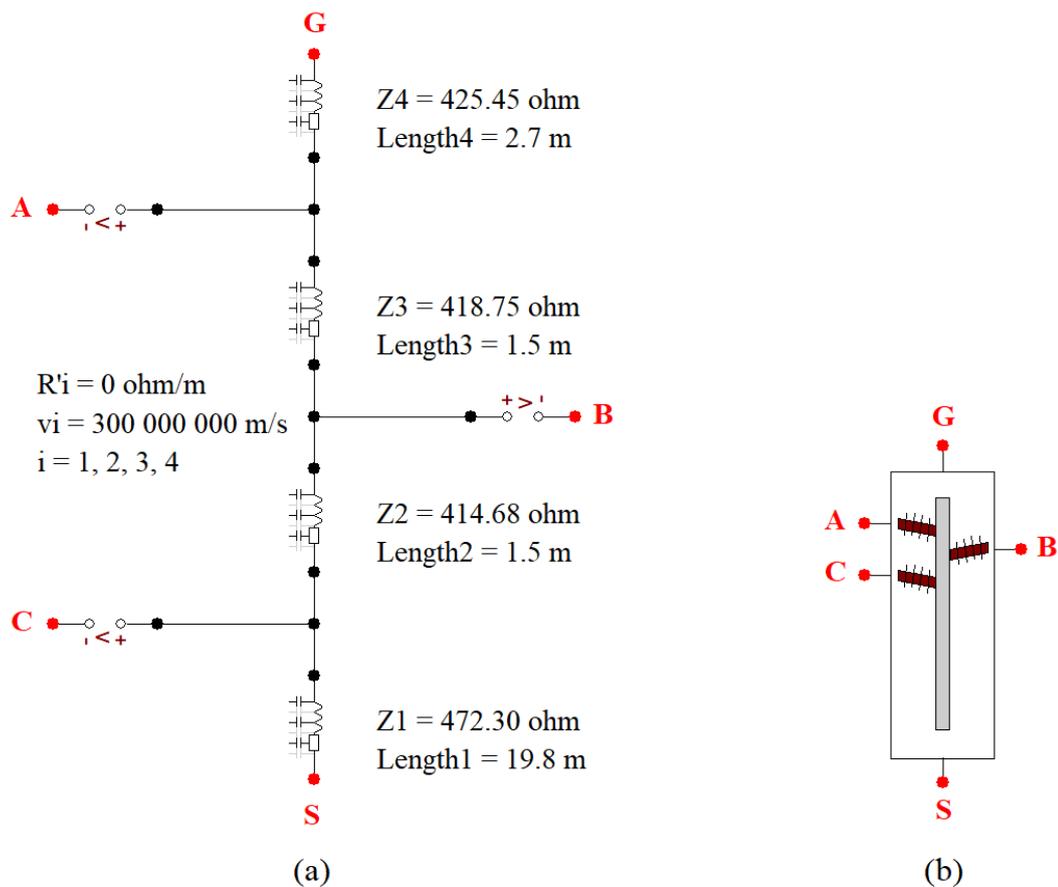
L' : indutância modal por unidade de comprimento

C' : capacitância modal por unidade de comprimento

O princípio de funcionamento do componente LINEZT_1 pode ser verificado no Apêndice A e a Figura 62 (a) ilustra a representação da estrutura de suporte da linha de distribuição estudada neste TCC, de acordo com a segmentação descrita na seção 3.2. Os valores de impedância de surto e comprimento de cada componente LINEZT_1 da Figura 62 correspondem àqueles da Tabela 8. Tratando-se de linhas sem perdas, o parâmetro R' foi considerado zero para os quatro LINEZT_1. Conforme constatado por Conti e Visacro (2009),

para a representação de torres treliçadas a velocidade de propagação das ondas pela estrutura pode ser presumida como 85 % da velocidade da luz, de forma a aumentar o tempo de trânsito e representar a influência da inclinação dos condutores e presença das treliças da estrutura. Este cenário não se aplica à estrutura estudada neste TCC e, portanto, foi utilizado o valor padrão (300 000 000 m/s), aproximadamente equivalente à velocidade da luz.

Figura 62 – Representações da estrutura de suporte no *software* ATPDraw.



Fonte: autoria própria (2021).

Os voltímetros da Figura 62 (a) serão responsáveis por medir a sobretensão nos isoladores das fases A, B, C, ao passo que os nós G e S serão conectados aos elementos a representarem o cabo guarda e a impedância de aterramento, respectivamente. Através do comando de compactação disponível no ATPDraw, a partir do circuito da Figura 62 (a) foi criado um novo componente ilustrado na Figura 62 (b). Este processo de compactação encontra-se descrito no Apêndice B.

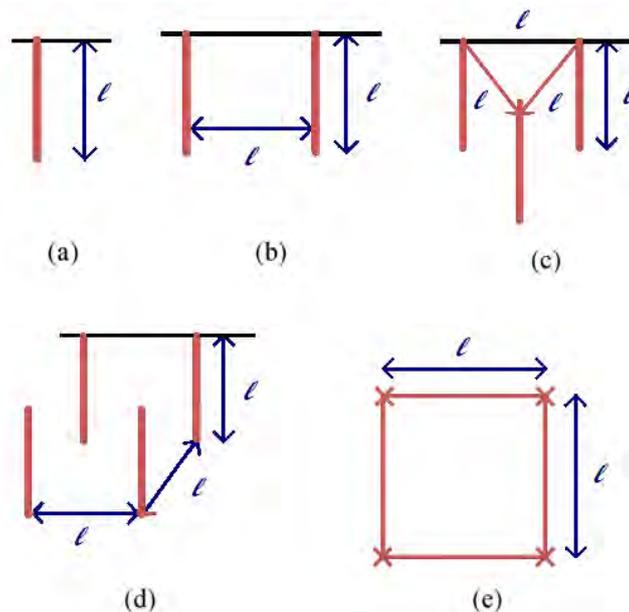
3.3 Impedância impulsiva de aterramento

Conforme exposto na seção 2.5, por seu comportamento estar relacionado ao tempo de frente da onda impulsiva, além de ser um número real puro de fácil implementação no ATPDraw, adotou-se a impedância impulsiva. Ainda de acordo com a seção 2.5, para a sua determinação é necessário o conhecimento do valor da resistência em baixa frequência e do coeficiente de impulso.

Nas simulações realizadas, optou-se por considerar valores distintos de resistência em baixa frequência a fim de averiguar o comportamento da sobretensão nos isoladores frente a um valor convencional (20Ω) e a valores mais elevados (75Ω e 150Ω), decorrentes principalmente da condição de aterramento elétrico irregular, envolvendo conexões mal feitas, cabos desconectados das hastes, falta de interligação entre hastes ou, até mesmo, a falta de hastes (CANNABRAVA *et al.*, 2016).

De acordo com Alípio e Visacro (2014), o coeficiente de impulso pode ser calculado através da equação (36), própria para arranjos verticais de eletrodos de comprimentos entre 2 a 15 metros, conforme a Figura 63, da qual o arranjo (c) corresponde àquele descrito na seção 3.1.

Figura 63 – Arranjos de eletrodos de aterramento.



Fonte: adaptado de Alípio e Visacro (2014).

$$I_{C(\text{primeira})} = -0,00086(\rho_0)^{(0,686)} + 0,0992 \quad (36)$$

para as quais:

$I_{C(\text{primeira})}$: coeficiente de impulso para primeira descarga negativa

ρ_0 : resistividade de baixa frequência

Ademais, no que se refere a primeira descarga, esta formulação só é válida para o intervalo resistividade elétrica do solo de 100 $\Omega.m$ até 4000 $\Omega.m$, motivo pelo qual, optou-se por considerar nas simulações do presente trabalho os valores de resistividade de 300 $\Omega.m$, 2000 $\Omega.m$ e 4000 $\Omega.m$. Diante do exposto, na Tabela 9, estão representados todos os valores calculados através da equação (36) e utilizados na equação (13) para a determinação das impedâncias impulsivas, representadas na Tabela 10.

Tabela 9 – Coeficientes de impulso para diferentes resistividades do solo.

ρ_0	IC
[$\Omega.m$]	[$\Omega.m$]
300	0,9490
2000	0,8339
4000	0,7376

Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 10 – Impedâncias de aterramento.

R_{BF}	Z_{300}	Z_{2000}	Z_{4000}
[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
20	18,98	16,68	14,75
75	71,17	62,54	55,32
150	143,35	125,08	110,6

Fonte: autoria própria (2021).

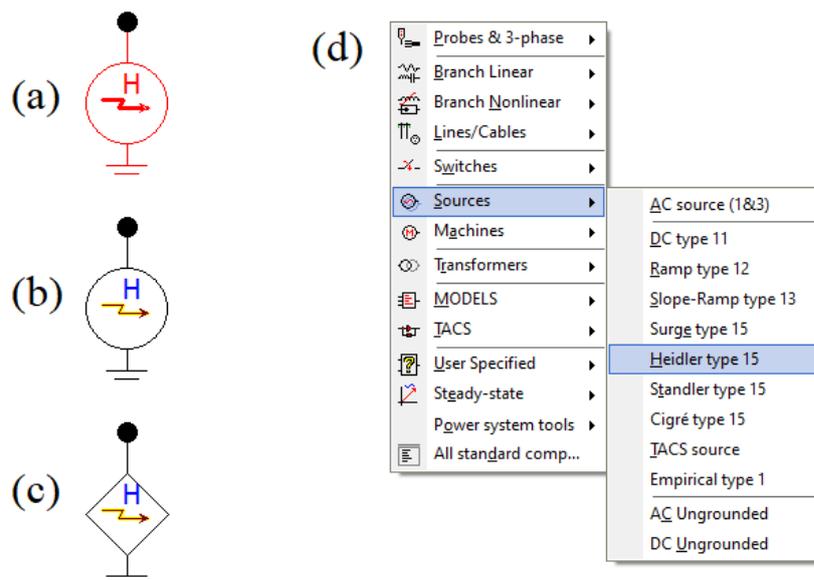
3.4 Descarga atmosférica

Conforme o exposto na seção 2.2, aproximadamente 90 % das descargas atmosféricas nuvem-solo são descargas atmosféricas negativas descendentes e, portanto, correspondem ao tipo da descarga modelada no ATPDraw. Visto nas seções 2.1 e 2.3.3, apesar de ao menos uma descarga subsequente estar presente em 80 % dos casos, a amplitude de sua curva mediana é menor e, de forma a simplificar o estudo, as descargas subsequentes não foram modeladas.

3.4.1 Componente utilizado

De acordo com a seção 2.3.3, a Função de Heidler *et al.* (1999) permite uma melhor representação das curvas médias ou medianas das ondas de corrente de descargas atmosféricas reais. Portanto, as descargas atmosféricas foram representadas no ATPDraw através do componente denominado HEIDLER, ilustrado na Figura 64 (a) em seu momento de inserção na janela de circuito. Após sofrer qualquer edição, seu ícone passa a ser representado pela Figura 64 (b) quando caracteriza uma fonte de tensão e pela Figura 64 (c) quando caracteriza uma fonte de corrente. Ademais, este componente pode ser inserido na janela de circuito através do menu da Figura 64 (d), acessível ao clicar na janela de circuito com o botão direito do *mouse*.

Figura 64 – Ícones e forma de inserção do componente HEIDLER no software ATPDraw.

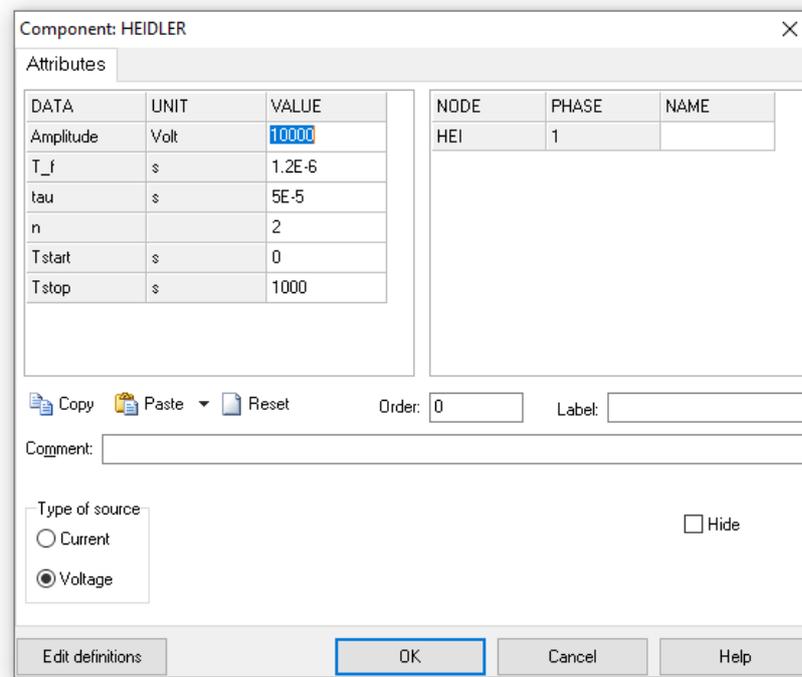


Fonte: autoria própria (2021).

A Figura 65 representa a janela de diálogo do componente HEIDLER com valores

padrão. De acordo com Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP (2002), o parâmetro *Amplitude* representa o valor máximo que a função consegue representar, enquanto o parâmetro *T_f* corresponde ao tempo de frente em segundos, dado pelo intervalo de tempo entre $t = 0$ até o tempo correspondente ao pico da função. Conforme constatado por Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP (2002), apesar de a Função de Heidler utilizar uma constante τ_1 relacionada ao tempo de frente, o parâmetro *T_f* utilizado no ATP representa diretamente o tempo de frente da onda.

Figura 65 – Janela de diálogo do componente HEIDLER no software ATPDraw com valores padrão.



Fonte: autoria própria (2021).

Segundo Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP (2002), o parâmetro *tau* corresponde ao intervalo entre $t = 0$ e o ponto em que a amplitude da corrente decai para 50% do seu valor de pico. Entretanto, de acordo com a janela de ajuda do componente HEIDLER no ATPDraw, o parâmetro *tau* corresponde ao intervalo de tempo entre $t = 0$ e o ponto em que a amplitude da corrente decai para 37% do seu valor de pico. Marroques (2015) sugere a realização de simulações sucessivas contemplando a variação do valor de *tau* até que o formato da onda apresente o tempo de cauda desejado. O parâmetro *n* é um fator relacionado à taxa de inclinação da função, ao passo que *Tstart* e *Tstop* determinam o tempo de atividade e inatividade da função (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002). Por fim, a lista de opções do

quadro *Type of source* da Figura 65 permite configurar o componente HEIDLER como uma fonte de corrente ou uma fonte de tensão.

3.4.2 Parâmetros utilizados

A estação do Morro do Cachimbo foi construída em 1985 em Minas Gerais e corresponde à primeira estação de pesquisa de descargas atmosféricas da América Latina. Segundo (VISACRO *et al.*, 2004), a torre instrumentada desta estação registrou formas de onda de 79 descargas atmosféricas totalizando 157 descargas de retorno em 13 anos de observação (VISACRO *et al.*, 2004). A partir destes registros, Visacro *et al.* (2004) obtiveram diversos parâmetros estatísticos e alguns constam na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros medianos das descargas descendentes negativas primeiras medidos na estação do Morro do Cachimbo.

I_{p1}	I_p	T_{10}	T_{50}
[kA]	[kA]	[μ s]	[μ s]
40,4	45,3	5,6	53,5

Fonte: adaptado de Visacro *et al.* (2004).

Conforme apontado por Visacro *et al.* (2004), a onda de corrente da descarga negativa primeira costuma apresentar dois picos e, referente à Tabela 11, o parâmetro I_{p1} corresponde ao valor mediano de corrente no primeiro pico, enquanto I_p representa o valor mediano de corrente no segundo pico e, conseqüentemente, ao valor máximo da curva mediana. O parâmetro T_{10} da Tabela 11 corresponde ao intervalo de tempo necessário para que a corrente passe de 10% de I_{p1} para 90% de I_p e permite o cálculo do tempo de frente da onda mediana T_{frente} de acordo com a equação (37), conforme o exposto na seção 2.3.2. Por fim, o parâmetro T_{50} da Tabela 11 corresponde ao valor mediano do tempo de cauda, descrito na seção 2.3.2.

$$T_{frente} = 1,25T_{10} = 1,25.5,6 \mu s = 7,0 \mu s \quad (37)$$

para a qual:

T_{frente} : tempo de frente da onda mediana

T_{10} : intervalo de tempo necessário para que a corrente passe de 10% a 90% do valor do primeiro pico

A partir dos resultados obtidos por Visacro *et al.* (2004), Conti e Visacro (2007) propuseram a representação de ondas negativas primeiras através da soma de múltiplas Funções de Heidler, conforme a equação (38). Para um formato de onda de duplo pico, denominado MCS_FST#2, Conti e Visacro (2007) utilizaram os parâmetros da Tabela 12.

$$i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{0k}}{\eta_k} \frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (t/\tau_{1k})^{n_k}} e^{(-t/\tau_{2k})} \quad (38)$$

$$\eta = e^{-[(\tau_{1k}/\tau_{2k})(n_k \tau_{2k}/\tau_{1k})^{(1/n_k)}]}$$

para as quais:

m : total de Funções de Heidler

k : índice referente à k -ésima Função de Heidler

I_0 : amplitude da corrente na base do canal

τ_1 : constante relacionada ao tempo de frente da onda de corrente

τ_2 : constante relacionada ao tempo de cauda da onda de corrente

η : fator de correção da amplitude

n : fator de inclinação da corrente

Tabela 12 – Parâmetros das 7 funções Heidler para a geração da curva MCS_FST#2.

k	I_{0k} [kA]	τ_{1k} [μ s]	τ_{2k} [μ s]	n_k
1	6	3	76	2
2	5	3,5	10	3
3	5	4,8	30	5
4	8	6	26	9
5	16,5	7	23,3	30
6	17	70	200	2
7	12	12	26	14

Fonte: adaptado de Conti e Visacro (2007).

Conforme constatado por Giarola (2016), os parâmetros e equação da Função de Heidler diferem daqueles utilizados pelo ATP e torna-se necessário realizar algum tipo de tratamento para a inserção deste formato de onda no ATPDraw. Desta forma, a partir da inserção das 7 Funções de Heidler no *software* MATLAB, Giarola (2016) obteve os parâmetros necessários para inserir a MCS_FST#2 no ATPDraw, conforme a Tabela 13, a qual foi adaptada considerando o sinal decimal como ponto para implantação no ATPDraw.

Tabela 13 – Parâmetros de entrada do modelo com 7 componentes HEIDLER no ATPDraw.

fonte	Amplitude [A]	T _f [s]	<i>tau</i> [s]	n
1	6400	10.8E-6	76E-6	2
2	4699	5.6E-6	10E-6	3
3	4898	8.4E-6	30E-6	5
4	7822	8.6E-6	26E-6	9
5	16330	8.2E-6	23.3E-6	30
6	16120	112.2E-6	200E-6	2
7	11630	15E-6	26E-6	14

Fonte: adaptado de Giarola (2016).

Dado o exposto, um dos objetivos deste TCC consiste na comparação entre as sobretensões provenientes da incidência de descargas atmosféricas com parâmetros medianos do Morro do Cachimbo representadas por um 1 ou 7 componentes HEIDLERs. Desta forma, busca-se estudar o efeito de uma caracterização fiel do formato de onda de descargas atmosféricas reais, conforme utilizado por Pechir (2020), Segantini (2018), Oliveira (2018) e Giarola (2016), quando comparado com a representação mais simplificada considerando apenas uma Função de Heidler, assim como utilizado por Fekete *et al.* (2010), Gatta *et al.* (2005), Souza (2020) e Zawani *et al.* (2013), além de constar no Anexo B da NBR 5419 (ABNT, 2015).

Para o modelo de um componente HEIDLER, através de simulações sucessivas conforme sugerido por Marroques (2015), foi observado que um parâmetro *tau* de aproximadamente 62 μ s apresentou um tempo de cauda similar ao desejado de 53,5 μ s. Desta forma, para o formato de onda de um componente HEIDLER, foram utilizados os parâmetros dispostos na Tabela 14. Para o parâmetro *n*, associado à inclinação da curva, foi utilizado o

valor padrão.

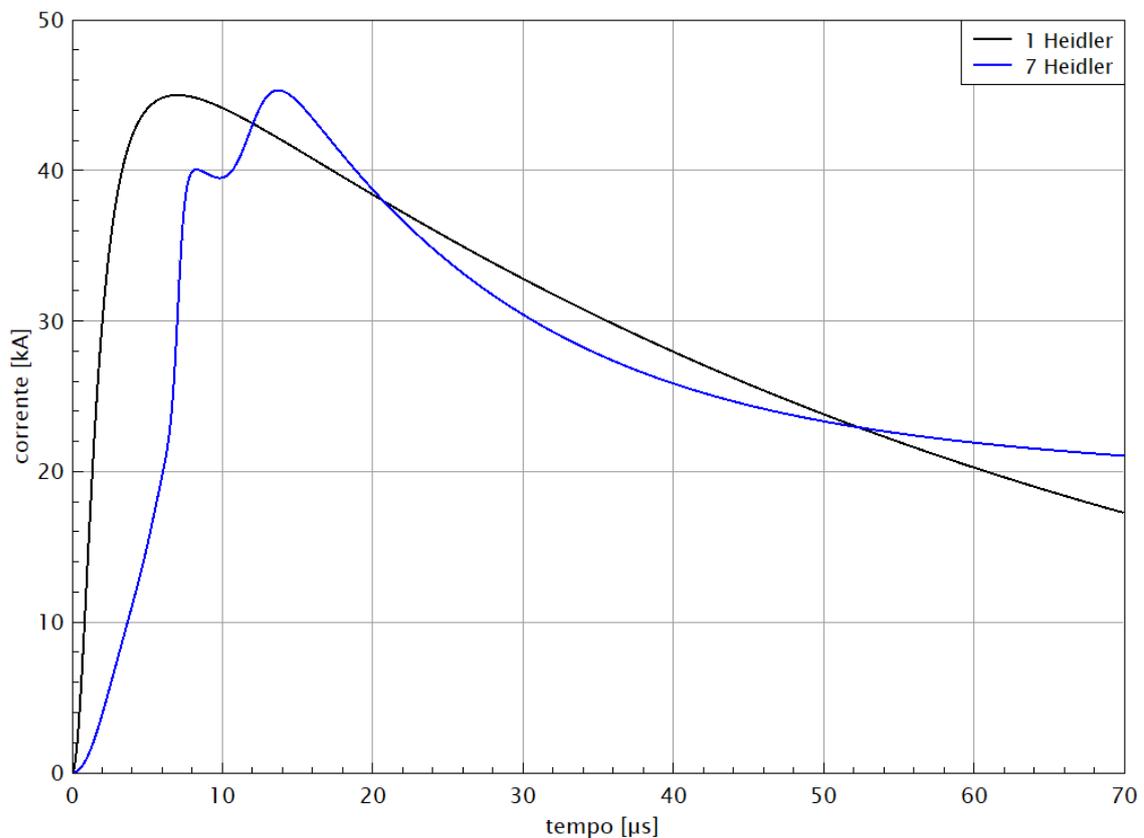
Tabela 14 – Parâmetros de entrada do modelo com 1 componente HEIDLER no ATPDraw.

Amplitude	T _f	tau	n
[A]	[s]	[s]	
45000	7	62	2

Fonte: autoria própria (2021).

Por conseguinte, a partir dos parâmetros da Tabela 14 e 13, os modelos de fonte com 1 e 7 HEIDLERS foram inseridos no ATPDraw, gerando as curvas da Figura 66.

Figura 66 – Representação de curvas medianas do Morro do Cachimbo através de 1 HEIDLER e 7 HEIDLER.

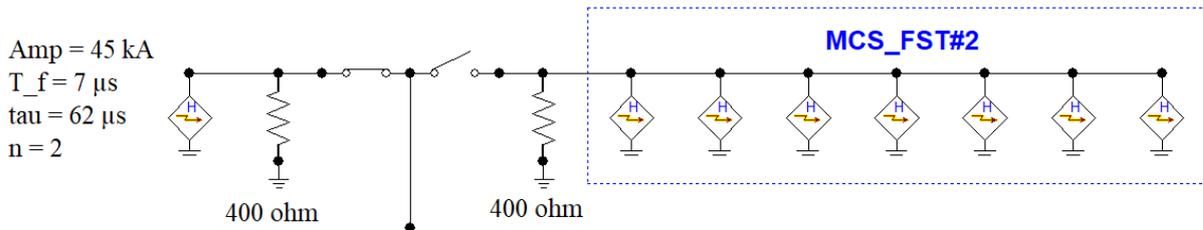


Fonte: autoria própria (2021).

Por fim, foi representada a impedância de canal de descarga através de uma resistência concentrada de valor 400Ω conectada em paralelo com os modelos das fontes, conforme

realizado por Fekete *et al.* (2010) e Souza (2020). A Figura 67 ilustra os dois modelos de fonte utilizados, com a habilitação coordenada através de elementos de chaves.

Figura 67 – Modelos de fonte utilizados nas simulações.



Fonte: autoria própria (2021).

3.5 Suportabilidade do isolador

De acordo com Eriksson *et al.* (1991), o comportamento da suportabilidade de isoladores frente a formas de onda não padronizadas pode ser presumido através de curvas de tensão em relação ao tempo, métodos de integração ou, ainda, o modelo físico, conhecido por modelo de propagação de líder. O modelo mais simples corresponde às curvas de tensão em relação ao tempo, as quais são desenvolvidas empiricamente e são aplicáveis de acordo com os parâmetros utilizados nos experimentos (ERIKSSON *et al.*, 1991).

Para os métodos de integração, segundo Eriksson *et al.* (1991), estes consistem em um método analítico elaborado a partir de resultados de experimentos com ondas de tensão padronizadas e visam prever o comportamento do isolador frente à ondas de tensão não padronizadas, de acordo com os parâmetros destas ondas. Ainda segundo Eriksson *et al.* (1991), as premissas mais comuns de todos os métodos de integração envolvem a caracterização de: uma tensão mínima para dar-se início ou continuidade do processo de ruptura do dielétrico; um tempo de ruptura dependente tanto da magnitude quanto da duração da tensão aplicada; um conjunto de constantes específicas dependentes da geometria do isolador.

Por fim, o modelo de progressão de líder é fundamentado nos processos físicos associados à ruptura da isolação, desde o início da fase de corona até a propagação de canais precursores e, por fim, a evolução do canal de líder (ERIKSSON *et al.*, 1991). Desta forma, este método é válido independentemente da geometria do isolador ou do formato da onda de tensão, entretanto, sua aplicação é de maior complexidade (ERIKSSON *et al.*, 1991).

A equação (39) configura uma curva de tensão de ruptura em função do tempo, de acordo com o comprimento do isolador (IMECE *et al.*, 1996). Esta equação baseia-se em uma onda padronizada e, portanto, pode ser imprecisa na previsão do comportamento da isolação frente à formas de onda não padronizadas (IMECE *et al.*, 1996). Ainda assim, para um formato de onda semelhante a um dos utilizados neste TCC, com diferença apenas no valor da impedância do canal de descarga, esta equação foi utilizada como um dos critérios de avaliação da suportabilidade do isolador por Giarola (2016), conforme ilustra a Figura 68 e, dada a praticidade de sua aplicação, a equação (39) foi utilizada para a representação a suportabilidade do isolador neste TCC.

$$V(t) = 400\ell + \frac{710\ell}{t^{0,75}} \quad (39)$$

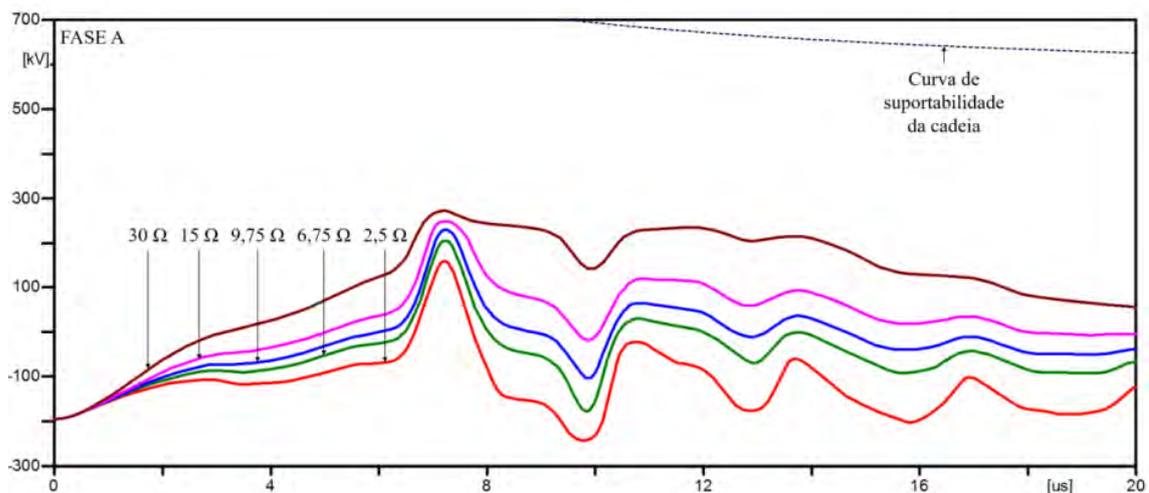
para a qual:

V : tensão de ruptura de isolamento [kV]

ℓ : comprimento do isolador [m]

t : tempo decorrido após incidência da descarga [μ s]

Figura 68 – Representações da estrutura de suporte no *software* ATPDraw.

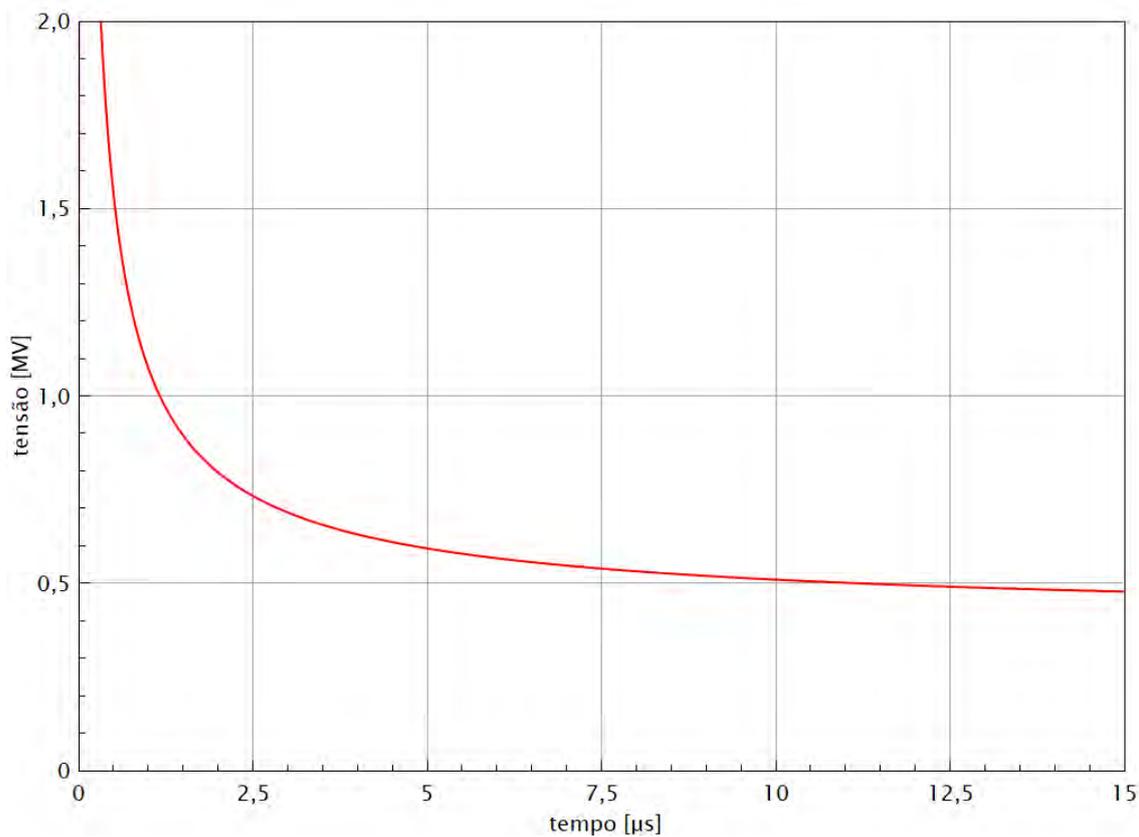


Fonte: (GIAROLA, 2016).

Desta forma, conforme o comprimento do isolador de 0,968 metro dado na seção 3.1, a Figura 69 representa a curva da equação (39) correspondente, limitada por um valor máximo

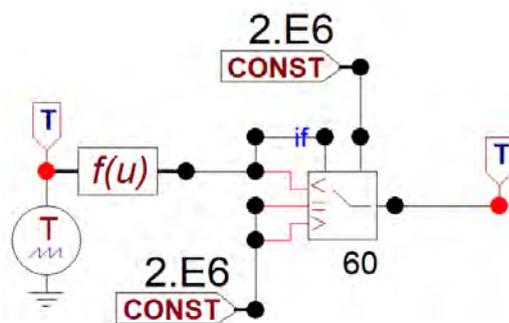
de 2 MV e implementada no ATPDraw através do circuito baseado em *Transient Analysis of Control Systems* (TACS) da Figura 70.

Figura 69 – Curva da suportabilidade do isolador.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 70 – Circuito TACS gerador da curva de suportabilidade utilizada.

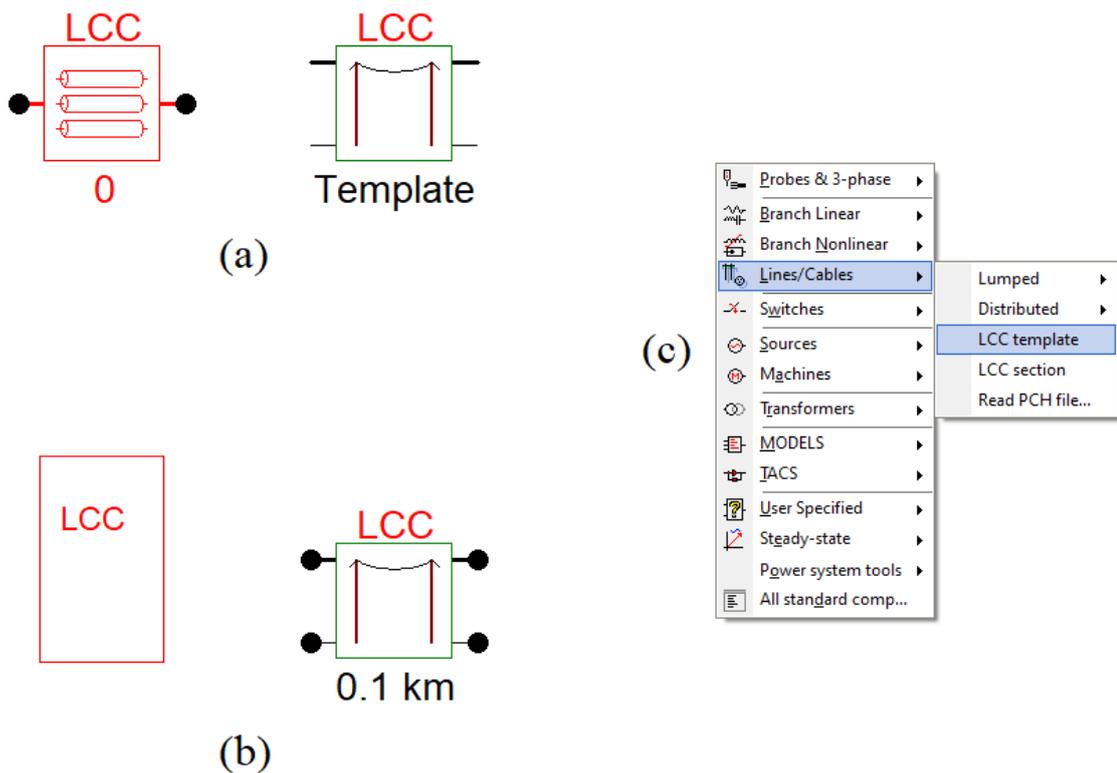


Fonte: autoria própria (2021).

3.6 Cabo guarda e condutores fase

O componente denominado *Line/Cable Data* no ATPDraw permite a caracterização de sistemas de cabos coaxiais monopolares e de linhas aéreas (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). A Figura 71 (a) representa o ícone deste componente em vermelho no momento de inserção na janela de circuito e em verde quando configurado como uma linha aérea. A quantidade e disposição dos nós do componente *Line/Cable Data* dependem de seus dados de entrada, descritos adiante. Ademais, conforme ilustra a Figura 71 (a), a configuração *Template* elege este componente para a condição de modelo e desabilita os pontos de conexão de seus nós.

Figura 71 – Componentes utilizados para a representação dos vãos e suas formas de inserção no ATPDraw.



Fonte: autoria própria (2021).

Por sua vez, o componente denominado LCC_ no ATPDraw é ilustrado na Figura 71 (b) em vermelho no momento de inserção na janela de circuito. Este componente herda todas as características de um componente modelo e permite a atribuição de um novo comprimento, conforme o ícone verde da Figura 71 (b) (HØIDALEN *et al.*, 2020). Para versões mais recentes do ATPDraw, como a 7.2, além do comprimento da linha, é possível atribuir ao

LCC_ frequências e resistividades do solo diferentes do componente modelo (HØIDALEN *et al.*, 2020). Por fim, ambos os componentes *Line/Cable Data* e LCC_ podem ser inseridos na janela de circuito através das opções *LCC template* e *LCC section* do menu ilustrado na Figura 71 (c).

3.6.1 Aba *Model* do componente *Line/Cable Data*

A Figura 72 retrata a aba *Model* da janela de diálogo do componente *Line/Cable Data* com uma das configurações utilizadas neste TCC. Para o quadro *System type* da Figura 72, o componente foi nomeado *span_69kV* através da caixa de texto rotulada *Name* e na lista suspensa imediatamente abaixo foi selecionado o item *Overhead Line*, configurando o componente como uma linha aérea.

Ainda referente ao quadro *System type* da Figura 72, a caixa de seleção rotulada *Template* permitiu eleger o componente como um modelo para coordenação dos componentes LCC_, ao passo que no campo rotulado *#Ph* foi possível selecionar o número de fases. Conforme descrito anteriormente, o número e a disposição dos nós do componente *Line/Cable Data* dependem de seus dados de entrada e, portanto, o cabo guarda foi modelado como uma quarta fase de forma a disponibilizar os pontos de conexão de seus nós, assim como realizado por Souza (2020).

Figura 72 – Aba *Model* do componente *Line/Cable Data*.

Fonte: autoria própria (2021).

Referente às demais caixas de seleção do quadro *System type* da Figura 72, a caixa *Transposed* permitiria a consideração da transposição dos condutores e a caixa *Auto bundling* facilitaria o cadastro de múltiplos condutores por fase (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Ainda referente às caixas de seleção supracitadas, a caixa *Skin effect* permitiu a consideração do efeito pelicular, descrito na seção 2.4.2 e, segundo Høidalen e Prikler (2009), não assinalar a caixa *Segmented ground* caracteriza os cabos guarda como continuamente aterrados. De acordo com Høidalen e Prikler (2009), a seleção da caixa *Real transf. matrix* é recomendada para simulações de transitórios e promove a rotação dos autovetores da matriz de transformação para mais próximos do eixo real, desprezando suas partes imaginárias. Por fim, no quadro *Units* foi selecionada a opção *Metric* correspondente ao sistema de unidades métrico (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

Na lista de opções do quadro *Model* da Figura 72 é possível escolher dentre os diferentes modelos de linhas disponíveis no ATP, cada qual com suas condições de contorno e parâmetros de entrada (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Neste TCC foi utilizado o modelo JMarti de Marti (1982), o qual é dependente da frequência e amplamente utilizado na representação de linhas aéreas sob efeitos de transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas (SOUZA, 2020; ALMEIDA *et al.*, 2021; MIRANDA, 2019; FEKETE *et al.*, 2010; PECHIR, 2020; OLIVEIRA, 2018).

Para o quadro *Data* da Figura 72, nas caixas de texto *Decades* e *Points/Dec* foram inseridos valores típicos de décadas, bem como de pontos por década especificados em (Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002). De acordo com Høidalen e Prikler (2009), o parâmetro *Freq. Matrix* representa a frequência para qual a matriz de transformação é calculada e deve ser a frequência dominante do fenômeno estudado, ao passo que o parâmetro *Freq. SS* corresponde à frequência em regime permanente.

Para o quadro *Standard data* da Figura 72, na caixa de texto rotulada *Rho* é possível inserir a resistividade do solo em $\Omega.m$ (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). De acordo com o Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP (2002), para o modelo JMarti o parâmetro *Freq. init* corresponde à frequência inicial para o cálculo da impedância característica e da função de propagação e apresenta o valor típico 0,01 Hz. Por fim, é possível especificar o comprimento da linha através do parâmetro *Length* (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

3.6.2 Aba *Data* do componente *Line/Cable Data*

A Figura 73 ilustra a aba *Data* da caixa de diálogo do componente *Line/Cable Data*, onde foram cadastrados os parâmetros do cabo guarda e dos condutores fase. A coluna *Ph no.* contém o número de referência das fases 1, 2 e 3, correspondentes às fases A, B e C, enquanto o número de referência 4 foi utilizado para o cabo guarda. Os parâmetros *Rin* e *Rout* correspondem aos raios interno e externo do condutor em centímetros e o parâmetro *Resis* representa a resistência em corrente contínua dada em Ω/km (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

Figura 73 – Aba Data do componente *Line/Cable Data*.

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.4635	1.2575	0.1096	-0.947	23	22.287
2	2	0.4635	1.2575	0.1096	0.947	21.5	20.787
3	3	0.4635	1.2575	0.1096	-0.947	20	19.287
4	4	0.2385	0.7155	0.2667	0	25.5	24.787

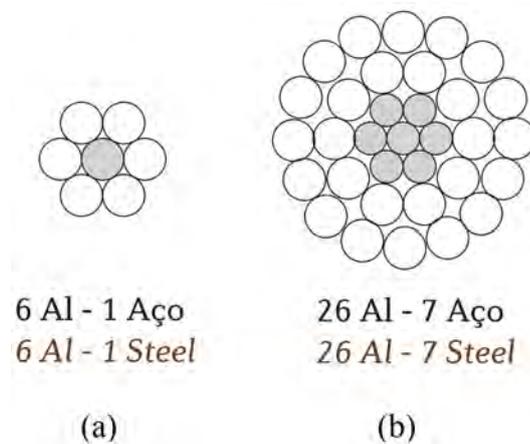
Fonte: autoria própria (2021).

Conforme informado na seção 3.1, o cabo guarda é do tipo *Penguin* e os condutores de fase são do tipo *Grosbeak*. Desta forma, a partir do catálogo de referência Alubar (2015) foram obtidos os valores necessários para a representação dos condutores no ATPDraw. Tratam-se de condutores de alumínio com alma⁷ de aço e, assim como utilizado por Tavares *et al.* (2003) e Souza (2020), o raio interno corresponde ao raio da alma.

Isso posto, a Figura 74 (a) representa a seção transversal do condutor *Penguin*, da qual é possível observar como o raio de sua alma é equivalente ao raio do seu fio de aço. Por outro lado, o condutor *Grosbeak* apresenta formação 26/7 e é ilustrado na Figura 74 (b), a qual permite observar como o raio de sua alma é equivalente à três vezes o raio do seu fio de aço. Assim, a partir dos diâmetros dos fios de aço e dos diâmetros nominais dos cabos, obtidos de Alubar (2015), foram inferidos os parâmetros *Rin* e *Rout* da Figura 73.

⁷Segundo a ABNT (1986), o termo alma caracteriza um fio ou conjunto de fios que formam o núcleo central de um cabo, com o objetivo de aumentar sua resistência mecânica

Figura 74 – Seção transversal dos condutores *Penguin* e *Grosbeak*.



Fonte: adaptado de Alubar (2015).

Conforme descrito na seção 2.4.2, a resistência elétrica de condutores varia de acordo com a sua temperatura. Portanto, para o condutor *Grosbeak*, é necessário adequar o valor de resistência à corrente contínua a 20 °C obtido do catálogo de referência Alubar (2015) para a sua correta representação na condição de temperatura de operação de 75 °C, informada na seção 3.1. Com a aplicação da equação (6), este tratamento é ilustrado pela equação (40).

$$R_{op} \cong 0,0897 \, \Omega \left[1 + 0,00403 \, ^\circ\text{C}^{-1} (75 \, ^\circ\text{C} - 20 \, ^\circ\text{C}) \right] \cong 0,1096 \, \Omega \quad (40)$$

para a qual:

R_{op} : resistência elétrica à corrente contínua do condutor *Grosbeak* para temperatura de operação de 75 °C

Quanto aos demais parâmetros da Figura 73, estes especificam a disposição dos condutores através de distâncias em metros. O parâmetro *Horiz* corresponde à distância horizontal entre o centro do condutor e uma linha vertical de referência, tipicamente o eixo central da estrutura (HØIDALEN; PRIKLER, 2009; Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP, 2002). O parâmetro *Vtower* representa a altura do condutor no ponto de suspensão e, por fim, o parâmetro *Vmid* caracteriza a altura do condutor no meio do vão (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

Para o cabo guarda, o parâmetro *Horiz* é nulo pois ele se encontra sobre a linha de referência, enquanto para os condutores fase este parâmetro foi determinado considerando o

comprimento do isolador e sua inclinação informados na seção 3.1 e desprezando o raio do poste. Para o parâmetro V_{tower} foram utilizadas as alturas dos condutores da Figura 56. Por fim, o parâmetro V_{mid} foi determinado através da equação (41).

$$V_{mid} = V_{tower} - f \quad (41)$$

para a qual:

V_{mid} : altura do condutor no meio do vão

V_{tower} : altura do condutor no ponto de suspensão

f : flecha do condutor

Desta forma, foi necessário determinar a flecha dos condutores. Utilizando-se das informações do catálogo de referência Alubar (2015) e considerando a tração horizontal como o valor limite para cabos de alumínio com alma de aço, correspondente à 20 % da carga de ruptura de acordo com a ABNT (1985), além do vão de 100 metros informado na seção 3.1, foi calculada a flecha do condutor *Grosbeak* através da equação (42), correspondente à aplicação da equação (8) descrita na seção 2.4.2.2. Para o cabo guarda, sua flecha foi considerada equivalente ao do condutor fase.

$$f \cong \frac{1,302 \text{ kgf/m} \cdot (100 \text{ m})^2}{8 (2281,513 \text{ kgf})} \cong 0,7132 \text{ m} \quad (42)$$

para a qual:

f : flecha do condutor

3.7 Modelo final

A Figura 75 ilustra o modelo do trecho da linha utilizado nas simulações, constituído de todos os blocos descritos neste capítulo. Sem uma modelagem detalhada das subestações, o trecho da linha foi modelado objetivando-se apresentar uma extensão suficiente para que as reflexões provenientes da extremidade da linha não interfiram nas sobretensões nos isoladores da estrutura atingida pela descarga atmosférica. A partir de simulações iniciais, mostrou-se interesse no intervalo de observação de até 15 μs e, dado o conceito de tempo de trânsito, neste intervalo as ondas propagam-se por 4,5 km. Desta forma, considerando que a descarga incide

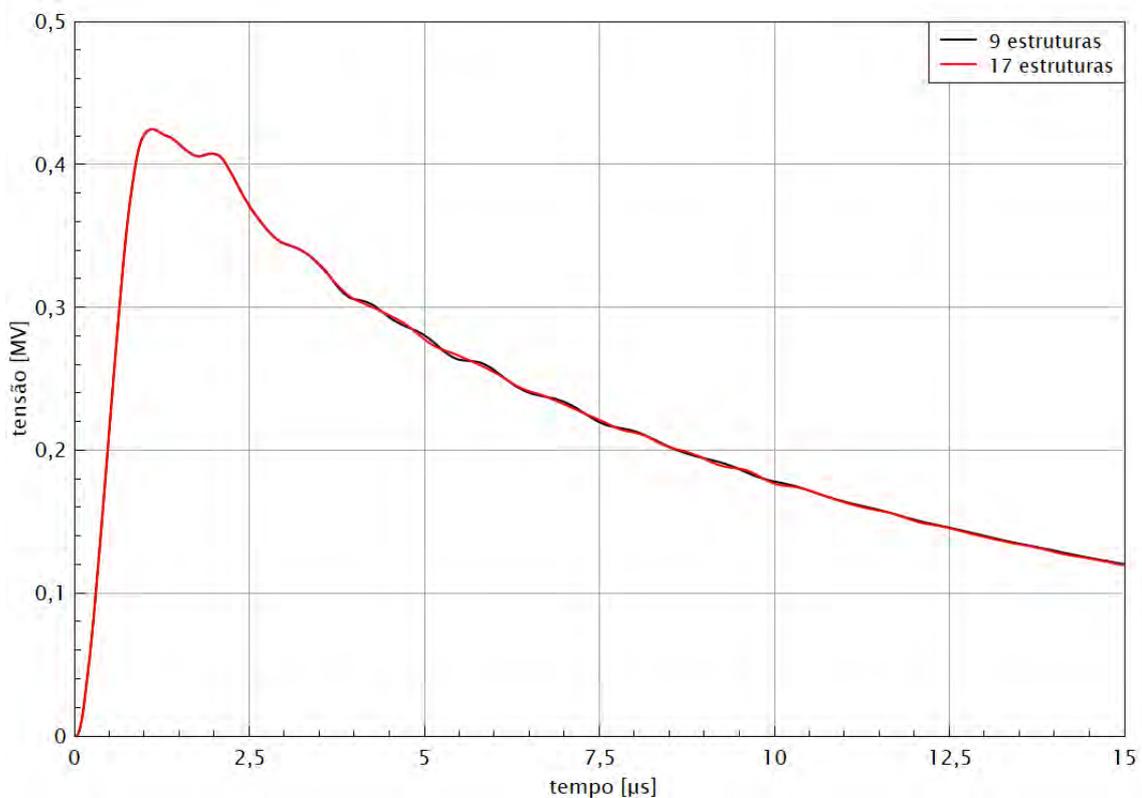
no topo de uma estrutura no centro da linha, é necessário um comprimento mínimo de 2,25 km para cada lado do ponto de incidência para evitar interferências nas medições das sobretensões na estrutura atingida. Isso posto, além dos componentes LCC_ de comprimento 0,1 km para a representação dos vãos, foi utilizado um componente LCC_ de comprimento 5 km em cada extremidade do modelo, conforme a Figura 75.

Segundo Høidalen e Prikler (2009), o passo de integração da simulação deve ser inferior ao tempo de trânsito da linha. A menor linha deste modelo corresponde ao componente LINEZT_1 com comprimento 1,5 metro, encontrado tanto entre as bases dos isoladores A e B quanto entre as bases dos isoladores B e C. Desta forma, o tempo de trânsito correspondente a este comprimento é de 5 ns, o qual foi observado como o menor valor possível para a compilação do ATP sem alertas de erro e, portanto, foi utilizado como o passo de integração em todas as simulações.

Conforme descrito por Zanetta Júnior (2003), normalmente são modeladas algumas torres próximas ao ponto de injeção de corrente para considerar o efeito das reflexões ocorrentes nestas estruturas. Desta forma, foi necessário determinar o número de estruturas/vãos a serem modelados no ATPDraw. Diversos valores são considerados pela literatura, como 3 (MIRANDA, 2019), 6 (SOUZA, 2020), 6 a 8 (ASSIS *et al.*, 2017), 7 (ZAWANI *et al.*, 2013; GIAROLA, 2016), 10 (FEKETE *et al.*, 2010) e 15 (VELASCO; ARANDA, 2010).

Presume-se que um maior número de estruturas detalhadas resulte em formas de onda mais fiéis à realidade. Desta forma, buscando melhor entendimento deste fator, foram realizadas simulações considerando 9 e 17 estruturas, cujas sobretensões no isolador da fase C da estrutura atingida constam na Figura 76. Dado o conceito de tempo de trânsito, espera-se que a ausência de uma quinta estrutura adjacente no modelo de 9 estruturas cause impactos nas sobretensões da estrutura central somente após aproximadamente $3,33 \mu\text{s}$. Ao passo que para o modelo de 17 estruturas, a ausência de uma nona estrutura adjacente à atingida provoca impactos nas sobretensões da estrutura atingida somente após aproximadamente $6 \mu\text{s}$.

Figura 76 – Comparação entre sobretensões obtidas com 9 e 17 estruturas.



Fonte: autoria própria (2021).

Assim, esperava-se uma diferença entre os valores das sobretensões na estrutura

atingida para os dois cenários a partir de aproximadamente $3,33 \mu s$ e, comparando-se os arquivos de saída, esta diferença ocorreu em $3,325 \mu s$. Ainda assim, o módulo do erro é desprezível, conforme pode-se observar na Figura 76. Este comportamento é justificado pois as reflexões provenientes de estruturas tão distantes do ponto de injeção de corrente encontram-se demasiadamente atenuadas e, portanto, sem motivos em aumentar o número de estruturas detalhadas, foram utilizadas 9 estruturas em todas as simulações.

Assim como descrito anteriormente, segundo Coelho e Raizer (2021), a frequência de descargas atmosféricas varia de algumas dezenas até algumas centenas de kHz. Deste modo, buscando estudar o efeito do parâmetro *Freq. Matrix* correspondente à frequência dominante do fenômeno, foram realizadas simulações considerando a frequência de 30 kHz e 300 kHz. Nestes cenários, houve diferença em todos os pontos das ondas de tensão na estrutura central, entretanto, para a fonte de 1 Heidler, por exemplo, o aumento da frequência resultou em uma diferença percentual média da ordem de somente 0,2 % nos valores da onda de tensão do isolador da fase C da estrutura central e, portanto, foi adotado 30 kHz em todas as simulações.

3.8 Considerações finais

Na seção 3.1 foram apresentadas todas as características da linha de distribuição modelada. Em seguida, foram apresentadas todas as premissas utilizadas para a elaboração de cada bloco que constitui o modelo final.

Inicialmente, as considerações para o cálculo da impedância de surto da estrutura de suporte e sua representação no *software* ATPDraw foram realizadas nas seções 2.6.4 a 3.2.1, ao passo que a modelagem da impedância impulsiva de aterramento foi descrita na seção 3.3.

Quanto ao fenômeno de descargas atmosféricas, os modelos de fonte considerados foram elaborados na seção 3.4. Posteriormente, a suportabilidade do isolador e a modelagem do cabo guarda e dos condutores fase foram caracterizadas nas seções 3.5 e 3.6.

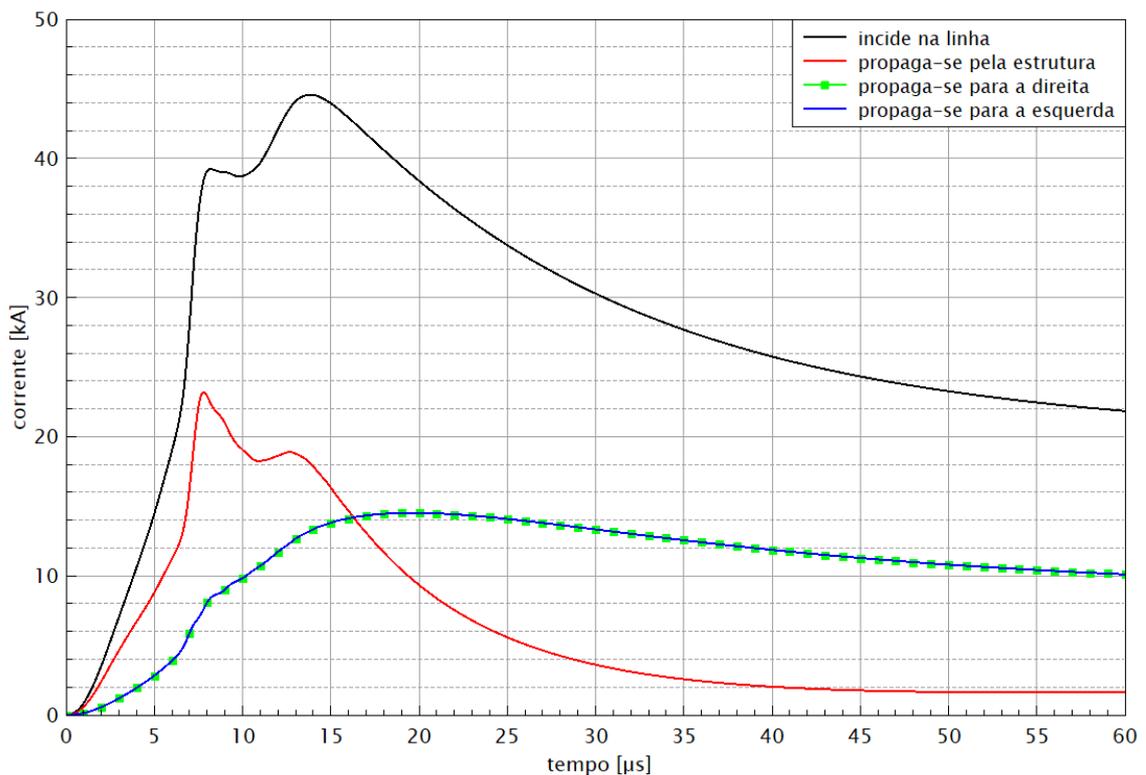
Por fim, na seção 3.7 foi apresentado o modelo final, empregado nas simulações dos cenários analisados no capítulo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Considerações iniciais

A partir da Figura 77 é possível observar como a onda de corrente oriunda da fonte de descarga divide-se em três componentes, duas destas apresentam igual magnitude e propagam-se pelo cabo guarda em sentidos opostos, enquanto a terceira propaga-se pela estrutura central. Como na Figura 77 foi analisado um intervalo de tempo de até $60 \mu\text{s}$, apenas nesta simulação foi considerado um comprimento de 10 km para os componentes LCC_ de cada extremidade, a fim de satisfazer a extensão necessária para impedir que reflexões da extremidade da linha interfiram em medições na estrutura central.

Figura 77 – Comportamento da onda de corrente injetada na linha.



Fonte: autoria própria (2021).

Conforme descrito no capítulo 3, foram adotados dois modelos de fonte de descarga atmosférica com um ou sete componentes HEIDLER, ambos com uma impedância de canal de descarga de 400Ω . Além disso, foram variadas as resistividades do solo de $300 \Omega\cdot\text{m}$, $2000 \Omega\cdot\text{m}$ e $4000 \Omega\cdot\text{m}$, além de considerada a impedância de aterramento de baixa frequência na condição

regular, estipulada em 20Ω , bem como irregular, compreendendo valores de 75Ω e 150Ω . A condição de aterramento irregular foi considerada tanto no poste central quanto no poste imediatamente adjacente.

Convém destacar que diante da alta complexidade envolvida na obtenção de detalhes de sistemas de aterramento de linhas, presumiu-se valores constantes para todas as resistências de baixa frequência utilizadas, tanto para condições regulares quanto irregulares. Ressalta-se, ainda, que solos com condições desfavoráveis, com altos valores de resistividade, podem requerer medidas adicionais para a obtenção de baixas impedâncias de aterramento, as quais são de difícil implementação em simulações computacionais.

Quanto aos resultados, as sobretensões nos isoladores das fases A, B e C apresentaram formas de onda similares, pois os componentes LINEZT_1, os quais representam o condutor de descida entre suas ferragens, apresentam comprimentos reduzidos e impedâncias semelhantes, resultando em poucas reflexões entre eles. Isso posto, as Tabelas 15, 16 e 17 representam os percentuais de tempo relativos aos 3000 pontos de cada simulação, em que cada isolador das fases A, B e C apresentou o maior valor de tensão. Destas tabelas é possível inferir que isolador da fase C estava sob a maior sobretensão durante a maior parte do tempo em todos os cenários e, portanto, foi utilizado como referência para as demais análises deste TCC.

Tabela 15 – Percentual de tempo em que cada isolador da estrutura central apresentou o maior valor de tensão para a condição de aterramento regular.

ρ [Ω .m]	R_{BF} [Ω]	Z_P [Ω]	1 HEIDLER			7 HEIDLER		
			A	B	C	A	B	C
300	20	18,98	1,83 %	7,07 %	91,10 %	1,93 %	11,07 %	87,00 %
2000	20	16,68	1,90 %	8,87 %	89,23 %	2,00 %	14,60 %	83,40 %
4000	20	14,75	1,97 %	10,27 %	87,77 %	2,07 %	20,03 %	77,90 %

Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 16 – Percentual de tempo em que cada isolador da estrutura central apresentou o maior valor de tensão para a condição de aterramento irregular na estrutura central.

ρ [Ω .m]	R_{BF} [Ω]	Z_P [Ω]	1 HEIDLER			7 HEIDLER		
			A	B	C	A	B	C
300	75	71,17	1,00 %	2,87 %	96,13 %	1,13 %	3,17 %	95,70 %
2000	75	62,54	1,03 %	3,47 %	95,50 %	1,33 %	3,70 %	94,97 %
4000	75	55,32	1,03 %	3,97 %	95,00 %	1,43 %	4,37 %	94,20 %
300	150	142,35	1,00 %	1,33 %	97,67 %	1,03 %	1,47 %	97,50 %
2000	150	125,08	1,00 %	1,67 %	97,33 %	1,07 %	1,80 %	97,13 %
4000	150	110,60	1,00 %	1,97 %	97,03 %	1,07 %	2,17 %	96,77 %

Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 17 – Percentual de tempo em que cada isolador da estrutura central apresentou o maior valor de tensão para a condição de aterramento irregular na estrutura adjacente.

ρ [Ω .m]	R_{BF} [Ω]	Z_P [Ω]	1 HEIDLER			7 HEIDLER		
			A	B	C	A	B	C
300	75	71,17	1,83 %	7,13 %	91,03 %	1,93 %	11,10 %	86,97 %
2000	75	62,54	1,90 %	8,90 %	89,20 %	2,00 %	14,37 %	83,63 %
4000	75	55,32	1,97 %	10,30 %	87,73 %	2,07 %	19,93 %	78,00 %
300	150	142,35	1,83 %	7,17 %	91,00 %	1,93 %	11,10 %	86,97 %
2000	150	125,08	1,90 %	8,93 %	89,17 %	2,00 %	14,37 %	83,63 %
4000	150	110,60	1,97 %	10,30 %	87,73 %	2,07 %	19,83 %	78,10 %

Fonte: autoria própria (2021).

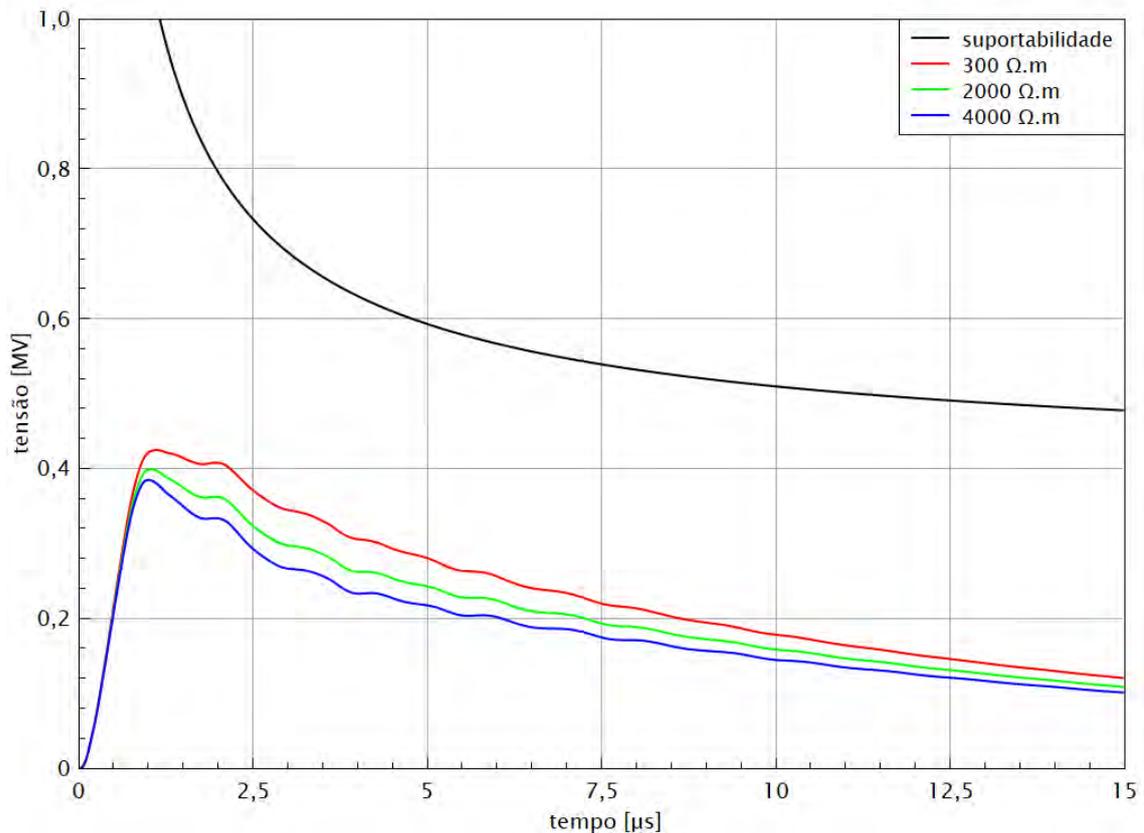
4.2 Resultados

4.2.1 Simulações com aterramento regular

“Em engenharia de proteção, o parâmetro estatístico valor mediano desperta mais interesse do que valor médio, pois representa a condição de maior representatividade da

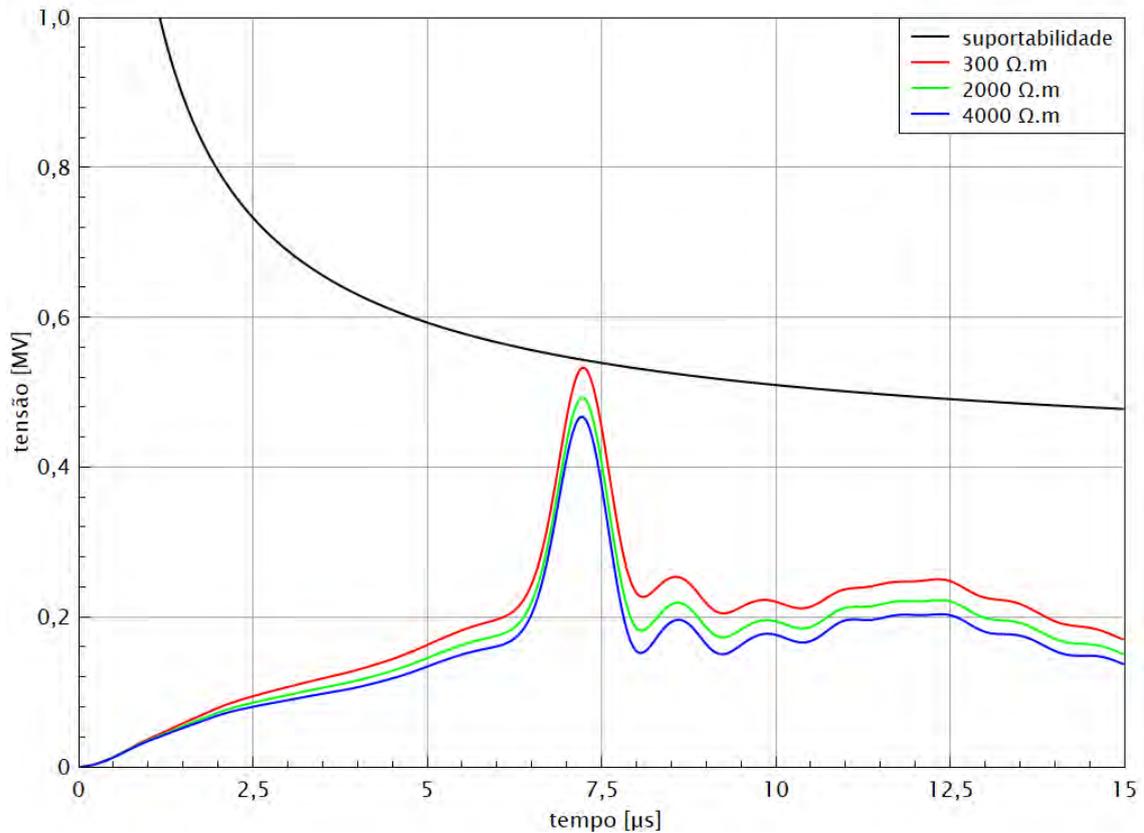
frequência [...]” (VISACRO, 2005, p. 76). Desta forma, presume-se que 50 % das descargas atmosféricas provocam sobretensões mais severas do que as resultantes e a outra metade provoca sobretensões mais brandas. As Figuras 78 e 79 ilustram o comportamento das ondas de sobretensão para a estrutura central, considerando diferentes valores de resistividade do solo.

Figura 78 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para diferentes valores de resistividade do solo - 1 Heidler.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 79 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para diferentes valores de resistividade do solo - 7 Heidler.



Fonte: autoria própria (2021).

É possível observar que quanto maior for a resistividade do solo, menor as sobretensões, assim como exposto na Tabela 18. Este comportamento é justificado, pois maiores resistividades do solo configuram uma maior redução nos valores de impedâncias impulsivas e caracterizam coeficientes de reflexão reduzidos, de acordo com a equação (17), culminando em menores reflexões no ponto de descontinuidade, estas responsáveis por atenuar a sobretensão resultante através de interferências destrutivas segundo a seção 2.6.2.

Tabela 18 – Valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular.

ρ	R_{BF}	Z_P	1 HEIDLER	7 HEIDLER
[$\Omega.m$]	[Ω]	[Ω]	[kV]	[kV]
300	20	18,98	424,6	532,5
2000	20	16,68	398,9	492,6
4000	20	14,75	384,7	467,1

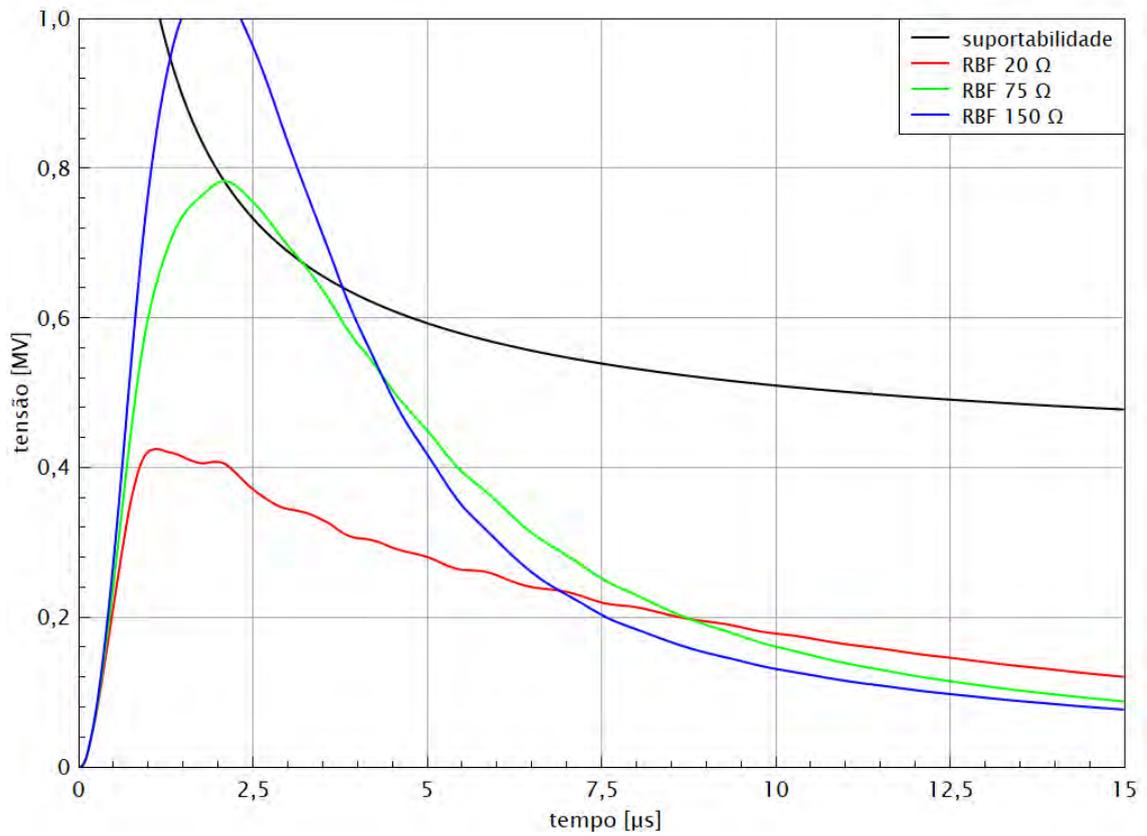
Fonte: autoria própria (2021).

Ainda referente às Figuras 78 e 79, é possível observar que apesar de os formatos de onda para fontes de 1 e 7 HEIDLER serem semelhantes, com mesmo valor de pico, conforme visto na Figura 66, suas sobretensões resultantes apresentam diversas diferenças. Além disso, independentemente da fonte de descarga com 7 HEIDLERS apresentar dois picos, sua sobretensão resultante apresenta somente um pico. Neste cenário, em relação à sua análoga de 1 HEIDLER, este pico encontra-se defasado em relação ao tempo, além de apresentar um valor superior. Este comportamento pode ser parcialmente explicado porque o intervalo de simulação utilizado, de até $15 \mu s$, representa o intervalo de maior diferença nas formas de onda de descarga, especialmente quando analisada a inclinação inicial.

4.2.2 Simulações com aterramento irregular na estrutura central

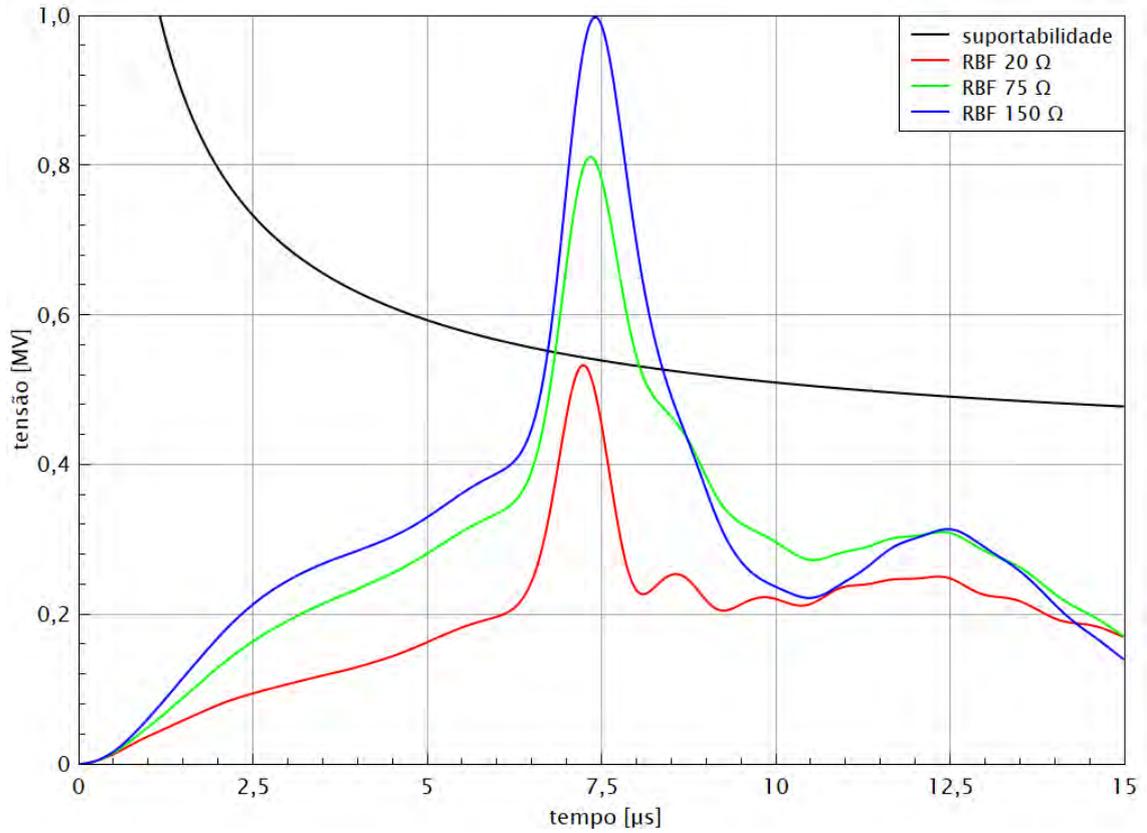
Por sua vez, para a condição de aterramento irregular na estrutura central, foram observadas grandes mudanças no formatos de onda, além de valores de pico muito elevados assim como ilustrado pelas Figuras 80, 81, 82, 83, 84 e 85. Este comportamento era esperado pois o aumento da impedância de baixa frequência e, conseqüentemente, da impedância impulsiva, caracteriza um aumento no coeficiente de reflexão, uma diminuição das ondas refletidas na base da estrutura e, portanto, uma maior sobretensão resultante nos isoladores.

Figura 80 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 1 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$.



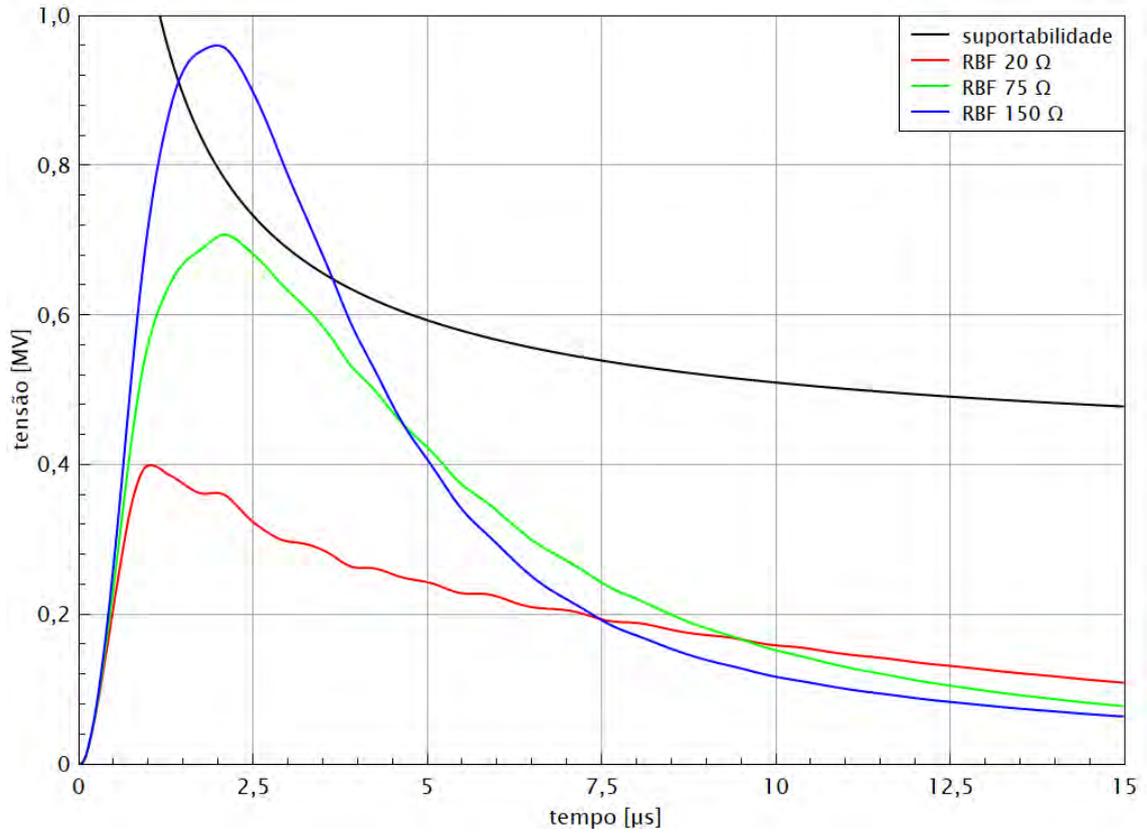
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 81 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$.



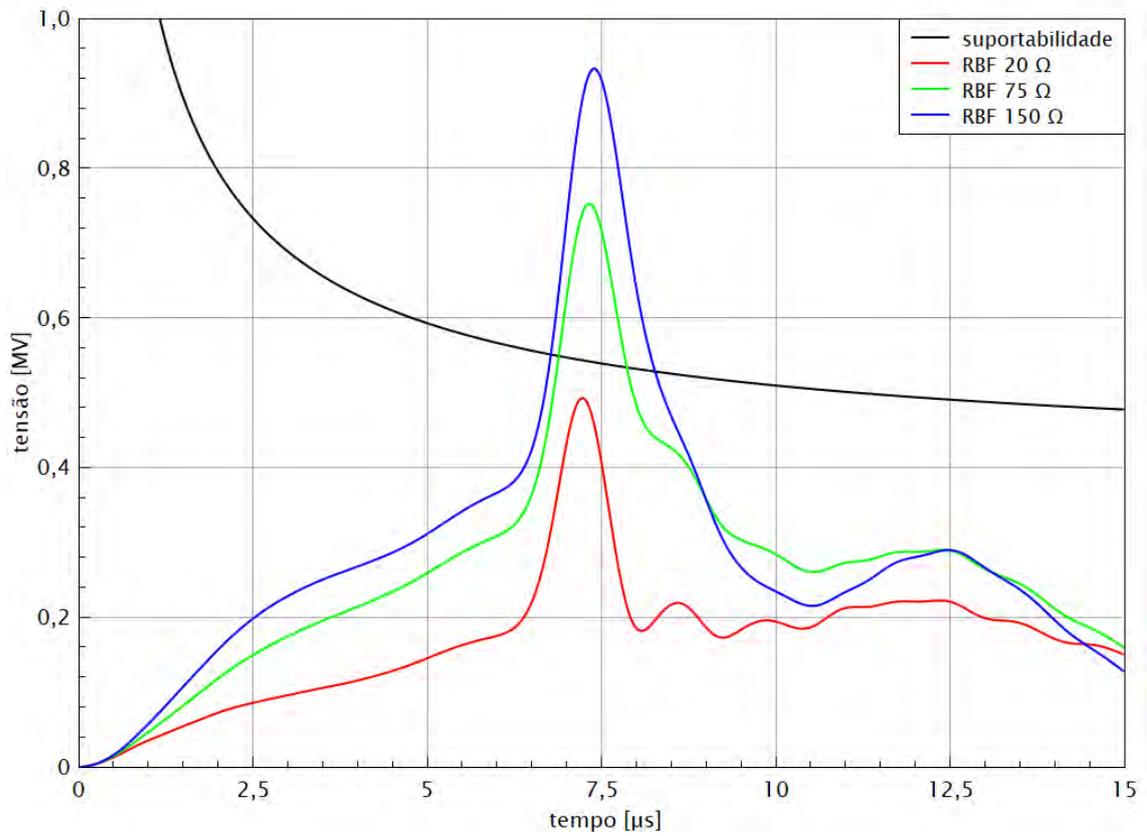
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 82 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 1 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$.



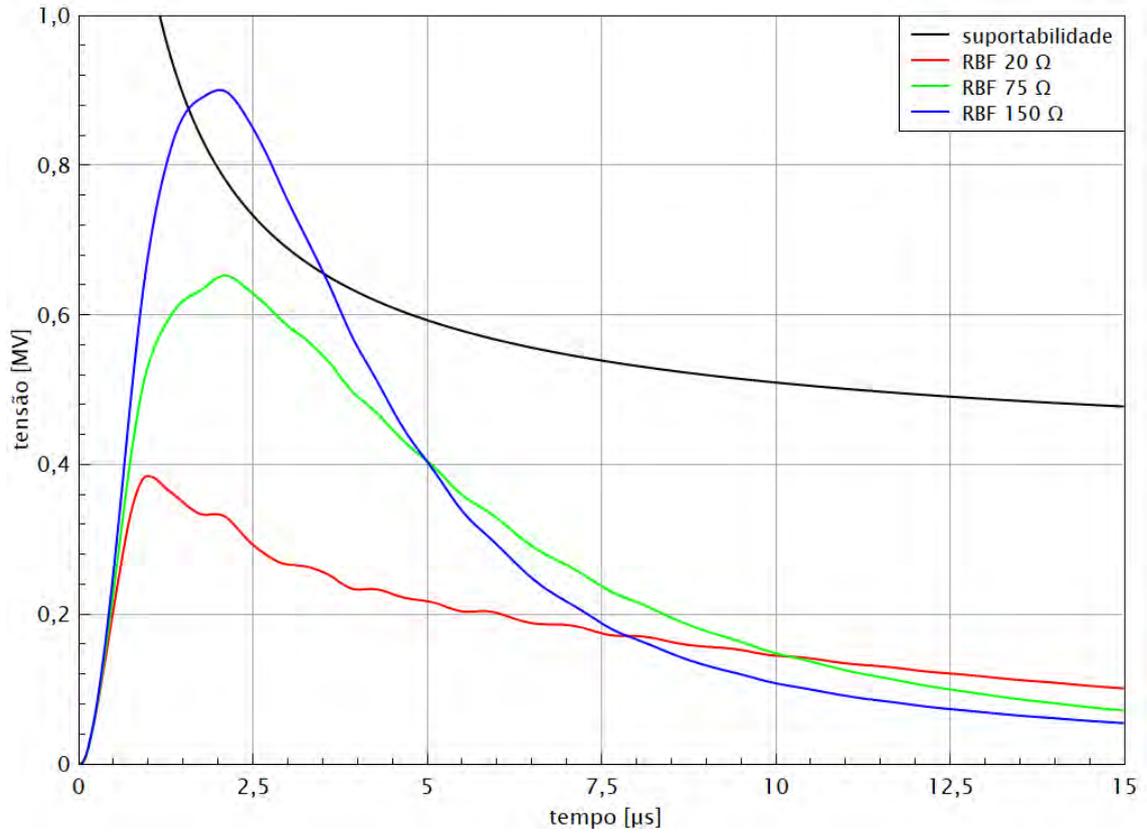
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 83 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$.



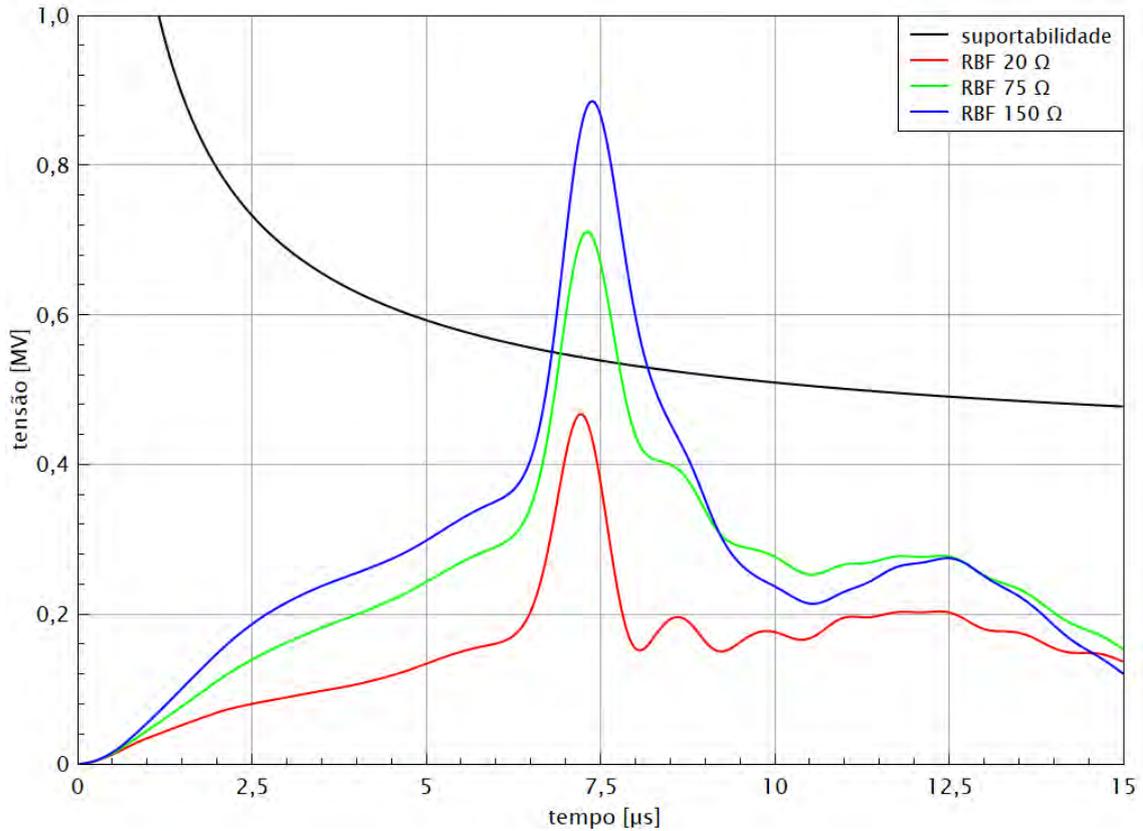
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 84 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 1 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 85 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura central - 7 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$.



Fonte: autoria própria (2021).

A Tabela 19 retrata os valores máximos de sobretensão encontrados. Conforme visto na seção 2.5.5, o coeficiente impulsivo e , conseqüentemente, a impedância impulsiva decaem com o aumento da resistividade do solo. Isso posto, com o aumento da resistividade do solo foi observado menores valores de sobretensão, assim como visto para a condição de aterramento regular. Quando comparadas aos valores da Tabela 18, os valores de sobretensão obtidos com um aterramento irregular de resistência de baixa frequência de 75Ω apresentaram um aumento de até 84,39 % para 1 HEIDLER e 52,28 % para 7 HEIDLER. Por sua vez, para uma resistência de 150Ω , foi observado um aumento de até 144,91 % para 1 HEIDLER e até 89,51 % para 7 HEIDLER. Ademais, de forma semelhante à condição de aterramento regular, o aumento da resistividade do solo resultou na redução da sobretensão resultante.

Tabela 19 – Valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular na estrutura central.

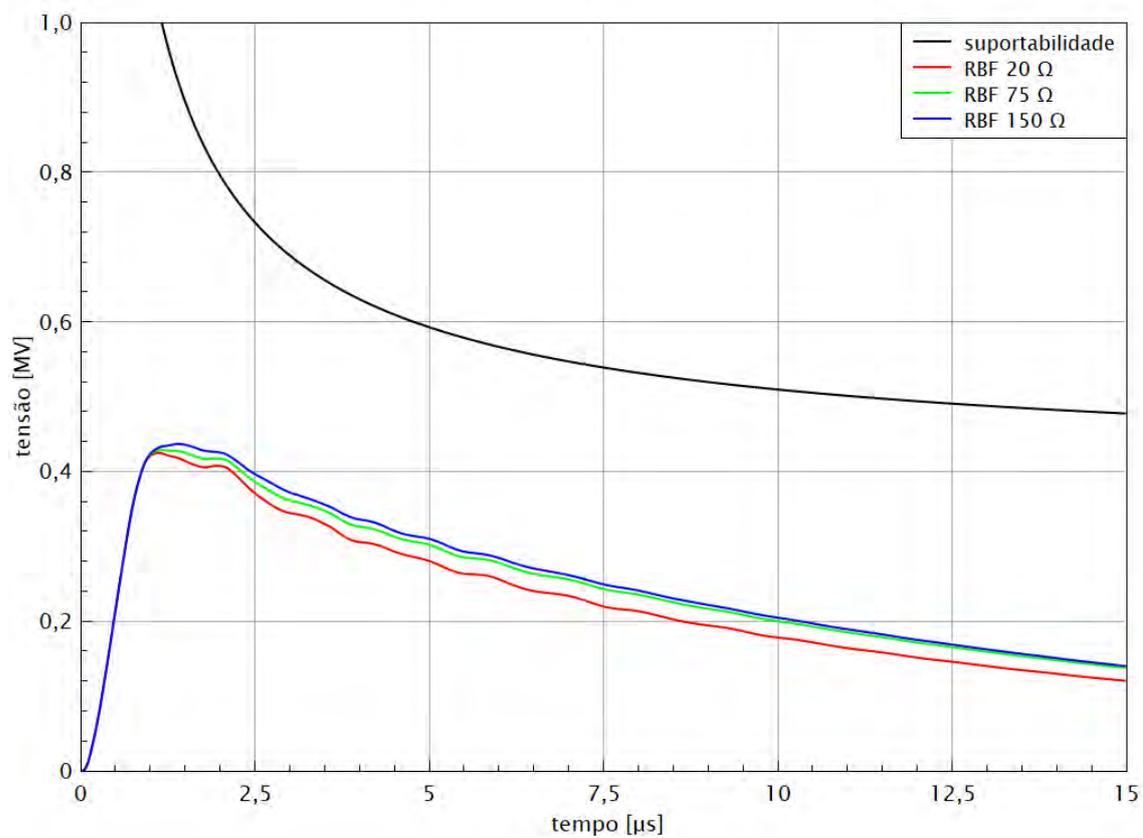
ρ	R_{BF}	Z_P	1 HEIDLER	7 HEIDLER
[Ω .m]	[Ω]	[Ω]	[kV]	[kV]
300	75	71,17	782,9	810,9
2000	75	62,54	707,1	752,3
4000	75	55,32	652,6	711,0
300	150	142,35	1039,8	997,7
2000	150	125,08	959,6	932,7
4000	150	110,60	900,2	885,2

Fonte: autoria própria (2021).

4.2.3 Simulações com aterramento irregular na estrutura adjacente

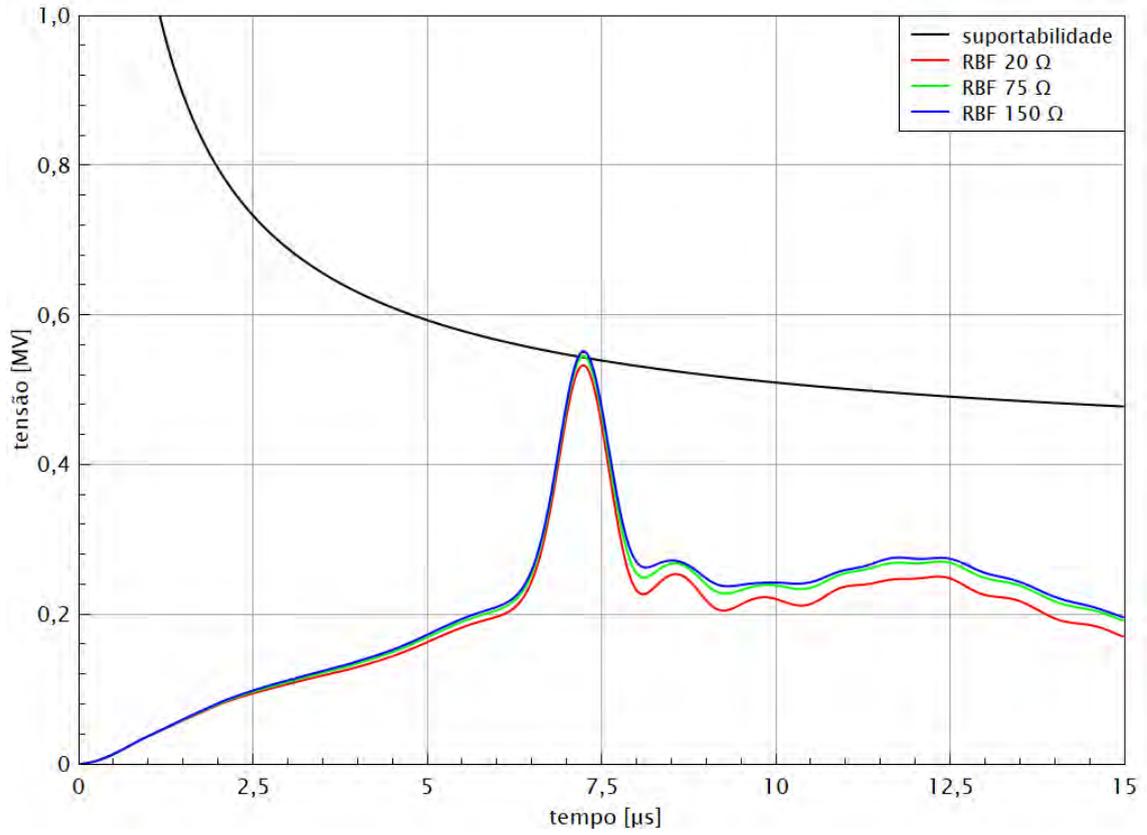
Por fim, conforme ilustrado pelas Figuras 86, 87, 88, 89, 90 e 91, para a condição de aterramento irregular na estrutura adjacente, não foram observadas diferenças significativas no formato de onda da sobretensão nos isoladores da estrutura central quando comparados à condição de aterramento regular, dadas anteriormente pelas Figuras 78 e 79.

Figura 86 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 1 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$.



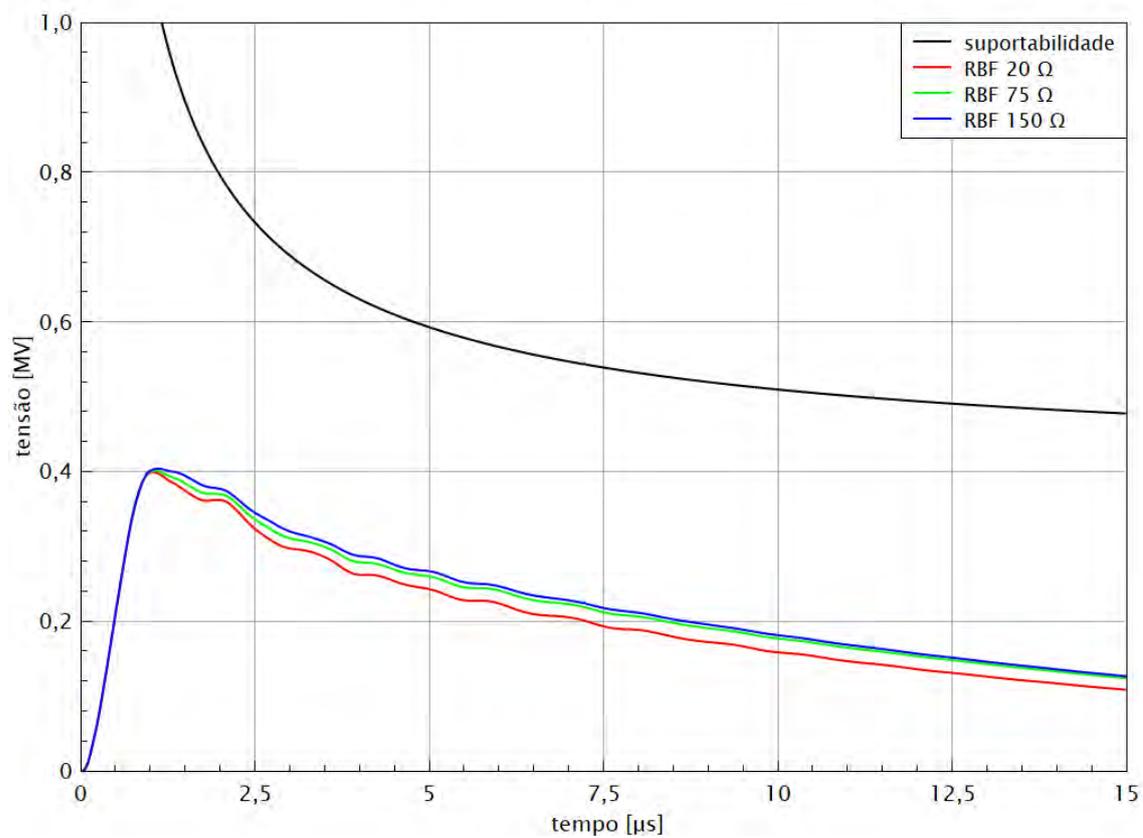
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 87 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 7 Heidler - $\rho = 300 \Omega.m$.



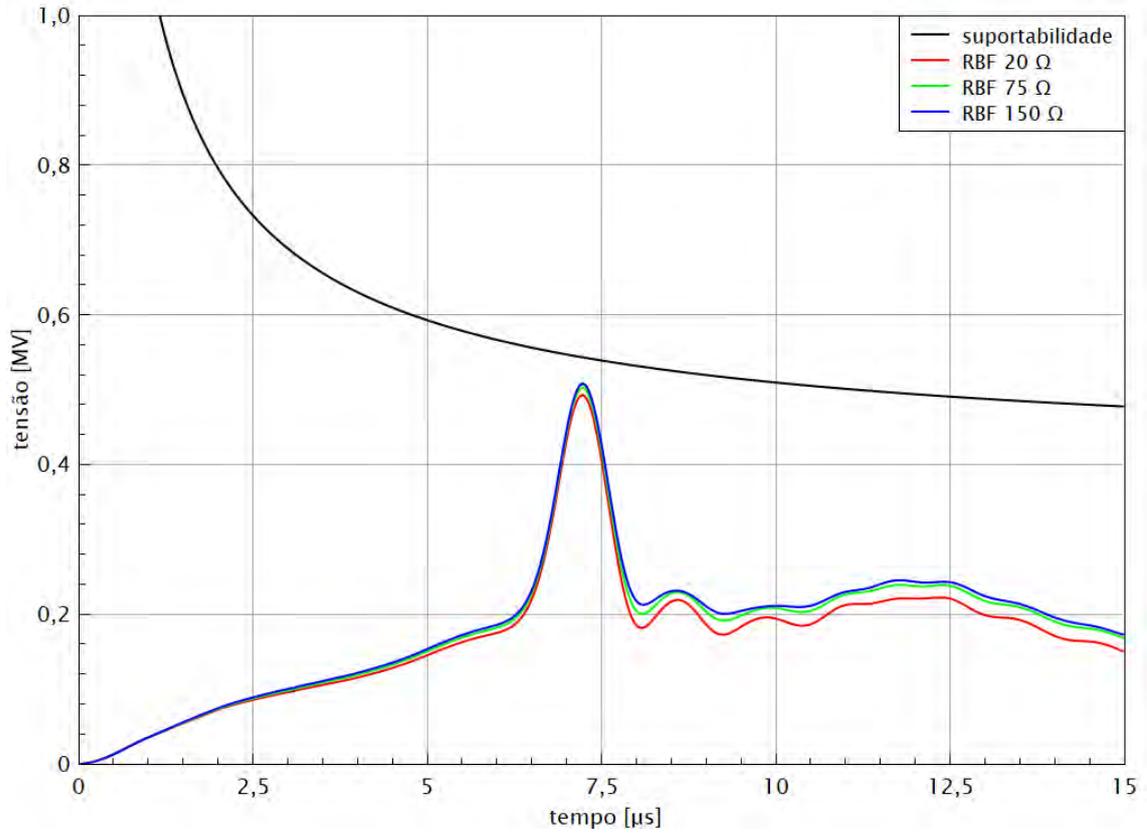
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 88 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 1 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$.



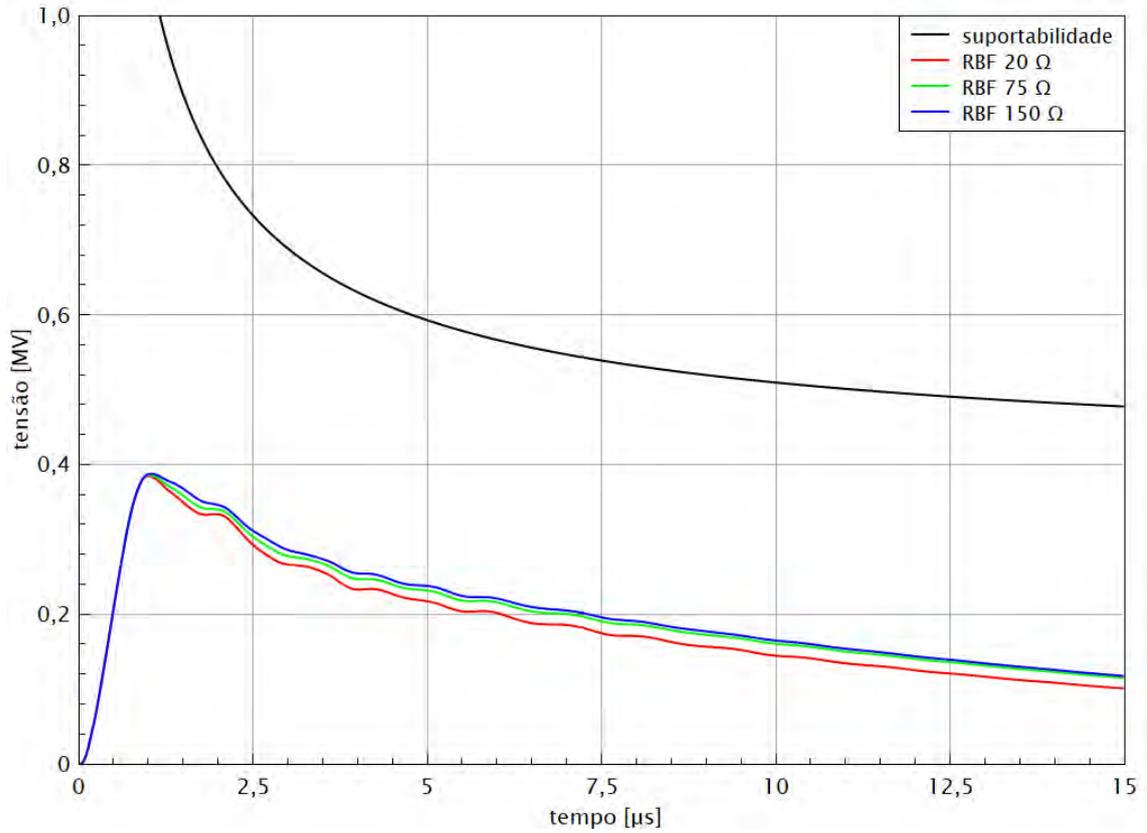
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 89 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 7 Heidler - $\rho = 2000 \Omega.m$.



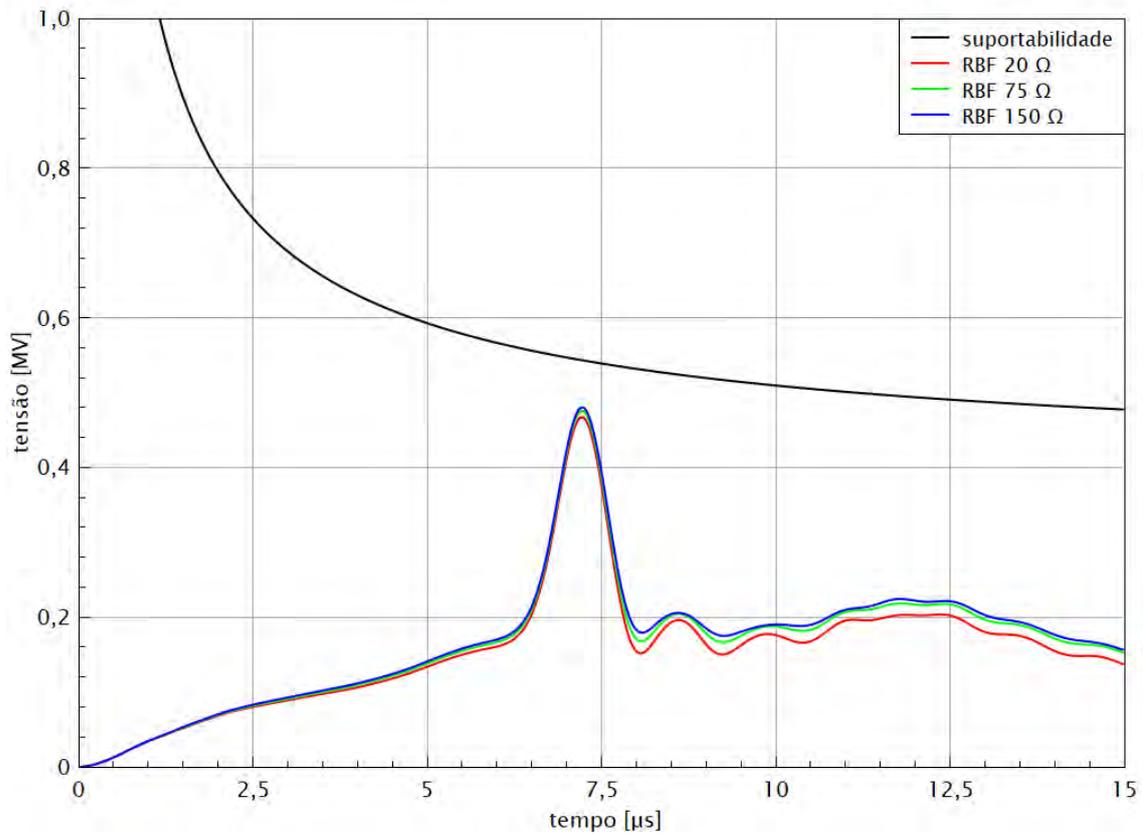
Fonte: autoria própria (2021).

Figura 90 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 1 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$.



Fonte: autoria própria (2021).

Figura 91 – Sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento regular e irregular na estrutura adjacente - 7 Heidler - $\rho = 4000 \Omega.m$.



Fonte: autoria própria (2021).

A Tabela 20 retrata os valores máximos de sobretensão encontrados. Estes valores apresentaram um pequeno aumento quando comparados aos valores da Tabela 18. Para um aterramento irregular de resistência de baixa frequência de 75Ω foi verificado um aumento de até $0,93\%$ para 1 HEIDLER e até $2,32\%$ para 7 HEIDLER. Por sua vez, para uma resistência de 150Ω , foi observado um aumento de até $2,86\%$ para 1 HEIDLER e até $3,48\%$ para 7 HEIDLER. Outrossim, de forma semelhante aos cenários anteriores, o aumento da resistividade do solo resultou na redução da sobretensão resultante.

Tabela 20 – Valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular na estrutura adjacente.

ρ	R_{BF}	Z_P	1 HEIDLER	7 HEIDLER
[$\Omega.m$]	[Ω]	[Ω]	[kV]	[kV]
300	75	71,17	428,5	544,9
2000	75	62,54	400,8	502,5
4000	75	55,32	385,8	475,5
300	150	142,35	436,7	551,0
2000	150	125,08	403,7	507,9
4000	150	110,60	387,4	480,3

Fonte: autoria própria (2021).

4.3 Considerações finais

Diante do até aqui exposto, foram considerados valores constantes para a resistência de baixa frequência e, dado o conceito de impedância impulsiva, constatou-se que o efeito do aumento da resistividade do solo implicou em uma redução do valor máximo de sobretensão em todos os cenários, além de diminuir o percentual de tempo em que a sobretensão na fase C apresentou o maior valor em relação as outras fases. Ainda referente a este percentual de tempo, a fonte com 7 HEIDLER apresentou valores menores do que sua análoga com 1 HEIDLER.

Conforme descrito na seção 4.2.1, a defasagem no tempo entre as sobretensões resultantes para os dois modelos de fonte foi verificada em todas as simulações. Além disso, dada a defasagem supracitada, as formas de onda da sobretensão para os cenários de 7 HEIDLER foram mais críticas em relação à curva de suportabilidade do isolador.

Quando comparada aos pares, com as mesmas considerações de resistividade do solo e condição de aterramento, o modelo de fonte de 7 HEIDLER apresentou os maiores valores de sobretensão na fase C da estrutura central em 80% dos cenários. Não obstante, o maior valor registrado de sobretensão foi para o modelo de fonte com 1 HEIDLER, correspondendo a 1039,8 kV.

Por fim, dados os valores máximos de sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para a condição de aterramento regular, as Tabelas 21 e 22 representam o aumento

percentual destes valores para diferentes condições de aterramento irregular.

Destas tabelas é possível inferir que a condição de aterramento irregular configurou maiores aumentos percentuais para o modelo de fonte de 1 HEIDLER, acarretando aumentos de até 84,39 % para cenários com uma resistência de baixa frequência de 75 Ω e de até 144,91 % para cenários de 150 Ω .

Tabela 21 – Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 75 \Omega$) na estrutura central em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular.

ρ [Ω .m]	1 HEIDLER	7 HEIDLER
300	84,39 %	52,28 %
2000	77,27 %	52,74 %
4000	69,64 %	52,21 %

Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 22 – Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 150 \Omega$) na estrutura central em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular.

ρ [Ω .m]	1 HEIDLER	7 HEIDLER
300	144,91 %	87,35 %
2000	140,59 %	89,35 %
4000	134,01 %	89,51 %

Fonte: autoria própria (2021).

Para a condição de aterramento irregular nas estruturas adjacentes, as Tabelas 23 e 24 retratam o aumento percentual dos valores máximos de sobretensão na fase C da estrutura central em relação à condição de aterramento regular. É possível observar comportamentos similares àqueles verificados nas Tabelas 21 e 22, tanto frente a variação da resistividade do solo quanto na diferença causada pela adoção dos diferentes modelos de fonte. Em contrapartida, o

aumento percentual destas sobretensões foram extremamente reduzidos, de forma que o maior valor registrado foi de apenas 3,48 %.

Tabela 23 – Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 75 \Omega$) na estrutura adjacente em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular.

ρ [Ω .m]	1 HEIDLER	7 HEIDLER
300	0,93 %	2,32 %
2000	0,49 %	2,02 %
4000	0,28 %	1,80 %

Fonte: autoria própria (2021).

Tabela 24 – Variação percentual dos valores máximos da sobretensão no isolador da fase C da estrutura central para aterramento irregular ($R_{BF} = 150 \Omega$) na estrutura adjacente em relação àqueles obtidos na condição de aterramento regular.

ρ [Ω .m]	1 HEIDLER	7 HEIDLER
300	2,86 %	3,48 %
2000	1,21 %	3,11 %
4000	0,70 %	2,82 %

Fonte: autoria própria (2021).

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Este TCC apresentou a modelagem computacional em detalhes de uma linha de distribuição de 69 kV cujas estruturas de suporte consistem em postes de concreto, sob os efeitos de descargas atmosféricas indiretas. Na bibliografia consultada, tanto este nível de tensão quanto esta classe estrutural foram pouco abordados.

Com base na fundamentação teórica estabelecida e em premissas adotadas foi desenvolvido um modelo, contemplando considerações referentes aos aspectos construtivos da linha em questão, ao número de estruturas, à representação da curva mediana da onda de descarga atmosférica, bem como à frequência dominante do fenômeno. A partir deste modelo, foram simulados 30 cenários distintos, incluindo diferentes valores de resistividade elétrica do solo, assim como condições de aterramento regulares e irregulares.

Com base nos resultados apresentados, constatou-se que, mantendo-se constante o valor de resistência de aterramento de baixa frequência, o efeito do aumento da resistividade do solo implicou em uma redução do valor máximo de sobretensão nos isoladores em todos os cenários. Conforme enfatizado na seção 4.1, diante da alta complexidade envolvida na obtenção de detalhes de sistemas de aterramento de linhas, presumiu-se valores constantes para todas as resistências de baixa frequência utilizadas. Caso fosse considerado um aumento da impedância de aterramento de baixa frequência de acordo com o aumento da resistividade do solo, verificaria-se, em geral, um aumento no valor máximo de sobretensão nos isoladores.

Isso posto, foi observada a importância dos valores reduzidos de impedância de aterramento. Desta forma, almeja-se esta condição na construção de linhas, bem como a manutenção deste valor reduzido.

Para os cenários com aterramento irregular na estrutura central, foram observados elevados valores de sobretensão nos isoladores, além de variações nas formas de onda. Quanto aos cenários com aterramento irregular na estrutura adjacente, sua relevância foi muito reduzida e, portanto, sua consideração ficaria restrita apenas a estudos de maior criticidade.

Por fim, a utilização de um modelo de fonte mais fiel ao formato de onda de descargas atmosféricas reais, com 7 componentes HEIDLER, resultou em sobretensões mais elevadas em 80 % dos cenários analisados, com valores máximos mais críticos em relação à curva de suportabilidade do isolador, sendo, portanto, mais conservadores e voltados a um maior grau de segurança do modelo.

Diante do até aqui exposto, como propostas de continuidade e sugestões de trabalhos

futuros, considera-se:

- Diferentes métodos para a caracterização da suportabilidade do isolador;
- Impacto das descargas atmosféricas em linhas aéreas com postes de outros níveis de tensão;
- Utilização do equipamento para-raio;
- Efeitos das descargas subsequentes;
- Efeitos de um solo não linear;
- Influência da estrutura metálica interna do poste de concreto na impedância de surto da estrutura;
- Diferentes métodos para a determinação da impedância de surto;
- Um trecho real de uma linha aérea, cogitando diferentes comprimentos de vão, altura de estruturas e resistividade do solo para cada ponto da linha;
- Uma modelagem detalhada da subestação, buscando analisar tanto as sobretensões na extremidade da linha quanto os efeitos das reflexões provenientes da subestação nas sobretensões nos isoladores das estruturas de suporte;
- Desempenho da linha através de um estudo probabilístico considerando modelos de incidência e a variação dos parâmetros de descarga de acordo com uma distribuição de frequência.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5422:** Projeto de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5471:** Condutores elétricos. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR5460:** Sistemas elétricos de potência. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10510:** Isolador-bastão de porcelana - Padronização de dimensões e características. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7110:** Isolador de pino de porcelana ou vidro - Padronização de dimensões e características. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7109:** Isolador de disco de porcelana ou vidro - Dimensões e características. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR15749:** Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15232:** Isolador composto tipo pilar para linhas aéreas de corrente alternada, com tensões acima de 1 000 V - Definições, métodos de ensaio e critério de aceitação. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, junho, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15751:** Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16524:** Materiais para sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5032:** Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1 000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5419:** Proteção contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16527**: Aterramento para sistemas de distribuição. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15643**: Isoladores poliméricos para uso interno e externo, com tensão nominal superior a 1 000 V - Ensaio de projeto. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7117**: Parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos. Rio de Janeiro, Av Treze de maio, 13 - 28º andar, 2020.

ALÍPIO, R.; VISACRO, S. Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effects of Frequency-Dependent Soil Parameters. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 29, n. 2, abr. 2014.

ALÍPIO, R. S. **Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência**. 2008. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2008.

ALÍPIO, R. S. **Dependência da frequência dos parâmetros do solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos**. 2013. Tese (Doutorado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2013.

ALMEIDA, A. B.; BISPO, D.; CAMACHO, J. R. Efeito pelicular em cabos-guarda de linhas aéreas analisado pelo método de elementos finitos. *In: VIII - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*. 2010.

ALMEIDA, F. S.; SILVEIRA, F. H.; CONTI, A. D.; VISACRO, S. Influence of tower modeling on the assessment of blackflashover occurrence on transmission lines due to first negative lightning strokes. **Electric Power Systems Research**, 2021.

ALUBAR. **Catálogo Técnico - Condutores Elétricos de Alumínio**. Rodovia PA-481, km2,3 - Complexo Portuário de Vila do Conde - Barbacena/PA, 2015.

AMARAL, A. B. **Comportamento transitório de aterramentos elétricos: Teoria de campo versus teoria de linhas de transmissão**. 2017. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2017.

ANEEL. **Desligamentos da rede básica compreendidas entre os anos de 2013 até 2021**. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/fiscalizacao-da-transmissao-conteudos>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ANEEL. **Fiscalização da ANEEL aplica multa de R\$ 3,6 milhões na LMTE por ocorrência no Amapá**. fevereiro, 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2021. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ARAUJO, A. R. J.; KUROKAWA, S. A tutorial about tower transmission models for the analyses and prediction of backflashovers. **IEEE Latin America Transactions**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 15, n. 8, p. 1432–1438, 2017.

ASSIS, S. de C.; BOAVENTURA, W. do C.; PAULINO, J. O. S. Lightning Performance of Transmission Line: Comparison IEEE Flash and Monte Carlo Method. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 15, n. 2, p. 269–274, fevereiro, 2017.

BALESTRO. **Isoladores Poliméricos Line Post**. abr. 2015. Disponível em: <https://balestro.com.br/>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

BEZERRA, R. C.; MELLO, D. R. de; PORFIRIO, D. M.; DE ARAÚJO, F. E. R.; TEIXEIRA JR, J. M. T.; PINHEIRO, J. C.; ANDRADE, J. A. S.; NETO, A.; LEITE, R. C. Avaliação de isoladores poliméricos em linha de transmissão de 138 kV estudo de caso. **IV - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2012.

BONOMO, A. **Estudo sobre isoladores poliméricos à base de resinas poliuretanas para ambiente externo**. 2003. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2003.

BORGES, F. M. d. S. **Metodologia para determinação da impedância impulsiva para arranjos típicos de aterramentos elétricos**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2018.

BP. **British Petroleum Statistical Review of World Energy**. 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

BRASIL. **LEI Nº 9.427, DE 26 DE DEZEMBRO**. 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19427cons.htm. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

BRASIL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 846, DE 11 de junho**. 2019. Disponível em: <http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-normativa-n-846-de-11-de-junho-de-2019-164060539>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. LTC, 1999.

CANNABRAVA, A. C. de A.; FERREIRA, B. E. M.; PASQUA, L. P. **Aterramento de redes de distribuição com a utilização de postes autoaterrados - Desenvolvimento e implantação**. 2016.

CARD, R. H. Earth Resistivity and Geological Structure. **A.I.E.E**, 1935.

CARVALHO, L. **Procon multa empresas de energia elétrica por má prestação de serviços e por não fornecer informações em prazo determinado**. março, 2021. Disponível em: <https://procon.portal.ap.gov.br>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

CHAVES, D.; CHAGAS, N. B. Características e comportamentos do efeito pelicular. *In: Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*. 2020. v. 8, n. 2. Disponível em: <https://periodicos.unipampa.edu.br/index.php/SIEPE/article/view/90947>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

CHISHOLM, W. A.; CHOW, Y. L.; SRIVASTAVA, K. D. Surge response of transmission towers. **Canadian Electrical Engineering Journal**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, n. 4, p. 34–36, outubro, 1982.

CIGRE. **Critério de Avaliação de Isoladores em Serviço**. set. 2008.

COELHO, V. L. **Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

COELHO, V. L.; RAIZER, A. **Sobretensões em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. Editora CRV, 2021.

Comitê Argentino de Usuários do EMTP/ATP. **ATP Rule Book**. 2002.

CONTI, A. D.; VISACRO, S. Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 49, n. 2, p. 448–451, maio 2007.

CONTI, A. D.; VISACRO, S.; SOARES, A.; SCHROEDER, M. A. O. Revision, Extension, and Validation of Jordan's Formula to Calculate the Surge Impedance of Vertical Conductors. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 48, n. 3, p. 530–536, agosto, 2006.

CONTI, A. R. D.; VISACRO, S. Uso da fórmula de jordan no cálculo da impedância de surtos de torres. **XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, novembro, 2009.

COPEL. **Formulário 20-F**. Rua Coronel Dulcídio, dez. 2020. Disponível em: <https://ri.copel.com/publicacoes-e-documentos/relatorios-20-f/>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

CORSAN. **Falta de energia elétrica pode afetar abastecimento em pontos altos de Canela e Gramado**. janeiro, 2019. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/falta-de-energia-pode-afetar-abastecimento-em-pontos-altos-de-canela-e-gramado>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

COSTA, E. C. M.; KUROKAWA, S.; PISSOLATO, J. Corona discharge model for transmission lines by lumped elements. **IEEE Latin America Transactions**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 9, n. 1, p. 804–809, março, 2011.

COUTINHO, C. **Apagão no Amapá: governo inicia plano com reforços na segurança, saúde e assistência social**. nov. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

COUTINHO, C. **Macapá tem nova onda de protestos após apagão; estado soma quase 120 atos**. novembro, 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/21/macapa-tem-nova-onda-de-protestos-apos-apagao-estado-soma-quase-120-atos.ghtml>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

DBNST. **Discovery of new upward lightning phenomenon in winter**. 2010. Disponível em: <https://dbnst.nii.ac.jp/pro/detail/1854>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

DEUTSCH, N. M. **Diferenças entre isoladores de porcelana e poliméricos**. 2016. Mestrado — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

DINO. **Riscos decorrentes da interrupção no fornecimento de energia como o provocado pelo recente blecaute**. 2018. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/empresas-devem-avaliar-os-riscos-decorrentes-da-interruptao-no-fornecimento-de-energia-como-o-provocado-pelo-recente-blecaute>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

EARTH, G. **Subestação Curitiba 500 kV**. 2020. Disponível em: <https://www.google.com/maps/@-25.5942004,-49.3161237,3a,24.3y,295.43h,102.13t/data=!3m6!1e1!3m4!1s5XeNbPPvN16fLRRHVNaWbA!2e0!7i16384!8i8192?hl=pt-BR>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2030**. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2030>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

EPE. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. jan. 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-153/topico-574/ResenhaJaneiro21-ClaroFinal.pdf>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ERIKSSON, A.; DELLERA, L.; ELOVAARA, J.; HILEMAN, A.; HOULGATE, R.; HUSE, J.; WECK, K. **Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines**. out. 1991.

FEKETE, K.; NIKOLOVSKI, S.; KNEZEVIC, G.; STOJKOV, M.; KOVAC, Z. Simulation of lightning transients on 110 kV overhead-cable transmission line using ATP-EMTP. IEEE, 2010.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica**. Livros técnicos e científicos editora S.A, 1977.

G1. **Apagão no Amapá: veja cronologia da crise de energia elétrica**. nov. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/18/apagao-no-amapa-veja-a-cronologia-da-crise-de-energia-eletrica.ghtml>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

GATTA, F. M.; GERI, A.; LAURIA, S. Backflashover simulation of HV transmission lines with concentrated tower grounding. Elsevier BV, v. 73, n. 3, p. 373–381, março, 2005.

GERMER. **Germer Isoladores**. Disponível em: <http://www.germerisoladores.com.br/>. Acesso em: 19 de nov. de 2011.

GIAROLA, B. N. **Análise da influência de para raios nas sobretensões atmosféricas por descarga direta em linhas de transmissão considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência**. 2016. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São João Del Rei e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. Rio de Janeiro: Gen - LTC, 2012. ISBN 9788521619055.

HAYT, W.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. New York, NY: McGraw-Hill, 2013. ISBN 0073380660.

HEIDLER, F.; CVETIC, J. M.; STANIC, B. V. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 14, n. 2, p. 399–404, abr. 1999.

HJT. **Torres de Transmissão de Alta Tensão**. 2020. Disponível em: <http://pt.qdhjttower.net/power-transmission-tower/angle-steel-tower/high-voltage-transmission-towers.html>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

HØIDALEN, H. K.; PRIKLER, L. **ATPDRAW Users' Manual 5.6**. 2009.

HØIDALEN, H. K.; PRIKLER, L.; PEÑALOZA, F. **ATPDRAW Users' Manual 7.2**. 2020. Disponível em: <https://www.atpdraw.net/downloads.php>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

IEA. **Global Energy Review 2021**. 2021. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d0031107-401d-4a2f-a48b-9eed19457335/GlobalEnergyReview2021.pdf>. Acesso em: 19 de nov. de 2021

IMECE, A. F.; DURBAK, D. W.; ELAHI, H.; KOLLURI, S.; LUX, A.; MADER, D.; MCDERMOTT, T. E.; MORCHED, A.; MOUSA, A. M.; NATARAJAN, R.; RUGELES, L.; TARASIEWICZ, E. Modeling guidelines for fast front transients. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, v. 11, n. 1, p. 493–506, jan. 1996.

JORDAN, C. A. Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires, Part II. **Gen. Electr Rev.**, v. 37, n. 4, p. 180–186, 1934.

JS Isoladores. **Isolador tipo pilar**. 2021. Disponível em: <https://www.jsisoladores.com.br/>. Acesso em: 19 de nov. de 2021

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. de. **Projetos mecânicos das linhas de aereas de transmissão**. Editora Edgard Blucher LTDA, 1992.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Grupo Gen - LTC, 2013. ISBN 9788521622918.

MARAN, M. A. Isoladores vítreos *in* *Materiais Elétricos: Compêndio de trabalhos*. Volume 1, Universidade Federal do Oeste do Paraná Foz do Iguaçu, 2010.

MARKOVITS, C. H. M.; LEON, J. A. M. Critérios de medições, aterramento e segurança em subestações. **IV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, 1977.

MAROS, A. **Com El Niño na ativa, incidência de raios em Curitiba cresce 750**. 2019. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/curitiba/com-el-nino-na-ativa-incidencia-de-raios-em-curitiba-cresce-750>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

MARROQUES, L. S. Uma comparação entre os modelos de fonte de surto atmosférico no ATP. **XIII CEEL - ISSN 2178-8308**, 2015.

MARTI, J. Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-101, n. 1, p. 147–157, jan 1982.

MATTOS, E. V. **Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas**. 2009. Dissertação (Mestrado) — INPE, 2009.

MENEZES, V. P. d. **Linhas de transmissão de energia elétrica aspectos técnicos, orçamentários e construtivos**. 2015 — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

MIRANDA, A. S. d. **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/EMP**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2019.

MORAES, L. **Coriscos no céu**. março, 2018. Disponível em: <http://revistaecologico.com.br/revista/edicoes-antiores/edicao-105/coriscos-no-ceu>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

MOTA, P. C. A. **Determinação e modelagem da impedância de surto de torres de linhas de transmissão e seus efeitos no estudo de sobretensões atmosféricas**. 2017. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

OLIVEIRA, A. J. de. **Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas sob uma perspectiva probabilística**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2018.

ONS. **ANÁLISE DA PERTURBAÇÃO DO DIA 03/11/2020 ÀS 20H48MIN COM INÍCIO NOS TRANSFORMADORES DE 230/69/13,8 kV DA SE MACAPÁ, COM DESLIGAMENTO DA UHE COARACY NUNES E DO SISTEMA AMAPÁ**. Rua Júlio do Carmo, 251, Cidade Nova, dez. 2020. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/DGL-REL-0016_2020%20-%20RAP%2003.11.2020_20h48min_Amap%C3%A1_VF.pdf. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ONS. **Plano elétrico de médio prazo do sistema interligado nacional**. 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ONS. **Sumário executivo - Plano da operação elétrica de médio prazo do SIN**. 2020. Disponível em: http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Sum%C3%A1rio_executivo_ONS_PAR-PEL-2021-25.pdf. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ONS. **Instalações de Transmissão**. 2021. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/instalacoes>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

PECHIR, D. G. **Cálculo de sobretensão causadas por descargas atmosféricas diretas em linhas de transmissão de SIL elevado**. 2020. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2020.

PEREIRA, C. E. M.; ZANETTA JÚNIOR, L. C. Metodologia para dimensionamento de cabos-guarda em linhas de transmissão de alta tensão. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1–5, junho, 2006.

PINTO JÚNIOR, O.; PINTO, I. R. C. A. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São Jose dos Campos, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. ISBN 8590171914.

Prefeitura Municipal de Barbacena. **Falta de energia elétrica da Cemig prejudica abastecimento de água**. 2018. Disponível em: <https://www.barbacenamais.com.br/politica/36-barbacena/11546-falta-de-energia-eletrica-da-cemig-prejudica-abastecimento-de-agua>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

PROTZEK, B. R. **Materiais elétricos: Isoladores poliméricos**. 2010. v. 1, 27–44 p.

PXFUEL. **Isolador de suspensão**. 2021. Disponível em: <https://www.pxfuel.com/en/free-photo-okqst>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

REVIEWS, E. **Power line transpositions explained**. junho, 2016. Disponível em: <http://electicalreviews.blogspot.com/2016/06/power-line-transpositions-explained.html>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

ROBERT, R. Efeito Pelicular. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 2, p. 285–289, junho, 2000.

ROSA JUNIOR, A. Leonel Rodrigues da. **Materiais elétricos: Isoladores cerâmicos**. 2010. v. 1, 45–57 p.

SAAVEDRA, A. R.; FRONTIN, S. de O. Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a Linhas de Transmissão. Brasília, D.F: Teixeira Gráfica e Editora, 2010. p. 70–84. ISBN 9788588041028.

SABA, M. M. F.; PAIVA, A. R.; SCHUMANN, C.; FERRO, M. A. S.; NACCARATO, K. P.; SILVA, J. C. O.; SIQUEIRA, F. V. C.; CUSTÓDIO, D. M. Lightning attachment process to common buildings. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 44, n. 9, p. 4368–4375, maio, 2017.

SADIKU, M. N. O.; ALEXANDER, C. K. **Fundamentos de circuitos elétricos**. McGraw Hill, 2008. ISBN 9788586804977.

SALINI, M. F. **A influência do fenômeno el niño oscilação sul - enos (La ninã e el niño) na ocorrência de inundações no vale do taquari RS**. 2012 — UNIVANTES, 2012. Disponível em: <https://www.univates.br/bdu/bitstream/10737/264/1/MichelineFinattoSalini.pdf>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

SARGENT, M. A.; DARVENIZA, M. Tower Surge Impedance. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), PAS-88, n. 5, p. 680–687, maio, 1969.

SEGANTINI, R. C. **Comportamento de Malhas de Aterramento de Subestação de Energia frente a Descargas Atmosféricas: Ênfase na avaliação de Técnicas de Melhoria do Desempenho Impulsivo por meio de Múltiplos Pontos de Injeção de Corrente**. 2018. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, 2018.

SIKLOWATT. **Isoladores Poliméricos**. 2015. Disponível em: <https://www.siklowatt.com.br/>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

SILVA, M. d.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V. Uma nova ferramenta baseada na transformada wavelet para localização digital de faltas. **Sba Controle & Automação**, v. 16, n. 3, p. pp345–358, 2005.

SILVA, M. G.; GUIMARAES, L. S. Uso do Índice de Desenvolvimento Humano como Instrumento de Projeção de Demanda de Energia Elétrica. **Economia e Energia**, n. 86, p. pp.3–16, jul. 2012. Disponível em: <https://ecen.com/eee86/eee86p/eee86.pdf>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

SOUZA, M. A. d. **Modelo e estudo de sobretensões de energização e descarga atmosférica nos padrões compacto e supercompacto urbanos de linhas de distribuição de alta tensão 138 kV**. 2020. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020.

TAVARES, M. C. D.; CAMPOS, P. G.; PRADO, P. **Guia Resumido do ATP - Alternative Transient Program**. nov. 2003.

VELASCO, J. A. M.; ARANDA, F. C. Modeling of overhead transmission lines for lightning overvoltage calculations. *In: Revista Chilena de Ingeniería*. Ingeniare, 2010. v. 18, n. 1, p. 120–131.

VISACRO, S. **Aterramentos Elétricos**. Artliber, 2002. ISBN 85-88098-12-1.

VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas uma abordagem de engenharia**. Artliber, 2005. ISBN 8588098318.

VISACRO, S. A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 22, n. 1, p. 381–386, jan. 2007.

VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H.; VALE, M. H. M.; POMAR, G. D. Uma experiência no uso de underbuilt wires e aplicação conjugada de dispositivos para-raios e impedâncias limites de pé-de-torre para melhoria de desempenho frente a descargas atmosféricas de linhas de transmissão instaladas em condições inóspitas. **XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, nov. 2019.

VISACRO, S.; SOARES JÚNIOR, A.; SCHROEDER, M. A. O.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; SOUSA, V. J. de. Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 109, n. D1, 2004.

YAMADA, T.; MOCHIZUKI, A.; SAWADA, J.; ZAIMA, E.; KAWAMURA, T.; AMETANI, A.; ISHII, M.; KATO, S. Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 10, n. 1, p. 393–402, 1995.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. São Paulo: Edusp, 2003. ISBN 8531407559.

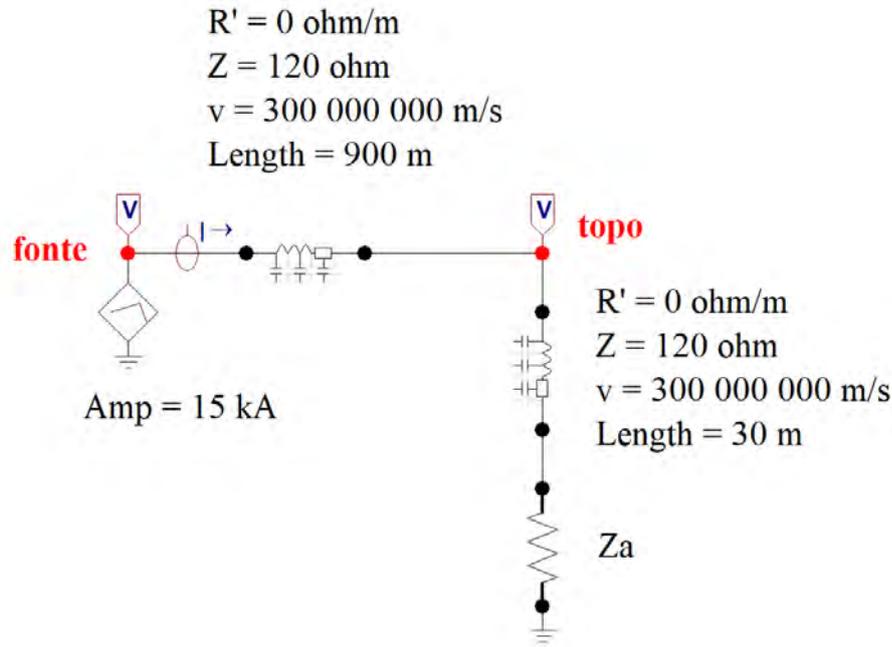
ZAWANI, N.; JUNAINAH; IMRAN; FAIZUHAR, M. Modelling of 132kV Overhead Transmission Lines by using ATP/EMTP for Shielding Failure Pattern Recognition. Elsevier BV, v. 53, p. 278–287, 2013.

APÊNDICE A – COMPORTAMENTO DO COMPONENTE LINEZT_1

Visando compreender a aplicação e comportamento do componente LINEZT_1, intentou-se reproduzir as formas de onda previstas para as diferentes condições de aterramento de acordo com a Figura 46 da seção 2.6.2. No cenário descrito por Visacro (2005), uma onda triangular de 15 kA de amplitude percorria o corpo de uma estrutura de impedância de surto equivalente a 120Ω , ao passo que sua impedância de aterramento era representada por um elemento concentrado conectado à base da torre. Visacro (2005) não explicitou o tempo de trânsito da estrutura ou a altura considerada para geração das formas de onda da Figura 46, entretanto, exemplificou os valores de $0,1 \mu s$ e 30 metros, respectivamente. Desta forma, a partir deste tempo de trânsito, além do gráfico da Figura 46, estimou-se um tempo de pico de $0,6 \mu s$ e duração de $3,5 \mu s$ para a fonte de corrente triangular.

A partir destas informações, foi desenvolvido o circuito da Figura A-1. Inicialmente a fonte de corrente fora conectada diretamente no topo da estrutura; entretanto, as reflexões criadas pelo ponto de descontinuidade de impedâncias entre a fonte de corrente e o LINEZT_1 interferiram nas medições. Desta forma, na topologia da Figura A-1, a corrente é injetada no topo da estrutura através de uma linha de transmissão de condutor único, representada por outro componente LINEZT_1, o qual deve apresentar um comprimento suficiente para evitar que as reflexões no ponto da fonte não interfiram na medição, além de possuir a mesma impedância de surto da estrutura para não promover um novo ponto de descontinuidade.

Figura A-1 – Circuito exemplo do funcionamento do componente LINEZT_1.



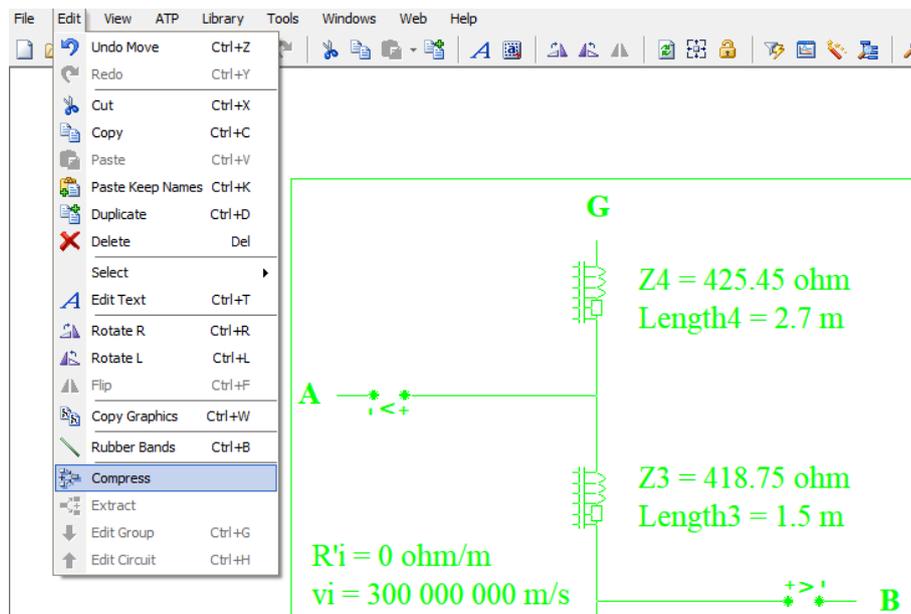
Fonte: autoria própria (2021).

Buscando valores de coeficientes de reflexão Γ de 0; -0,5 e -1, variou-se o valor da resistência concentrada a representar a impedância de aterramento Z_a da Figura A-1 para 0Ω , 40Ω e 120Ω e produziu-se o gráfico da Figura A-2. A curva em preto da Figura A-2 representa a onda de tensão medida no voltímetro do nó da fonte de acordo com a Figura A-2 e sua disposição em relação às demais curvas possibilita observar como o comprimento de 900 metros da linha auxiliar implicou em um intervalo de tempo de trânsito pela linha de $3 \mu\text{s}$, calculável através da equação (33). As demais curvas da Figura A-2 representam as sobretensões medidas no topo da estrutura para valores de resistência de aterramento de 120Ω , 40Ω e 0Ω e apresentaram formatos de onda semelhantes àqueles obtidos por Visacro (2005).

APÊNDICE B – COMPACTAÇÃO DA ESTRUTURA DE SUPORTE

De acordo com a Figura B-1, após seleccionar todos os componentes a serem agrupados, utilizou-se o comando *Compress* da guia *Edit* do menu principal.

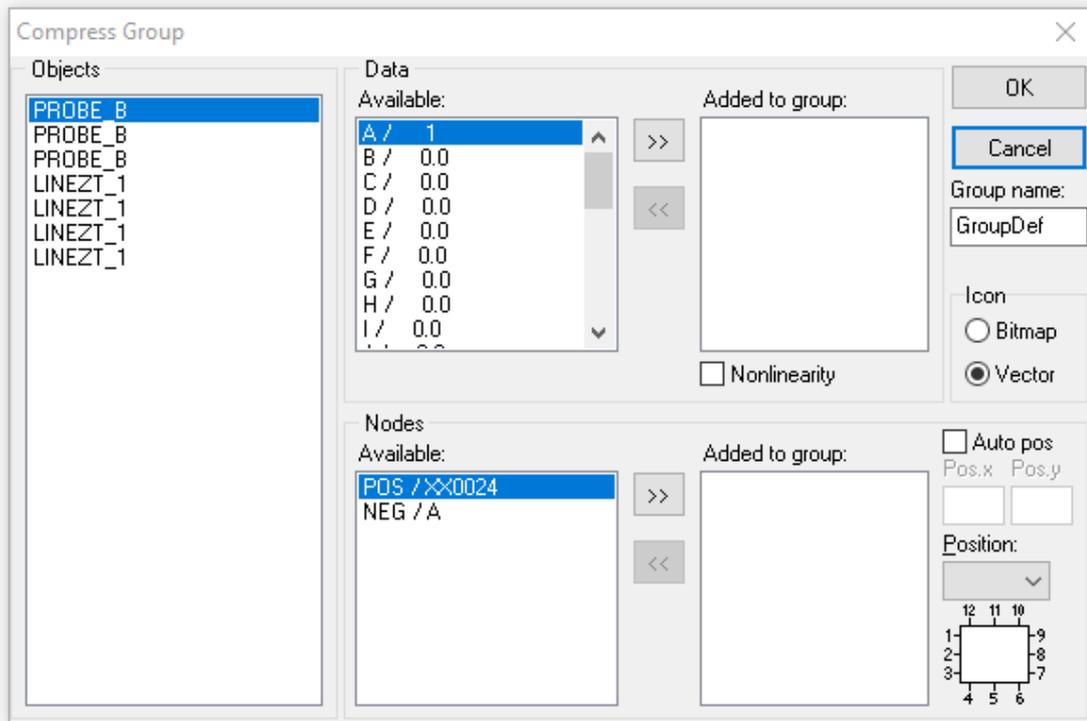
Figura B-1 – Comando para a compactação de grupos.



Fonte: autoria própria (2021).

Esta ação abre a caixa de diálogo *Compress Group* da Figura B-2, para a qual a caixa de listagem *Objects* apresenta o nome dos componentes agrupados e permite seleccionar cada componente individualmente (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Referente ao quadro *Data*, a caixa de listagem *Available* permite seleccionar e cadastrar parâmetros de cada componente na caixa de listagem *Added to group* através do botão de conteúdo $>>$, de forma que estes parâmetros estariam disponíveis para modificação na caixa de diálogo do componente final (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Por exemplo, seria possível cadastrar a impedância de surto modal Z e o comprimento $Length$ de cada componente `LINEZT_1` para posterior modificação.

Figura B-2 – Caixa de diálogo *Compress Group*.



Fonte: autoria própria (2021).

Ainda referente à Figura B-2, de forma semelhante ao quadro *Data*, a caixa de listagem *Available* do quadro *Nodes* permite selecionar os nós a serem disponibilizados no componente final ao cadastrá-los na caixa de listagem *Added to group* através do botão de conteúdo >> (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

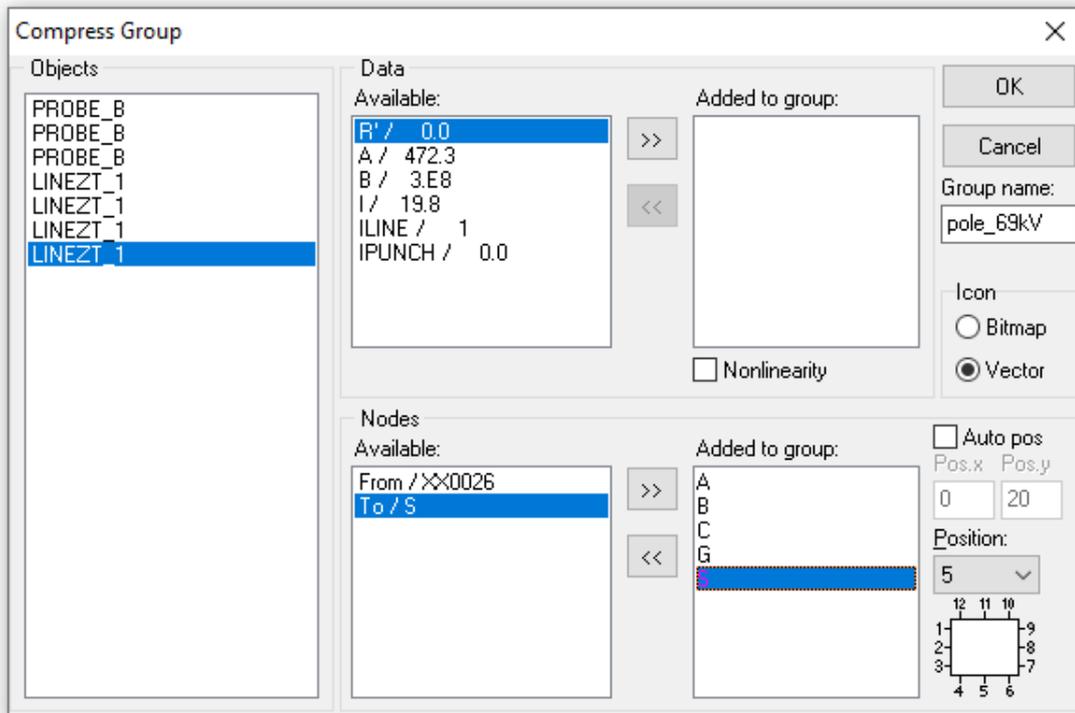
Uma vez cadastrados, os nós herdam somente o nome de referência do componente original, o qual pode ser alterado através do clique duplo do *mouse* (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Por exemplo, o nó NEG / A do voltímetro PROBE_B apresenta somente o nome NEG ao ser cadastrado na caixa de listagem *Added to group* e, portanto, foi renomeado para A.

Por fim, os nós devem ser selecionados na caixa de listagem *Added to group* e a cada um atribuída uma das doze opções de posição através da lista suspensa *Position* da Figura B-2 (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Cada posição apresenta um par de coordenadas retangulares de acordo com eixos x e y, de forma que o semi-eixo positivo de x aponta para a direita e o semi-eixo positivo de y aponta para baixo.

Dado o exposto, a Figura B-3 retrata a caixa de diálogo *Compress Group* preenchida,

para qual os nós foram cadastrados de acordo com a Tabela B-1.

Figura B-3 – Caixa de diálogo para compactação de grupos preenchida.



Fonte: autoria própria (2021).

Tabela B-1 – Cadastro de nós para o componente a representar a estrutura de suporte.

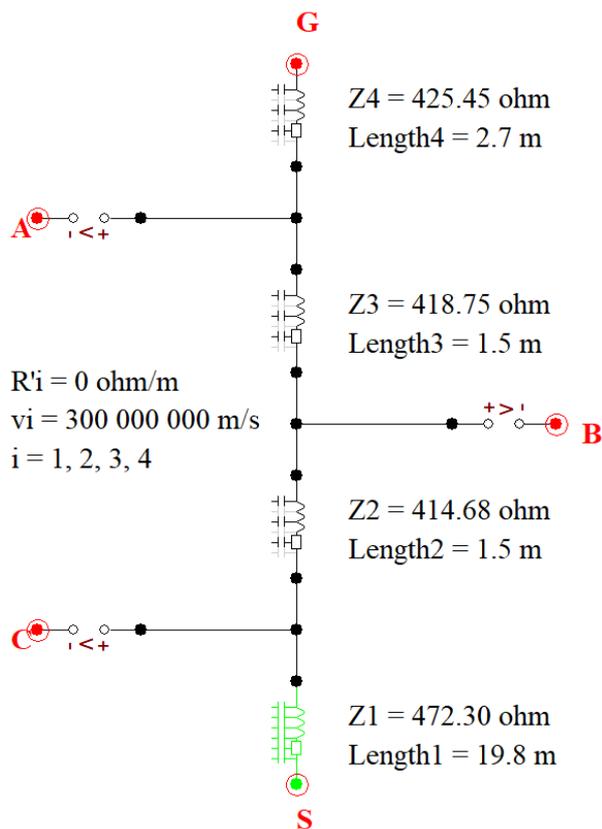
<i>Objects</i>	<i>Available</i>	<i>Added to group</i> nome original	<i>Added to group</i> nome novo	<i>Position</i>	x	y
PROBE_B	NEG / A	NEG	A	1	-20	-10
PROBE_B	NEG / B	NEG	B	8	20	0
PROBE_B	NEG / C	NEG	C	3	-20	10
LINEZT_1	From / G	From	G	11	0	-20
LINEZT_1	To / S	To	S	5	0	20

Fonte: autoria própria (2021).

Como forma de auxílio visual, conforme ilustrado pela Figura B-4, o ATPDraw destaca através da cor verde tanto o componente selecionado pela caixa de listagem *Objects* quanto seu

nó selecionado pela caixa de listagem *Available*, além de envolver em círculos vermelhos os nós cadastrados na caixa de listagem *Added to group* (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

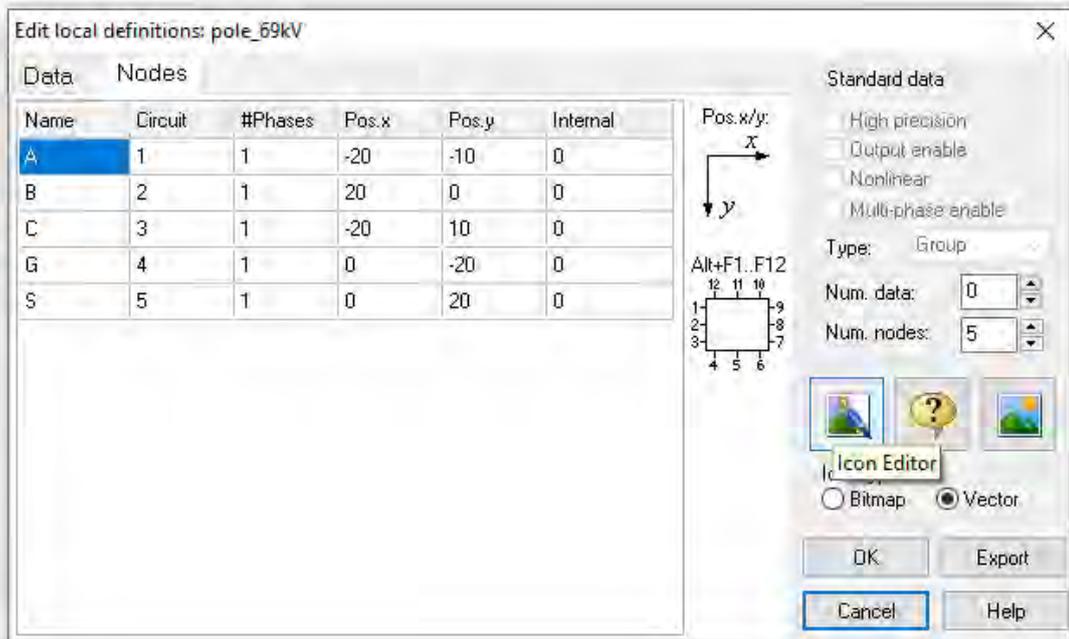
Figura B-4 – Auxílio visual promovido pelo ATPDraw para a caixa de diálogo *Compress Group*.



Fonte: autoria própria (2021).

Ao pressionar o botão de conteúdo OK da caixa de diálogo *Compress Group*, o componente a representar o grupo foi criado, conforme ilustrado pela Figura B-5 (a). Sua caixa de diálogo é representada na Figura B-5 (b), para a qual o botão destacado de conteúdo *Edit definitions* permite acesso à janela de edição, cuja aba *Nodes* permite edição de nome e coordenadas dos nós ou, ainda, o botão destacado *Icon Editor* concede acesso à janela de edição de ícone, conforme a Figura B-6.

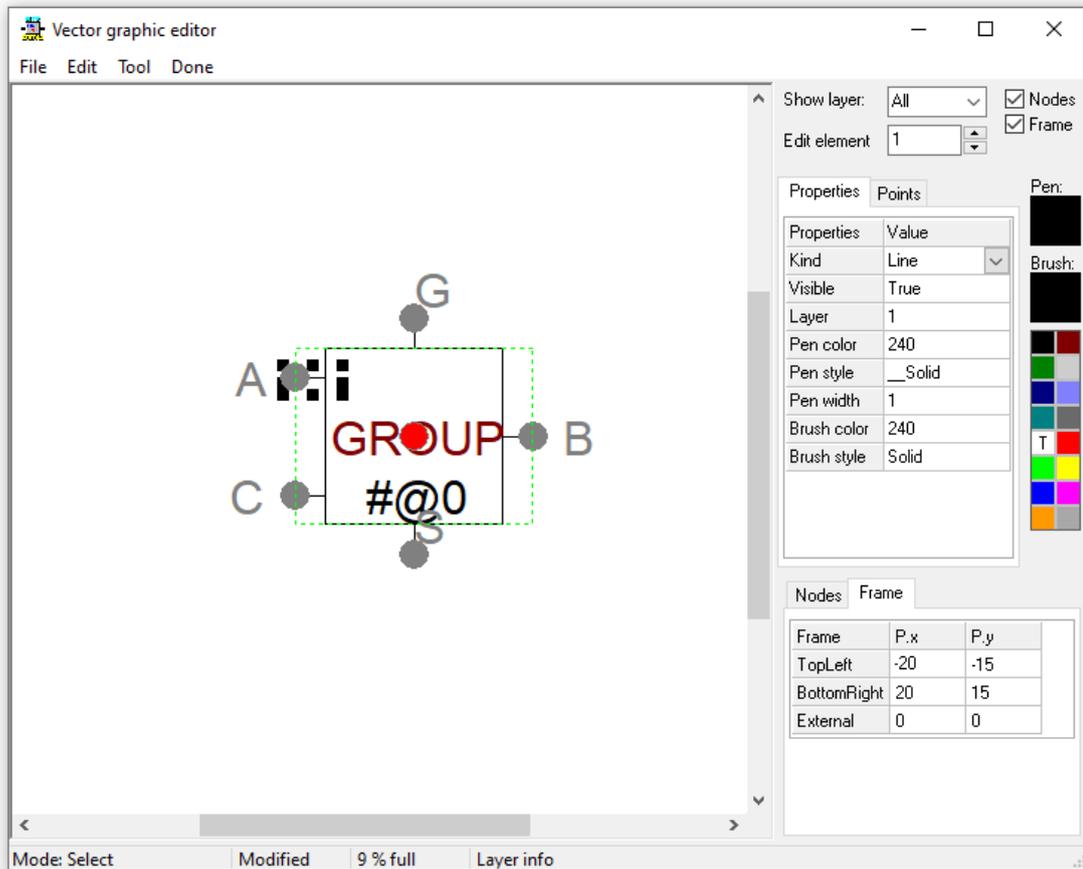
Figura B-6 – Janela de edição do componente criado pelo comando *Compress*.



Fonte: autoria própria (2021).

De acordo com a Figura B-7, as caixas de seleção rotuladas *Nodes* e *Frames* no canto superior direito da janela permitem a visualização dos nós representados em cor cinza e do quadro em linha pontilhada verde a delimitar as dimensões do componente. As guias *Edit* e *Tools*, as abas *Properties* e *Points* e o painel de cores oferecem algumas ferramentas para a criação de um novo ícone. Isso posto, a posição dos nós e as dimensões do componente podem ser ajustados ao novo ícone através das abas à direita *Nodes* e *Frame* e a edição se encerra ao pressionar o comando *Done*.

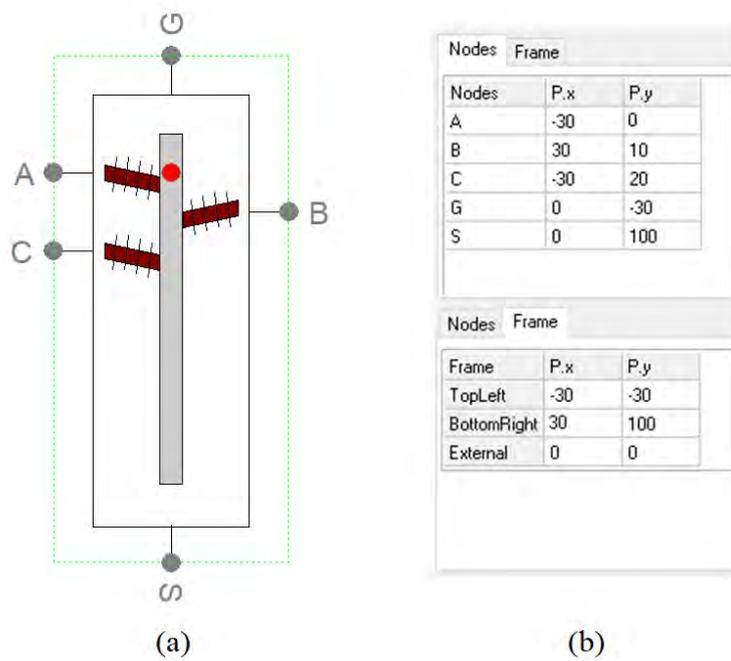
Figura B-7 – Edição de ícone do componente criado pelo comando *Compress*.



Fonte: autoria própria (2021).

Dado o exposto, para o componente criado foi elaborado o ícone da Figura B-8 (a) e então adequada a disposição de seus nós e suas dimensões, conforme Figura B-8 (b). Por fim, os componentes que compõe um grupo podem ser acessados ao selecioná-lo e utilizar o atalho Ctrl+G, ao passo que o atalho Ctrl+H permite retornar ao circuito principal (HØIDALEN; PRIKLER, 2009). Pode-se ainda extrair os componentes de um grupo ao selecioná-lo e utilizar o comando *Extract* da guia *Edit* (HØIDALEN; PRIKLER, 2009).

Figura B-8 – Ícone, disposição de seus nós e dimensões do componente criado pelo comando *Compress*.



Nodes	P.x	P.y
A	-30	0
B	30	10
C	-30	20
G	0	-30
S	0	100

Frame	P.x	P.y
TopLeft	-30	-30
BottomRight	30	100
External	0	0

Fonte: autoria própria (2021).