

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – CAMPUS AVANÇADO ITABIRITO ENGENHARIA ELÉTRICA

Eduardo Sena Batista

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 KV FRENTE
A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE UM ESTUDO DE CASO**

Itabirito – MG
Dezembro de 2023

EDUARDO SENA BATISTA

**ESTUDO DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 KV FRENTE
A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE UM ESTUDO DE CASO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Rejane de Mesquita.

Coorientador: MSc. Bernardo Nogueira Giarola.

Itabirito – MG

Dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

B333e Batista, Eduardo Sena

2024

Estudo de desempenho de linhas de transmissão de 138 kV frente a descargas atmosféricas: análise de um estudo de caso. – 2024.

78 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Avançado Itabirito, 2024.

Orientadora: Dra. Cláudia Rejane de Mesquita.

Coorientador: Me. Bernardo Nogueira Giarola.

1. ATPDraw. 2. Backflashover. 3. Descargas atmosféricas. 4. Linhas de transmissão. 5. Sobretensões. I. Batista, Eduardo Sena. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Avançado Itabirito. III. Título.

CDD 621.317

Elaborada pela Biblioteca Jarbas Nazareth de Souza – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Avançado Itabirito

Bibliotecário Responsável: Veríssimo Amaral Matias – CRB-6/3266



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Avançado Itabirito
Diretoria de Ensino
Docentes do Campus Avançado Itabirito
Rua José Benedito, 139 - Bairro Santa Efigênia - CEP 35450-000 - Itabirito - MG
- www.ifmg.edu.br

Eduardo Sena Batista

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Avançado Itabirito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

ESTUDO DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO DE 138 KV FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: ANÁLISE DE UM ESTUDO DE CASO

Aprovado em 22/12/2023 pela banca examinadora:

Profa. Dra. Cláudia Rejane de Mesquita (IFMG)
Orientador (presidente da banca avaliadora)

Me. Bernardo Nogueira Giarola
Coorientador

Prof. Dr. Eduardo José de Araújo (IFMG)
Membro avaliador

Prof. Me. Marcus Vinícius de Freitas Diadelmo (IFMG)
Membro avaliador

Itabirito, 22 de dezembro de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Vinícius de Freitas Diadelmo, Professor**, em 22/12/2023, às 18:55, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo José de Araújo, Professor**, em 22/12/2023, às 18:55, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Cláudia Rejane de Mesquita, Professora**, em 22/12/2023, às 18:56, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Bernardo Nogueira Giarola, Usuário Externo**, em 23/12/2023, às 00:53, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Sena Batista, Usuário Externo**, em 23/12/2023, às 14:40, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1782651** e o código CRC **3F4FE604**.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, por total compreensão nos momentos de extrema dedicação. O suporte foi essencial para a execução deste trabalho.

À professora orientadora Cláudia Rejane pela dedicação, paciência e todo apoio oferecido durante o TCC.

Ao meu coorientador Bernardo Nogueira Giarola pela humildade, atenção, e pelo grande apoio neste trabalho, sem ele o trabalho não poderia ser realizado.

Aos professores, pelo estímulo, conselhos e principalmente pela influência nos estudos e na carreira a seguir. Ao IFMG, por me proporcionar experiências que permitiram o enriquecimento acadêmico e profissional.

Aos amigos, pelas sugestões e incansáveis auxílios no decorrer da execução da graduação, a parceria foi mútua e espero que vá além. E a todos que direta ou indiretamente auxiliaram neste trabalho.

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa. Tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá." (SILVA, Ayrton S., 1990)

RESUMO

As descargas atmosféricas que incidem em linhas de transmissão são a principal causa de desligamentos não programados dos sistemas de transmissão, segundo as concessionárias de energia elétrica. Portanto, entender os mecanismos associados a esses desligamentos pode proporcionar o aprimoramento de ações de projeto de proteção das linhas, melhorando seu desempenho frente a tais descargas, com redução de sobretensões, faltas e desligamentos. Existem dois mecanismos de desligamento de linhas de transmissão associados à incidência de descargas atmosféricas: o *flashover*, decorrente da incidência em cabos fase, e o *backflashover*, referente à incidência em cabos de blindagem. Ambos resultam em sobretensões impulsivas que podem provocar a ruptura do isolamento da linha e seu consequente desligamento. Este trabalho se propõe a avaliar a ocorrência de *backflashover* em uma linha de transmissão típica de 138 kV frente à incidência de descargas atmosféricas. O desempenho dessa linha é simulado por meio do software ATPDraw, para determinar os níveis de sobretensões nas cadeias de isoladores frente a ondas de corrente típicas de descargas atmosféricas. Foram executadas simulações visando obter as ondas de sobretensões na linha de transmissão com aterramento de 30 ohms e 100 ohms, para descargas atmosféricas incidentes na torre e em meio de vão. Nestes casos, simulações com e sem a inserção de dispositivos para-raios foram realizadas para possibilitar a avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores e de quanto é a eficiência do dispositivo para-raios. Tendo como base os valores de sobretensões simulados e os valores calculados de suportabilidade da cadeia de isoladores em kV, foram determinadas para cada configuração estudada, o valor de corrente de descarga suportável sem a presença dos dispositivos para-raios.

Palavras-chave: ATPDraw. *Backflashover*. Descargas atmosféricas. Linhas de transmissão. Sobretensões. Para-raios.

ABSTRACT

The lightning strikes on transmission lines are the principal cause of outages in transmission systems, according to electric power utilities. Therefore, understanding the mechanisms associated with these outages can lead to the enhancement of line protection design, improving their performance against such strikes by reducing overvoltages, faults, and outages. There are two mechanisms associated with lightning strikes: flashover, due to strikes on phase conductors, and backflashover, related to strikes on shield wires. Both result in impulsive overvoltages that can cause insulation breakdown and subsequent line outage. This work aims to assess the occurrence of backflashover in a typical 138 kV transmission line when subjected to lightning strikes. The line performance is simulated using the ATPDraw software in order to determine overvoltage levels across the insulator when it exposed to typical lightning current waveforms. Simulations were conducted to obtain overvoltage waveforms for the transmission line with grounding resistances of 30 and 100 ohms, considering lightning strikes on the tower and in the middle of the span. In these cases, simulations with and without the insertion of surge arrester were carried out to enable the assessment of insulator supportability and the efficiency of surge arrester. Based on the calculated overvoltage and withstand values of the insulator in kV, the tolerable peak current value without the presence of surge arresters was determined for each configuration studied.

Keywords: ATPDraw. Backflashover. Lightning discharges. Transmission lines. Overvoltages. Surge arresters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Incidência de uma descarga atmosférica.....	21
Figura 2 – Densidade de descargas atmosféricas do país.....	22
Figura 3 – Tipos de descargas atmosféricas.....	24
Figura 4 – Forma de onda típica da corrente de descarga atmosférica.....	25
Figura 5 – Parâmetros típicos de ondas de correntes negativas de retorno.....	25
Figura 6 – Torre de transmissão L6 da CEMIG.....	28
Figura 7 – Sobretensão resultante de uma descarga atmosférica em linha não blindada.....	29
Figura 8 – Incidência de descarga atmosférica em linha trifásica blindada.....	30
Figura 9 – Isoladores de suspensão em forma de disco.....	32
Figura 12 – Aterramento de pé de torre.....	34
Figura 11 – Para-raios de linha de transmissão.....	36
Figura 10 – Falsos cabos de sustentação.....	38
Figura 13 – Interface do software ATPDraw.....	39
Figura 14 – Linha de transmissão típica de 138 kV modelada no ATPDraw.....	41
Figura 15 – Modelo da função Heidler, simbolizando as descargas atmosféricas.....	42
Figura 16 – Onda de corrente da descarga atmosférica.....	43
Figura 17 – Modelo de linha de transmissão do ATPDraw.....	45
Figura 18 – Rotina LCC da linha de transmissão, estrutura do tipo do L6 ATPDraw.....	45
Figura 19 – Modelo de torre de transmissão do ATPDraw.....	46
Figura 20 – Modelo de isolador criado no ATPDraw.....	47
Figura 21 – Modelo de tensão versus tempo da curva de suportabilidade da cadeia de isoladores.	48
Figura 22 – Curva de suportabilidade da cadeia de isoladores.....	49
Figura 23 – Modelo de para-raios proposto pelo IEEE.....	49
Figura 24 – Modelo de medidor de tensão do ATPDraw.....	51
Figura 25 – Modelo de medidor de corrente do ATPDraw.....	51
Figura 26 – Modelo de divisor do ATPDraw.....	51
Figura 27 – Modelo de fonte AC source (1&3) do ATPDraw.....	52
Figura 28 – Modelo de impedância impulsiva de aterramento do ATPDraw.....	52
Figura 29 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no cabo para- raios no topo da torre, torre L6 com aterramento de 30 Ω	54
Figura 30 – Tensão entre a mística e a fase A, com o dispositivo para-raios.....	54

Figura 31 – Tensão entre a mística e a fase A, sem o dispositivo para-raios.	56
Figura 32 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no cabo para-raios no topo da torre, torre L6 com aterramento de 100 Ω	57
Figura 33 – Tensão entre a mística A e a fase A, com o dispositivo para-raios.	58
Figura 34 – Tensão entre a mística e a fase A, sem o dispositivo para-raios.	59
Figura 35 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no meio de vão, torre L6 com aterramento de 30 Ω	60
Figura 36 – Tensão entre a mística e a fase A, com o dispositivo para-raios.	61
Figura 37 – Tensão entre a mística e a fase A, sem o dispositivo para-raios.	63
Figura 38 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no meio de vão, torre L6 com aterramento de 100 Ω	64
Figura 39 – Tensão entre a mística e a fase A, com o dispositivo para-raios.	65
Figura 40 – Tensão entre a mística e a fase A, sem o dispositivo para-raios.	66
Figura 41 – Sobretensões na torre devido a incidência de uma descarga atmosférica de pico 45 kA no topo da torre, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω	67
Figura 42 – Sobretensões nos terminais dos isoladores devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω . Figuras b e c, correspondem ao detalhamento dos casos simulados sem e com para-raios.	68
Figura 43 – Sobretensões na torre devido à incidência da descarga atmosférica de pico 45 kA em meio de vão, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω	69
Figura 44 – Sobretensões na torre devido à incidência da descarga atmosférica de pico 45 kA no topo da torre e no meio de vão, com resistência de aterramento de 30 Ω	70
Figura 45 – Sobretensões na torre devido à incidência da descarga atmosférica de pico 45 kA no topo da torre e no meio de vão, com resistência de aterramento de 100 Ω	71
Figura 46 – Sobretensões nos terminais dos isoladores devido à incidência de descarga atmosférica em meio de vão, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω . Figuras b e c correspondem ao detalhamento dos casos simulados sem e com para-raios.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas pela amplitude em kA...42	
Tabela 2 – Parâmetros de entrada da função Heidler referentes às descargas de 5 kA até 90 kA no ATPDraw. 43	43
Tabela 3 – Níveis de suportabilidade das cadeias de isoladores. 47	47
Tabela 4 – Valores das descargas atmosféricas na torre L6, com resistência de aterramento de 30 Ω. 56	56
Tabela 5 – Valores das descargas atmosféricas na torre L6, com resistência de aterramento de 100 Ω. 59	59
Tabela 6 – Valores das descargas atmosféricas no meio de vão, com resistência de aterramento de 30 Ω..... 62	62
Tabela 7 – Valores das descargas atmosféricas no meio de vão, com resistência de aterramento de 100 Ω..... 66	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
C	Capacitor
CAA	Condutor de alumínio com alma de aço
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LT	Linha de transmissão
L	Indutor
LCC	<i>Line Constants Calculation</i>
LLS	<i>Lightning Location Systems</i>
MCS	<i>Morro do Cachimbo Station</i>
MOV	<i>Metal Oxide Varistor</i>
PBPE	Para-raios poliméricos tipo estação
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TSIA	Tensão de suportabilidade ao impulso atmosférico
NBI	Nível básico de isolamento
NBR	Norma Brasileira
Rt	Resistência de aterramento

R	Resistor
SEP	Sistema elétrico de potência
SE	Subestação
SIN	Sistema Interligado Nacional
VAA	Tensão no cabo da fase A
VMISA	Tensão na mísula A

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização do tema	17
1.2	Objetivos	18
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>18</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>18</i>
1.3	Estrutura da monografia	18
2	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, LINHAS DE TRANSMISSÃO E ATERRAMENTO	20
2.1	Descargas atmosféricas	20
2.1.1	<i>Incidências de descargas atmosféricas em Minas Gerais.....</i>	<i>21</i>
2.1.2	<i>Tipos de descargas atmosféricas.....</i>	<i>23</i>
2.1.3	<i>Parâmetros de influência no desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas..</i>	<i>24</i>
2.2	Composição de linhas de transmissão	26
2.3	Fenômenos resultantes da incidência das descargas atmosféricas em LTs	28
2.3.1	<i>Flashover.....</i>	<i>29</i>
2.3.2	<i>Backflashover.....</i>	<i>30</i>
2.4	Aterramentos elétricos em linhas de transmissão.....	31
3	MELHORIAS DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	32
3.1	Aumento do número de isoladores na linha de transmissão	32
3.2	Resistência de aterramento	33
3.2.1	<i>Aterramento de pé de torre</i>	<i>34</i>
3.2.2	<i>Resistividade do solo.....</i>	<i>35</i>
3.3	Cabos para-raios	35
3.4	Dispositivos para-raios	36
3.5	Técnicas de melhorias não convencionais.....	37
3.5.1	<i>Técnica de falsos estais</i>	<i>37</i>
3.6	<i>Alternative Transients Program (ATP).....</i>	<i>38</i>
4	METODOLOGIA	40
4.1	Modelagem da descarga atmosférica	41
4.2	Estudo de Caso: LT de 138 kV	43
4.3	Modelagem da linha de transmissão	44

4.4	Modelagem da torre de transmissão.....	46
4.5	Modelagem da cadeia de isoladores pelo método de integração.....	47
4.6	Modelagem do dispositivo para-raios	49
4.7	Modelagem do medidor de tensão.....	50
4.8	Modelagem do medidor de corrente.....	51
4.9	Modelagem do componente divisor	51
4.10	Modelagem da tensão da rede 138 kV	51
4.11	Modelagem do aterramento.....	52
5	SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TRABALHO	53
5.1	Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre - torre com aterramento de 30 ohms.....	53
5.2	Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre - torre com aterramento de 100 ohms.....	57
5.3	Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica em meio de vão - torre com aterramento de 30 ohms.....	60
5.4	Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica em meio de vão - torre com aterramento de 100 ohms.....	63
5.5	Análises dos resultados	66
6	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
	ANEXO A – MODELO DE ISOLADOR PELO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO	78

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é considerada um elemento catalisador do desenvolvimento e da globalização, portanto é uma necessidade indispensável para a sociedade.

Ao verificarmos a atual configuração do sistema nacional, é perceptível que ela é caracterizada por grandes empresas de geração de energia elétrica, que em sua maioria se localizam distantes dos grandes centros consumidores, fazendo com o que o sistema se torne muito dependente do fornecimento da eletricidade proveniente das usinas.

Pela grande extensão territorial do país, o fluxo de potência de energia elétrica percorre longas distâncias por meio de instalações que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), constituído principalmente por subestações (SEs) e as linhas de transmissão (LTs) (EPE, 2024).

Ademais, em um sistema onde a eletricidade percorre longas distâncias, como na transmissão, há maior vulnerabilidade à ocorrência de eventos que possam comprometer a transmissão dessa energia.

Dentre os eventos indesejáveis encontra-se a incidência de descargas atmosféricas em LTs, atingindo o cabo guarda, ou cabo fase ou a torre. Tal incidência pode resultar nos fenômenos como *flashover* ou *backflashover*, que se concretizam com o estabelecimento de ruptura nas cadeias de isoladores, resultando em desligamento da LT e a consequente redução dos índices de desempenho.

1.1 Contextualização do tema

O estado de Minas Gerais é caracterizado por possuir solos de elevada resistividade e elevadas taxas de incidência de descargas atmosféricas. Tais condições resultam numa maior probabilidade de ocorrência de desligamentos das LTs devido às sobretensões resultantes nos isolamentos da linha. Dessa forma, é de suma importância criar métodos que minimizem as sobretensões nos isoladores da LT. Para tanto, é usual aplicar algumas práticas, tais como: a inserção de cabos de blindagem, dispositivos para-raios, aumento no número de isoladores e melhorias na impedância do aterramento (pé de torre).

Considerando que a maioria das LTs possui cabos de blindagem, também denominados cabos para-raios, e considerando-se que a maioria dos eventos relacionados à incidência direta de descargas atmosféricas está associada ao mecanismo *backflashover*, o presente trabalho se concentra na análise de tais casos, não abordando, portanto, as chamadas falhas de blindagem resultantes da incidência em cabos fases, consequente, *flashover*.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo de sobretensões associadas à incidência de descargas atmosféricas em cabos para-raios de uma linha típica de transmissão de 138 kV. Nele, busca-se avaliar, por meio de um estudo de caso, a efetividade de algumas das principais práticas de proteção na melhoria de desempenho e quais são os fatores mais relevantes na severidade das sobretensões esperadas e o impacto no desempenho da linha frente a descargas atmosféricas.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, têm-se:

- Levantamento das principais práticas que têm sido adotadas para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas;
- Simulações de sobretensões resultantes na linha através do uso do software ATPDraw;
- Impacto do uso de dispositivos para-raios em pontos estratégicos da LT;
- Análise da relação dos níveis de sobretensões com o aterramento da torre atingida;
- Analisar o efeito dos principais parâmetros que condicionam a severidade das sobretensões;

1.3 Estrutura da monografia

A monografia está organizada em cinco capítulos, sendo este primeiro dedicado a apresentar a justificativa e os objetivos do trabalho desenvolvido. No segundo capítulo são apresentados os fundamentos teóricos básicos do fenômeno e da composição das LTs, necessários para o desenvolvimento do trabalho.

No terceiro capítulo discorre-se sobre a busca de trabalhos atuais publicados no tema: melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente à incidência de descargas atmosféricas.

No quarto capítulo é descrita a metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho, apresentando os modelos empregados na representação dos componentes da linha de transmissão em estudo.

No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações desenvolvidas no software ATPDraw. As análises conclusivas do trabalho encontram-se no sexto e último capítulo desta monografia.

2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, LINHAS DE TRANSMISSÃO E ATERRAMENTO

Neste capítulo é descrito, de forma sucinta, o fenômeno natural das descargas atmosféricas, como são formadas, os tipos de descargas existentes e os efeitos que causam em sistemas elétricos. Uma vez que o estudo de caso foi desenvolvido tendo como referência as LTs do estado de Minas Gerais, buscou-se, a caracterização da incidência de descargas nuvem-solo nesse estado, retratada na seção 2.1. Ademais, é de suma importância verificar os tipos existentes e quais parâmetros das formas de onda das correntes de descargas são mais importantes para o desenvolvimento deste estudo.

A seção 2.2 tem o objetivo de caracterizar a composição das LTs, com foco em linhas de 138 kV.

Ainda neste capítulo, são descritos os mecanismos de *flashover* e *backflashover*, além de seus efeitos nas linhas de transmissão.

2.1 Descargas atmosféricas

As descargas atmosféricas são descargas elétricas de extensão de quilômetros, de grande intensidade e de pequena duração, que acontecem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões da atmosfera (INPE, 2022). A descarga começa quando o campo elétrico produzido por essas cargas excede a rigidez dielétrica do meio, estabelecendo um canal ionizado, ainda dentro da nuvem, que é lançado para fora, sob condição muito intensa de campo. Tal canal evolui por passos em direção à superfície terrestre e mais cargas elétricas da nuvem são depositadas ao longo do canal. Nas proximidades do solo, surgem canais ascendentes com cargas de polaridade oposta à do canal descendente em evolução. Tal processo resulta em um último salto conectando os canais, momento esse em que ocorre o fluxo da corrente da descarga atmosférica, denominada corrente de retorno. Tal onda de corrente, caracterizada como impulsiva e intensa, resulta em diversos efeitos, tais quais: calor, emissão de radiação eletromagnética, em parte sob forma de luz (relâmpago), e onda sonora (trovão) devido à expansão do ar local (INPE, 2022). Esse processo descrito corresponde a uma descarga caracterizada como descendente, onde a conexão final entre os canais ocorre próxima ao solo. Existem as chamadas descargas ascendentes, em que o canal ascendente percorre seu caminho em direção à nuvem e a conexão ocorre em pontos bem mais altos. No entanto, a maioria dos eventos nuvem-solo são descendentes, ainda mais se tratando de regiões tropicais (VISACRO FILHO, 2005). A Figura

1 mostra a imagem de duas descargas atmosféricas nuvem-solo descendentes, obtidas através de câmeras rápidas (MUNDO DA ELÉTRICA, 2022).

Figura 1 – Incidência de uma descarga atmosférica.



Fonte: SHUTTERSTOCK / MIHAI SIMONIA, 2023.

O foco é dado à incidência de descargas atmosféricas descendentes e de polaridade negativa (que transferem cargas negativas para a terra), por representarem a maior parte das descargas envolvendo nuvem e solo (VISACRO FILHO, 2005). Tais descargas, por terminarem em solo, causam os efeitos mais catastróficos, pela incidência direta em pessoas, estruturas, ou no solo, provocando incêndios ou até mesmo a morte de algum indivíduo que possa vir a ser atingido. Todavia, os efeitos provenientes de uma descarga próxima também são perigosos, devido à variação rápida da corrente, que pode gerar elevadas tensões induzidas em condutores, provocando interferências eletromagnéticas em aparelhos eletrônicos e surtos de tensão nos sistemas elétricos (RAKOV e UMAN, 2007).

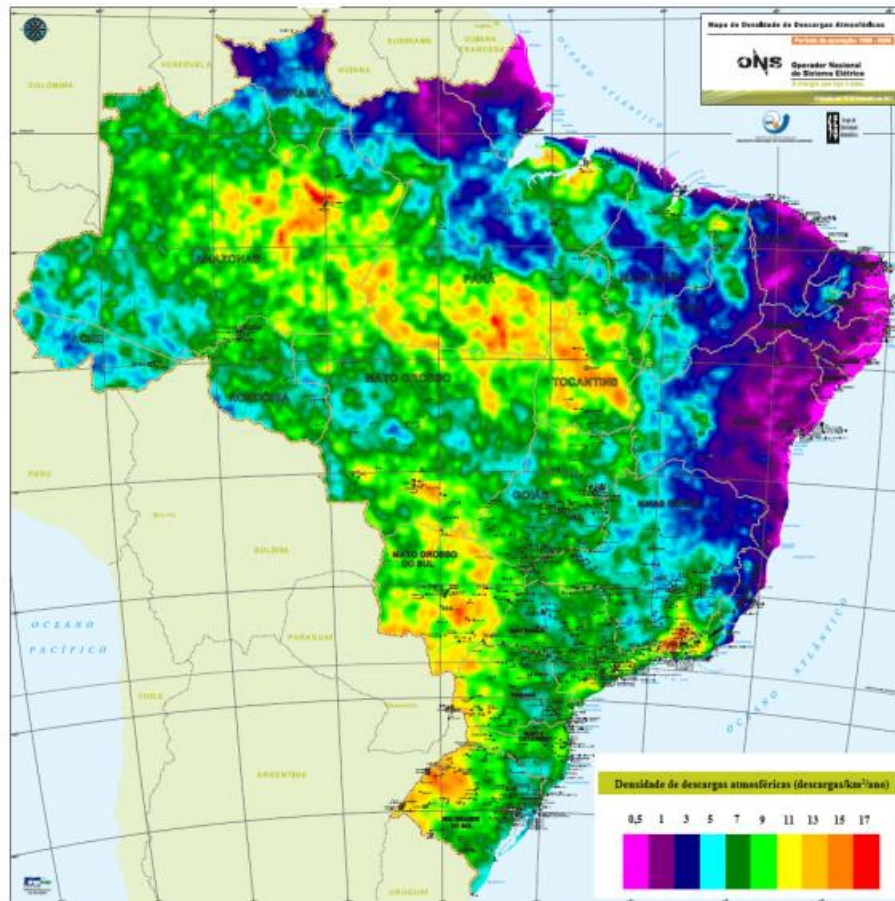
2.1.1 Incidências de descargas atmosféricas em Minas Gerais

Visto que o Brasil é um dos países em que mais ocorrem descargas atmosféricas (BARRETO, 2016), é de suma importância o conhecimento dos níveis de densidade de

descargas atmosféricas em solo. O foco principal será no território do Estado de Minas Gerais, principalmente nos locais que possuem maiores níveis de ocorrências.

No estado mineiro, a incidência acontece a uma taxa que pode variar entre 3 a 15 descargas/km² ao ano, sendo que os maiores níveis são encontrados nas regiões sul e sudeste do estado, conforme visto no mapa de densidade de descargas atmosféricas (BARRETO, 2016), (Figura 2).

Figura 2 – Densidade de descargas atmosféricas do país.



Fonte: BARRETO, 2016.

Quanto maior for o número de descargas atmosféricas, maior será a probabilidade de incidências nas LTs, bem como, possíveis desligamentos.

O conhecimento da densidade de descargas, referida na literatura como N_g , bem como da resistividade do solo, relevo e resistência de aterramento das torres ao longo da LT, permite avaliar estratégias de ação, tais quais melhoria de projetos e alocação de dispositivos para-raios, a fim de minimizar os impactos da incidência de descargas atmosféricas (CIGRÉ, 2021) (VISACRO, SOARES JÚNIOR, *et al.*, 2004).

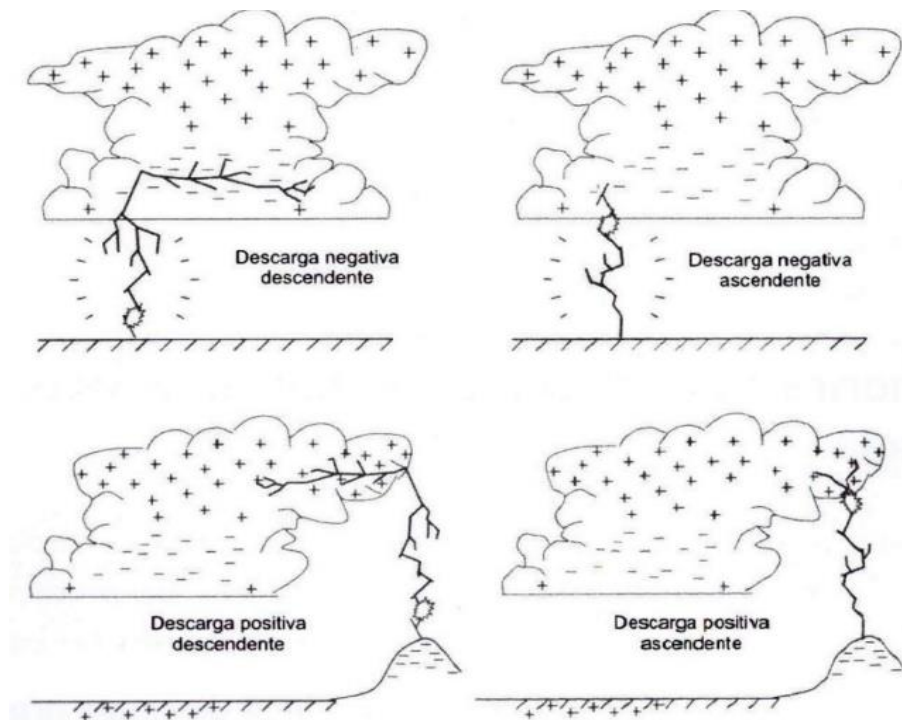
2.1.2 Tipos de descargas atmosféricas

Descargas atmosféricas podem ocorrer dentro da nuvem, da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, entre nuvens, e até mesmo de uma nuvem para a atmosfera. Tais fenômenos ocorrem geralmente em tempestades. As descargas podem ser descendentes ou ascendentes e, quanto à polaridade da carga transferida para solo, podem ser classificadas como positivas ou negativas. Porém, o foco deste estudo são as descargas descendentes negativas (RAKOV e UMAN, 2007).

Descargas descendentes são originadas nas nuvens e evoluem em direção ao solo, constituindo um canal precursor descendente. Já as descargas ascendentes originam-se no solo e progridem em direção à nuvem, constituindo um canal precursor ascendente. A Figura 3 ilustra os quatro tipos de descargas envolvendo nuvem-solo. As descargas mais frequentes são as descargas negativas descendentes, sendo elas as responsáveis pela maior parte das solicitações nos sistemas elétricos (VISACRO FILHO, 2005).

As descargas atmosféricas podem, ainda, ser caracterizadas como únicas ou múltiplas. A primeira corresponde àquela que é constituída por uma única corrente de retorno. As descargas múltiplas são aquelas em que ocorrem descargas subsequentes, no mesmo canal ionizado criado pela corrente de retorno. Tais descargas, chamadas subsequentes, podem atingir pontos distintos do primeiro ponto de impacto. Segundo referências mundiais, a multiplicidade média é de 3 a 5 correntes de retorno, com intervalos típicos de 60 microssegundos (CIGRÉ, 2021).

Figura 3 – Tipos de descargas atmosféricas.



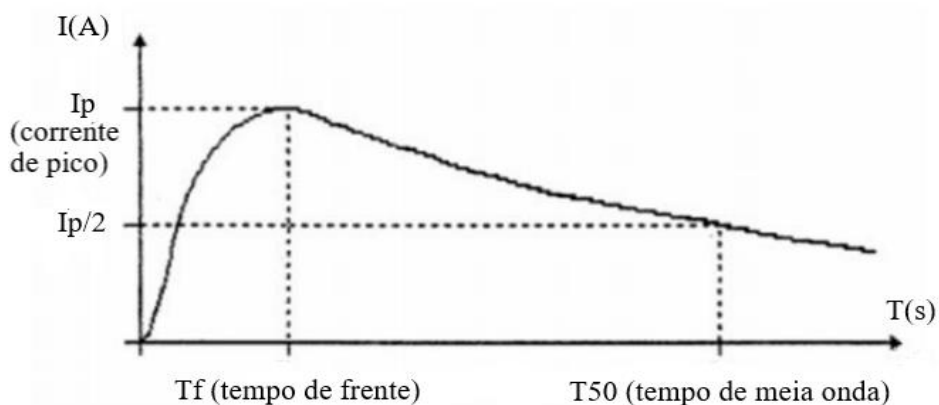
Fonte: VISACRO FILHO, 2005.

As descargas atmosféricas são responsáveis por 70% dos desligamentos não programados em LTs no Brasil (INPE, 2022). Locais que possuem altos valores de resistividade do solo e altas atividades cerâmicas podem configurar os piores cenários, podendo causar problemas de forma direta ou indireta no sistema elétrico de potência (VISACRO FILHO, 2005).

2.1.3 Parâmetros de influência no desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas

A forma de onda típica da corrente de descarga atmosférica é caracterizada pela forma de impulso, com rápido tempo de frente e duração de algumas dezenas de microssegundos. Os principais parâmetros que as caracterizam são apresentados nos próximos itens e mostrados na Figura 4, que ilustra, de forma estilizada, a forma de onda de uma corrente de retorno que, neste caso, apesar de se referir a uma descarga negativa, representa o módulo da corrente.

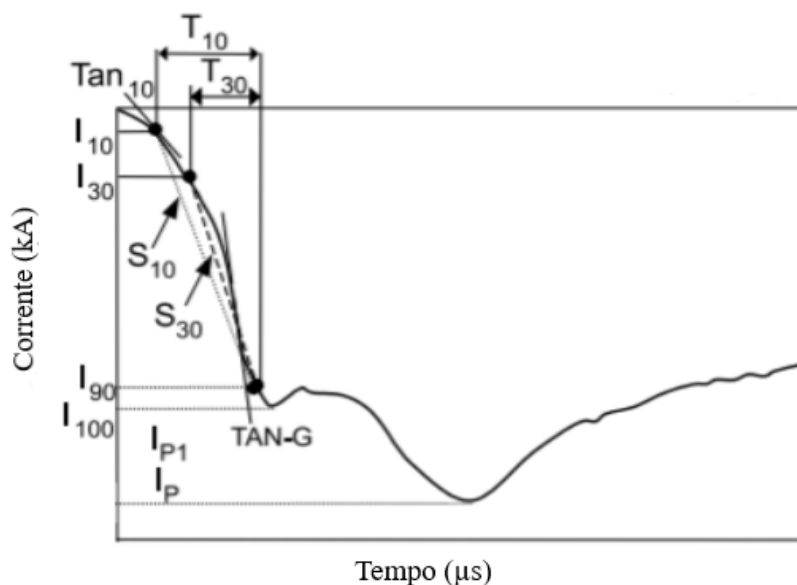
Figura 4 – Forma de onda típica da corrente de descarga atmosférica.



Fonte: adaptado de VISACRO FILHO, 2005.

A primeira descarga de retorno, seja de uma descarga única ou múltipla, é caracterizada por dois picos. O primeiro, de menor amplitude e tempo de frente reduzido, seguido pelo segundo, de maior amplitude, como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Parâmetros típicos de ondas de correntes negativas de retorno.



Fonte: CIGRÉ, 2021.

A seguir são definidos os principais parâmetros de caracterização das ondas de descargas atmosféricas, bem como a definição de densidade de descargas que quantifica a ocorrência delas em solo. Todas as definições são baseadas em Cigré (2021) e Visacro Filho (2005).

Amplitude da onda de corrente

A amplitude da corrente também é chamada de crista da onda ou de valor de pico, correspondendo ao valor máximo alcançado. Tal parâmetro é caracterizado pelo símbolo I_p .

Tempo de frente da onda de corrente

O tempo de frente da onda, T_f , é definido pelo intervalo de tempo que corresponde ao início da onda impulsiva até o alcance do primeiro pico da onda, I_p .

Tempo de meia onda

O tempo de cauda ou tempo de meia onda, denominado T50, corresponde ao intervalo de tempo entre o início da onda de descarga e o momento em que a corrente, passado pelo instante de pico, atinge o valor de $\frac{I_p}{2}$.

Máxima taxa de subida da onda

A taxa de subida da onda é o indicador que determina a derivada máxima da onda de corrente que acontece próximo ao primeiro pico, como resultado do aspecto côncavo da frente de onda. Esse parâmetro tem a unidade dada em kA/ μ S.

Dentre os parâmetros mencionados, o valor de pico da corrente é o fator principal na determinação do nível de sobretensão resultante na cadeia de isoladores da linha (VISACRO FILHO, 2005; CIGRÉ, 2021)

Densidade de descargas atmosféricas

A densidade de descargas atmosféricas corresponde ao número de descargas que incidem em uma área de um quilômetro quadrado no intervalo de um ano, conhecida também pela sigla Ng, número de descargas atmosféricas/km² ao ano. Importante destacar que esse número se refere à chamada descarga plena, que na literatura internacional é denominada *lightning flash*, que inclui tanto as únicas como as múltiplas.

O Ng pode ser extraído dos chamados mapas de densidades de descargas, construídos a partir de base de dados de incidência de descargas, como aqueles obtidos através dos sistemas de localização de descargas atmosféricas (LLS, do inglês *Lightning Location Systems*) ou com níveis estimados a partir dos sistemas de detecção óptica em satélites. Uma síntese dos principais sistemas para caracterização do Ng pode ser encontrada na referência (CIGRÉ, 2021).

2.2 Composição de linhas de transmissão

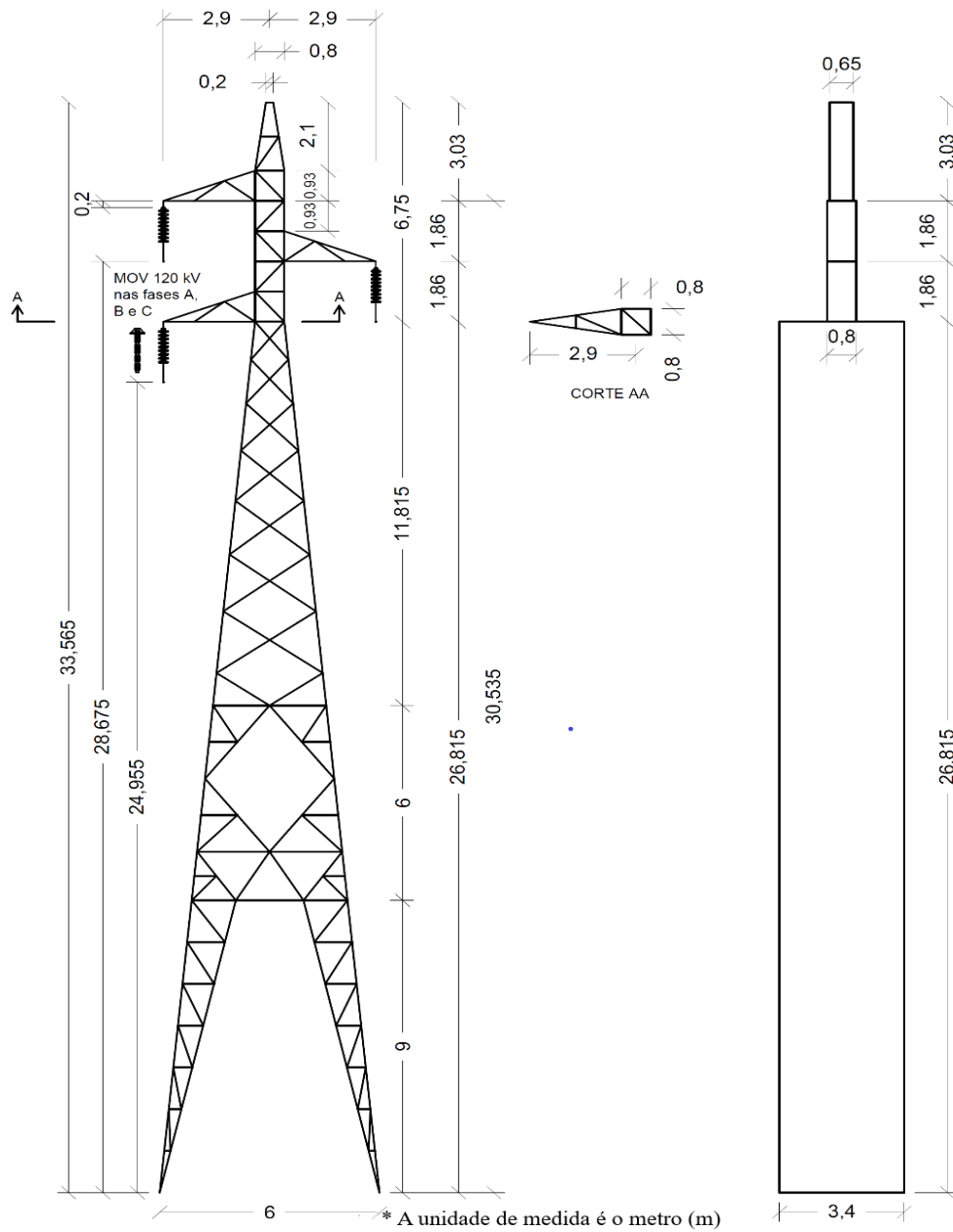
Uma linha de transmissão aérea é composta por um conjunto de cabos condutores, torres, acessórios, isoladores elétricos e sistema de aterramento das estruturas. Os condutores fase, elementos ativos das LTs, são mantidos suspensos por meio de isoladores e suportes conectados

a torres ou postes. O espaçamento em ar entre condutores ao longo dos vãos da LT cumpre o papel de isolamento elétrico entre as fases e entre fases e cabo de blindagem.

Uma escolha adequada de cabos é de suma importância para o desempenho da linha e impacta no custo final do projeto. As características mais desejadas para condutores de LTs aéreas são: o custo baixo, alta condutividade elétrica, baixo peso, resistência mecânica e alta resistência à corrosão. Há vários tipos de condutores no mercado, entretanto, o mais usado é o de alumínio com alma aço, por ser leve, resistente à corrosão e muito pelo fato de ser mais econômico financeiramente.

As estruturas atuam como suporte de uma LT e têm como função a sustentação dos cabos condutores e dos demais componentes. Os cabos para-raios e os condutores devem estar distanciados do solo e entre si, além da distância mínima que os condutores devem ter do solo, número de circuitos, entre outros. Diversos tipos de estruturas são usados nos projetos, algumas delas são do tipo delta, pirâmide ou estaiada em V (LIMA, 2022). Porém, neste trabalho, será abordada a torre L6, que é comumente utilizada no Estado de Minas Gerais pela concessionária estadual e apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Torre de transmissão L6 da CEMIG.



Fonte: GIAROLA, 2016.

Os isoladores elétricos têm o intuito de permitir que os cabos condutores sejam suportados pelas estruturas e, ao mesmo tempo, sejam mantidos isolados da estrutura aterrada. Além disso, os isoladores também têm que suportar as ocorrências de natureza elétrica, como sobretensões atmosféricas.

2.3 Fenômenos resultantes da incidência das descargas atmosféricas em LTs

A incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão muitas vezes resulta em um dos dois fenômenos de sobretensão, *flashover* ou *backflashover*, em função do condutor da linha que sofreu a incidência da descarga.

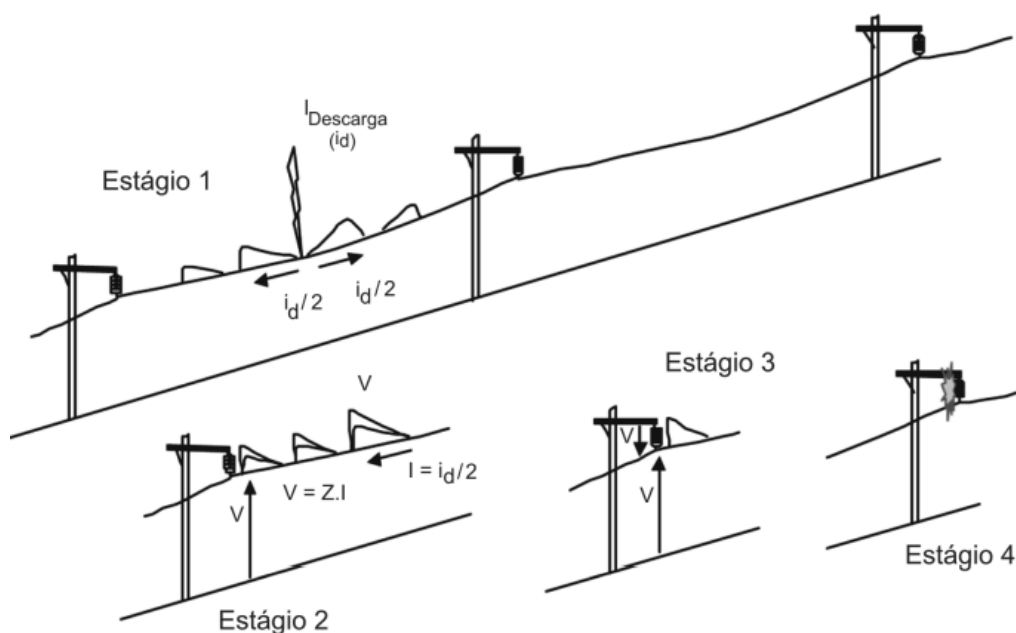
2.3.1 Flashover

O *flashover* é um fenômeno que ocorre quando acontece a incidência direta da corrente de descarga no cabo fase, seja por não ter a presença do cabo para-raios ou por falha de blindagem. Associada a essa onda de corrente impulsiva, tem-se o surto de tensão cuja magnitude depende da impedância impulsiva da linha.

O pico da tensão corresponde ao produto da impedância impulsiva pelo valor de pico da corrente de descarga. A sobretensão gerada pode levar ao rompimento do isolamento da cadeia de isoladores por meio de um arco elétrico que se estabelece entre a fase e a torre. Configura-se, então, um curto-circuito através da torre, e mesmo a onda de corrente tendo sido escoada para o aterramento, o nível de tensão de operação da linha é suficiente para manter o arco elétrico sobre a cadeia de isoladores, até que a proteção da linha atue, causando o desligamento.

A partir do instante em que a descarga incide sobre a linha de transmissão, a corrente se divide em dois valores iguais, seguindo a expressão $I = \frac{i_d}{2}$. Para cada lado da linha se ramifica um valor da corrente, e para cada valor há uma onda de tensão associada, pela impedância característica da linha, ilustrado no estágio 1 da Figura 7.

Figura 7 – Sobretensão resultante de uma descarga atmosférica em linha não blindada.



Fonte: VISACRO FILHO, 2005.

Pelo fato de a onda de corrente ser caracterizada por componentes de altas frequências, a impedância característica da linha pode ser aproximada por uma impedância de surto.

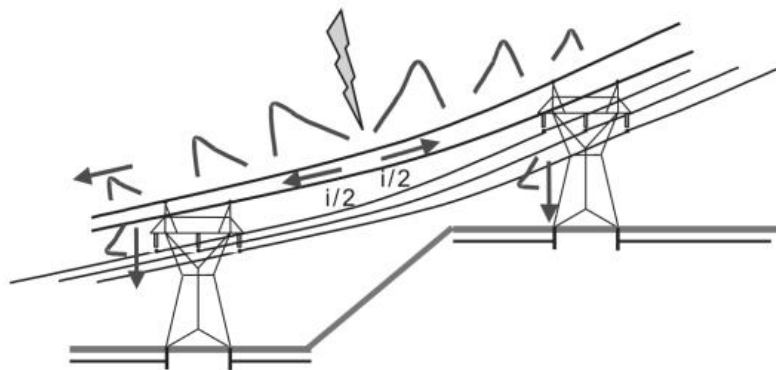
No decorrer da linha, as ondas de tensão e corrente se propagam, como mostrado no estágio 2 da Figura 7. A ilustração do terceiro estágio mostra que, ao atingir a torre aterrada, o isolador, que separa a torre do cabo fase, fica submetido à onda de sobretensão.

Dependendo do nível de sobretensão resultante no isolador, ela poderá promover a ruptura do isolamento, resultando num arco elétrico entre a torre aterrada e o cabo fase, como mostrado no estágio 4 da Figura 7. Tal arco pode se dissipar rapidamente ou ser mantido pela tensão nominal da linha. Para que um arco elétrico seja constituído, é necessária uma tensão altíssima, cujo campo elétrico associado supere a rigidez dielétrica do ar. O arco elétrico mantido acaba se configurando em um curto-circuito que pode vir a ocasionar o desligamento da linha (VISACRO FILHO, 2005).

2.3.2 *Backflashover*

Considere-se uma linha trifásica com dois cabos para-raios, como representado na Figura 8. O cabo para-raios é atingido quando ocorre uma descarga atmosférica na LT, a corrente de retorno se divide igualmente para os dois lados e a cada divisão está associada a uma onda de tensão.

Figura 8 – Incidência de descarga atmosférica em linha trifásica blindada.



Fonte: VISACRO FILHO, 2005.

As ondas de tensão e corrente se propagam ao longo do cabo para-raios até alcançarem a estrutura, onde boa parte acaba escoando pela torre em direção ao aterramento.

Caso o valor da tensão sobre a cadeia de isoladores seja superior à sua suportabilidade, resultará na ruptura do isolamento, causando a formação de um arco elétrico entre a estrutura da torre e um ou mais cabos fase. Se as circunstâncias continuarem e o arco elétrico se perpetuar, irá suceder um curto-circuito, podendo resultar no desligamento da linha de transmissão (VISACRO FILHO, 2005).

No mecanismo de *backflashover*, o nível de sobretensão resultante será menor quanto menor for a impedância de pé de torre em relação à impedância da torre, pois a onda de corrente, ao chegar ao aterramento, sofre uma reflexão negativa que contribuirá para a redução do pico de sobretensão. Essa redução se deve à superposição da onda original com a refletida, que muitas vezes ainda acontece na frente de onda, dada a altura da torre e a velocidade de propagação típica da onda através da estrutura (VISACRO FILHO, 2005).

2.4 Aterramentos elétricos em linhas de transmissão

Como em qualquer parte do sistema elétrico, o aterramento existe para evitar tensões perigosas que excedam o nível básico de isolamento do sistema. Para implementar a proteção contra descargas atmosféricas diretas, cabos para-raios são colocados adequadamente, visando assegurar a blindagem dos cabos fase contra descargas atmosféricas. Entretanto, para o adequado escoamento das cargas é necessária uma baixa resistência de pé de torre, que deve ser dimensionada no projeto e na construção da LT (ALMEIDA, 2022).

O aterramento deve ter baixa impedância para escoar para terra as correntes derivadas das descargas que o coletor captar. A presença do cabo para-raios e do aterramento no sistema de transmissão cria um circuito paralelo com os condutores de fase formando um circuito alternativo ao solo para circulação da componente de sequência zero (ALMEIDA, 2022).

O circuito de blindagem e de aterramento são também percorridos por correntes induzidas pelas correntes de fases e pelas correntes de fuga. Tais correntes escoam durante todo tempo de funcionamento da linha. Apesar de serem de pequenos valores, elas determinam o tempo de vida dos materiais deste circuito (ALMEIDA, 2022).

3 MELHORIAS DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Este capítulo se destina a apresentar algumas das principais técnicas praticadas para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a incidência das descargas atmosféricas. Existem as técnicas convencionais, tais quais o aumento do número de isoladores, inclusão dos dispositivos para-raios em algumas das torres da linha e melhoria no sistema de aterramento. Foram também pesquisadas algumas práticas não convencionais tais como, colocação de falsos estais.

Também será conduzida uma abordagem do software ATP (*Alternative Transients Program*) para avaliar a eficácia dessas práticas na mitigação dos efeitos adversos das descargas atmosféricas em LTs. Este conjunto de tópicos visa proporcionar uma compreensão abrangente das estratégias empregadas na busca por linhas de transmissão mais robustas e resilientes.

3.1 Aumento do número de isoladores na linha de transmissão

Uma das técnicas de melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é o aumento do número de isoladores elétricos na LT.

Os isoladores têm a função de suspender os condutores, isolando-os das estruturas, como ilustrado na Figura 9. Além disso, tal componente tem que suportar sobretensões em frequência industrial, surtos de sobretensões de manobra, e de sobretensões de origem atmosférica.

Figura 9 – Isoladores de suspensão em forma de disco.



Fonte: HVEX, 2022.

Antigamente, a borracha era mais utilizada como material isolante na composição dos isoladores, porém passou-se a usar a porcelana, o vidro e materiais poliméricos em sua confecção (BEZERRA, 2019).

Com o aumento dos níveis de tensão, foi necessário o crescimento das cadeias de isoladores. Consequentemente, surgiram isoladores do tipo disco, que representam um ponto importante para a construção das linhas de transmissão, criando a possibilidade de montar cadeias compostas por tantos discos isolantes quanto necessários, para a aplicação nas diversas classes de tensão das linhas de transmissão (BEZERRA, 2019).

Para situações nas quais os isoladores são compostos por discos, é aplicável o aumento do número dos elementos da cadeia de isoladores, proporcionando o aumento da distância entre as estruturas aterradas e os condutores energizados, ampliando, assim, o Nível Básico de Isolamento (NBI) da LT (SILVA, 2007).

Em condições de tempestade, o movimento dos cabos da linha de transmissão tem sua amplitude aumentada. Isto pode aproximar os condutores energizados das partes da estrutura aterrada e reduzir o nível de suportabilidade do isolamento da linha, causando justamente o efeito contrário ao desejado (SILVA, 2007).

Em relação ao desempenho das LTs frente a descargas atmosféricas, o aumento do NBI é um ponto positivo, pois aumentando a suportabilidade do isolamento, possivelmente o número de desligamentos possa vir a ser reduzido.

3.2 Resistência de aterramento

O aterramento elétrico pode ser modelado através de uma impedância elétrica. Porém, em baixas frequências, o valor da impedância se aproxima da chamada resistência de aterramento. O valor da resistência de aterramento (R_t) pode ser obtido através da relação da tensão resultante no eletrodo (V_t) e o valor da intensidade de corrente (I) através do aterramento, expresso pela Equação 1 (VISACRO FILHO, 2002).

$$R_t = \frac{V_t}{I} \quad 1$$

Pode-se dizer que a resistência de aterramento se deve à resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas que o compõem, à resistência do contato entre a terra e o eletrodo e à resistência da terra ao redor da região do aterramento, na qual o valor depende diretamente da resistividade do solo.

As configurações dos eletrodos são determinantes no cálculo da resistência de aterramento, visto que existem diversas disposições. Porém, no Brasil, a configuração típica de aterramento utilizada em linhas de transmissão é composta por cabos contrapeso.

Quanto menor o valor da R_t menores serão as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores e, conseqüentemente, menores os números de *backflashover* na linha. Dessa forma, busca-se garantir, sempre que possível, baixos valores de resistência de aterramento, também conhecida na literatura como resistência de pé de torre.

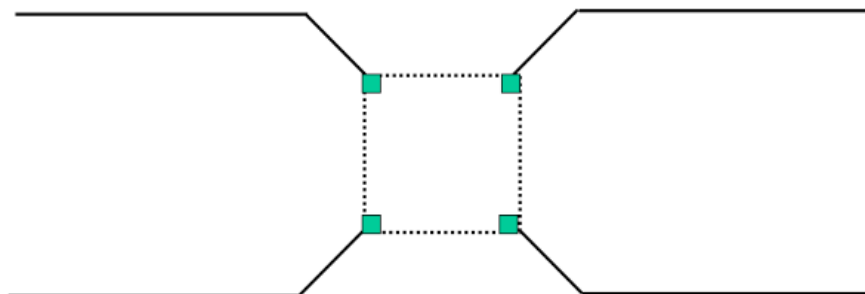
3.2.1 Aterramento de pé de torre

O aterramento de pé de torre, também conhecido como aterramento contrapeso, é composto de cabos contrapesos esticados sob o solo a uma profundidade de 0,5 metro, conforme ilustrado na Figura 10.

Possui algumas características, como a impedância de surto inicial, a resistência final de dispersão e o acoplamento com os cabos condutores e para-raios. Para dimensioná-lo, o comprimento do cabo contrapeso deve ser tal que garanta que a resistência de dispersão seja substancialmente menor do que a sua impedância de surto.

O aterramento de pé de torre é composto por um fio recoberto com cobre e está conectado aos pés das torres de uma LT. Tem como finalidade escoar as descargas atmosféricas que atingem as linhas de transmissão, além de evitar acidentes com pessoas e animais, pela tensão de toque e de passo (BEZERRA, 2020).

Figura 10 – Aterramento de pé de torre.



Fonte: CUNHA, 2010.

3.2.2 Resistividade do solo

Define-se resistividade do solo (ρ) como a resistência elétrica (R) medida entre lados opostas de um cubo de dimensões unitárias preenchidas com o solo, onde A é a área da seção transversal do condutor e L é o comprimento do condutor (Equação 2).

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad 2$$

Apesar de a resistividade do solo apresentar valores bem superiores às resistividades dos condutores elétricos, a dispersão da corrente ocorre em uma grande área de atravessamento pelas camadas de solo que envolvem os eletrodos. Desta forma, é possível se chegar a valores razoáveis de resistência de aterramento. Nos casos em que o valor de resistividade é muito grande, como encontrados em solos de Minas de Gerais, para se alcançar valores aceitáveis de resistência torna-se importante uma atenção especial à configuração de eletrodos do aterramento, e quando ainda assim não é suficiente, o emprego de dispositivos para-raios pode representar uma boa solução para reduzir os índices de desligamentos de linhas.

Existem alguns fatores que influenciam a resistividade do solo, podendo ser parâmetros determinantes para os valores locais, como: o tipo do solo, umidade, concentração e tipos de sais dissolvidos na água, compacidade do solo, granulometria do solo, temperatura do solo e estrutura geológica (VISACRO FILHO, 2002).

3.3 Cabos para-raios

Quando as descargas atmosféricas atingem diretamente uma fase da linha, produzem uma sobretensão ao longo da linha, gerando a possibilidade de disrupção da cadeia de isoladores. Os cabos para-raios têm o intuito de proteger as LTs contra desligamentos por *flashover*, tendo a finalidade de evitar a ocorrência da descarga atmosférica diretamente aos cabos energizados. São conectados à terra por estruturas aterradas que são, geralmente, as torres das linhas de transmissão (REVISTA ADNORMAS, 2022).

Ao efetuar o dimensionamento dos cabos para-raios é necessário observar alguns aspectos como elétricos, térmicos e mecânicos, com o intuito de manter a integridade física com suficiente margem de segurança em condições de trabalho.

A seção transversal do cabo para-raios deve ser definida conforme a corrente que circula no mesmo, ao longo de uma falta para a terra, tal que não provoque aquecimento elevado que venha a gerar esticamento permanente ou diminuição da carga de ruptura, reduzindo as

distâncias de segurança e colocando em risco a segurança eletromecânica da linha de transmissão.

Ao escolher o cabo para-raios, é preciso considerar eventuais elevações nas correntes de curto-circuito com a alteração ou ampliação da configuração do sistema. É viável que sua seção seja feita baseada na corrente máxima de curto-circuito e levando em conta que a corrente varie ao longo da linha, tendo seu maior valor próximo de subestações (ABNT, 2023).

3.4 Dispositivos para-raios

Os dispositivos para-raios são equipamentos que diminuem o nível de sobretensão a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos instalados, atuando como ferramenta de proteção de linhas de transmissão (MAMEDE FILHO, 2005).

Caso não sejam utilizados os dispositivos para-raios, as sobretensões, que por acaso possam ocorrer em linhas de transmissão, poderiam provocar a disrupção do dielétrico e resultar em danos ao meio ambiente, na perda de bens materiais, e às instalações. A proteção ocorre devido ao caminho condutivo de baixa impedância de surto entre fase e terra proporcionado pelo para-raios. A descarga de corrente à terra através dessa impedância de surto limita a tensão em relação à terra. Em condições normais de operação, essa impedância é suficientemente elevada para atuar como um circuito aberto e assim permanece até os para-raios serem atingidos por uma tensão de surto (GIAROLA, 2016).

O para-raios apresentado na Figura 11 é um modelo polimérico para linha de transmissão (TLA) classe 2, tipo PBPE 120/10/2/M/A-LT.

Figura 11 – Para-raios de linha de transmissão.



Fonte: BALESTRO, 2023.

A inclusão de dispositivos para-raios em torres críticas de uma linha de transmissão pode resultar na melhoria de desempenho da linha, sendo eficazes principalmente quando as linhas de transmissão possuem piores condições topográficas e de resistividade do solo. No trabalho

desenvolvido por Cunha (2010), comprovou-se a redução significativa da taxa de desligamento de uma linha de transmissão da Cemig, após a instalação de dispositivos para-raios em torres com alto índice de severidade.

3.5 Técnicas de melhorias não convencionais

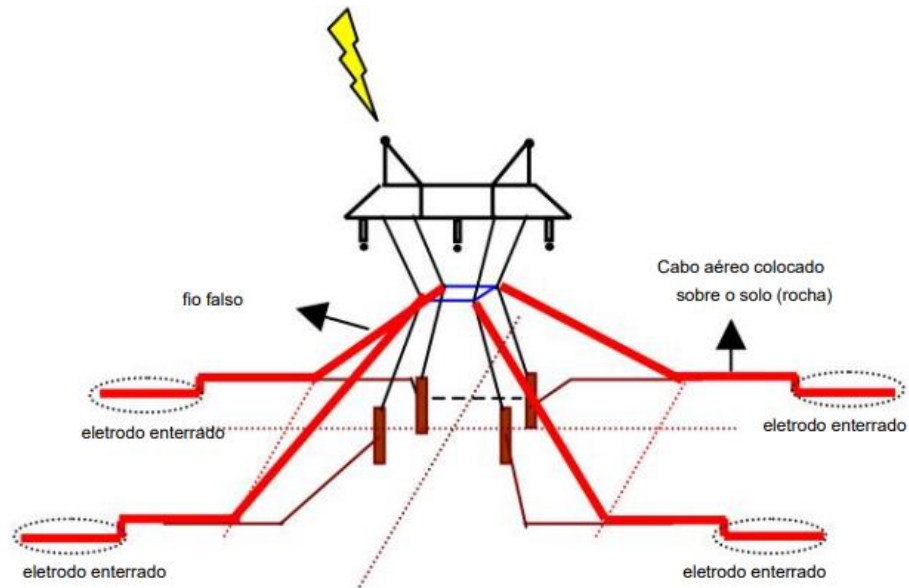
Existem alguns métodos não tão conhecidos para a melhoria do desempenho de linhas de transmissão para a incidência das descargas atmosféricas. Tais técnicas visam o efeito dos parâmetros que influenciam na amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Abrangem, sobretudo, a impedância de surto da estrutura de proteção da LT e do acoplamento eletromagnético entre os condutores energizados e as estruturas aterradas, além do somatório desses elementos com configurações espaciais dos eletrodos de aterramento (SILVA, 2007).

3.5.1 Técnica de falsos estais

Quando os cabos falsos de blindagem (*false shielding cables*) são colocados abaixo dos condutores de fase, o valor de tensão diminui significativamente. Isso ocorre pelo efeito de acoplamento capacitivo entre os cabos. O mesmo acontece quando são colocados cabos de sustentação falsos, ligando a torre a âncoras posicionadas no solo. Cada perna do contrapeso tem uma resistência de aterramento, como mostrado na Figura 12.

Dois aspectos devem ser considerados para explicar a redução da sobretensão. Primeiro, a proximidade dos condutores à superfície do solo aumenta significativamente a capacitância do cabo e, portanto, reduz sua impedância de surto. Isso promove reflexões negativas para a onda de tensão incidente, que contribuem para diminuir a sobretensão nos isoladores. Por outro lado, o comprimento do contrapeso deve ser longo o suficiente para garantir que a onda de tensão refletida positiva retorne ao topo da torre somente após o pico de tensão já ter ocorrido, a fim de evitar o efeito de reflexões positivas da onda de tensão na extremidade do contrapeso (VISACRO, SOARES JÚNIOR, *et al.*, 2004).

Figura 12 – Falsos cabos de sustentação.



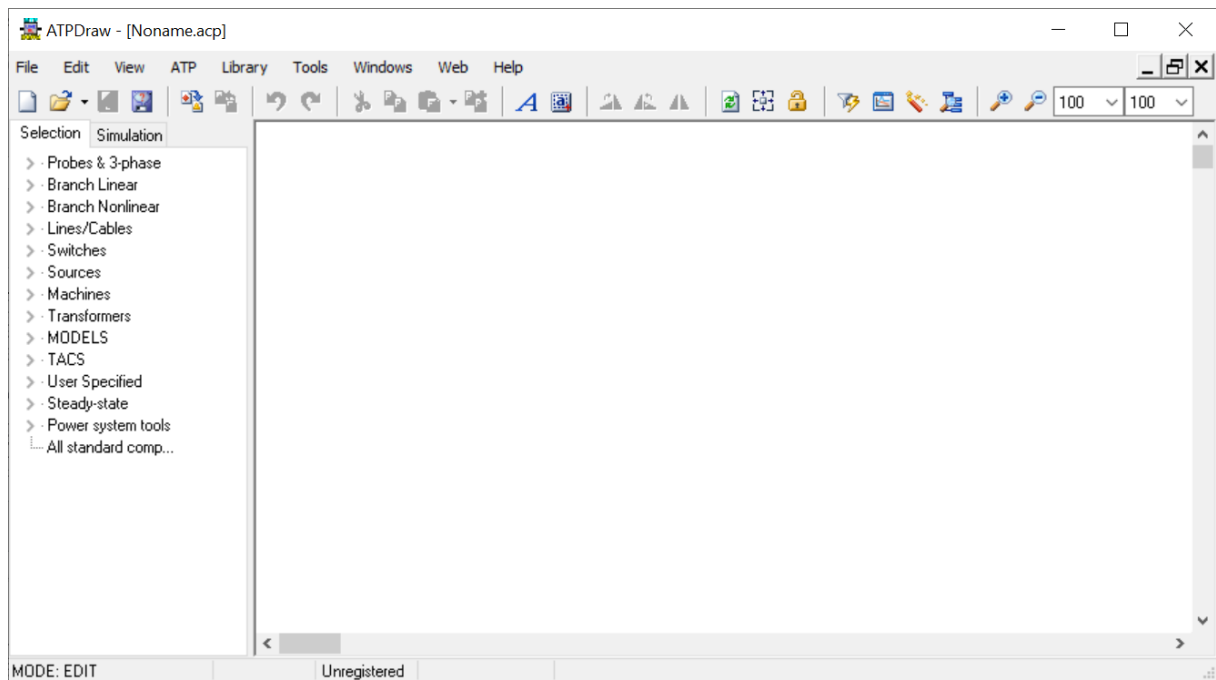
Fonte: VISACRO, SOARES JÚNIOR, *et al.*, 2004.

3.6 *Alternative Transients Program (ATP)*

O *Alternative Transients Program (ATP)* foi desenvolvido na década de 1980 aplicado à simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência (SEPs), sendo capaz de simular sobretensões, interrupções e faltas. Além disso, ele permite a representação de elementos com parâmetros concentrados ou distribuídos, transformadores, máquinas elétricas e outros diversos sistemas e configurações. O ATPDraw é a interface gráfica que organiza os arquivos do ATP, permitindo a criação de circuitos elétricos e a posterior geração do arquivo de entrada. Alguns trabalhos citam os problemas que as sobretensões causam no sistema elétrico, como foi o caso apresentado por Candemil (2018).

A Figura 13 apresenta a tela do software ATPDraw. Maiores detalhes sobre métodos e modelos para inclusão dos elementos do sistema elétrico podem ser encontrados em Giarola (2016).

Figura 13 – Interface do software ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

O ATPDraw tem sido um software bastante utilizado nas simulações de sobretensões devido às descargas atmosféricas, auxiliando a geração de resultados nas pesquisas destinadas à melhoria de desempenho nas linhas de transmissão, conforme estudos encontrados na literatura na área (MARIANO, 2012; GIAROLA, 2016; CANDEMIL, 2018).

4 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa adotada em primeira instância foi realizar um levantamento bibliográfico sobre as principais técnicas de melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente à incidência direta de descargas atmosféricas. Para o melhor entendimento das técnicas fez-se necessário o estudo mais aprofundado de grandezas e elementos das LTs que a impactam na resposta frente a incidência de descargas, tais como: a resistência de aterramento, resistividade do solo, cabo para-raios, dispositivos para-raios e o aterramento de pé de torre. Além disso, são relatadas as funcionalidades de cada um desses componentes citados anteriormente.

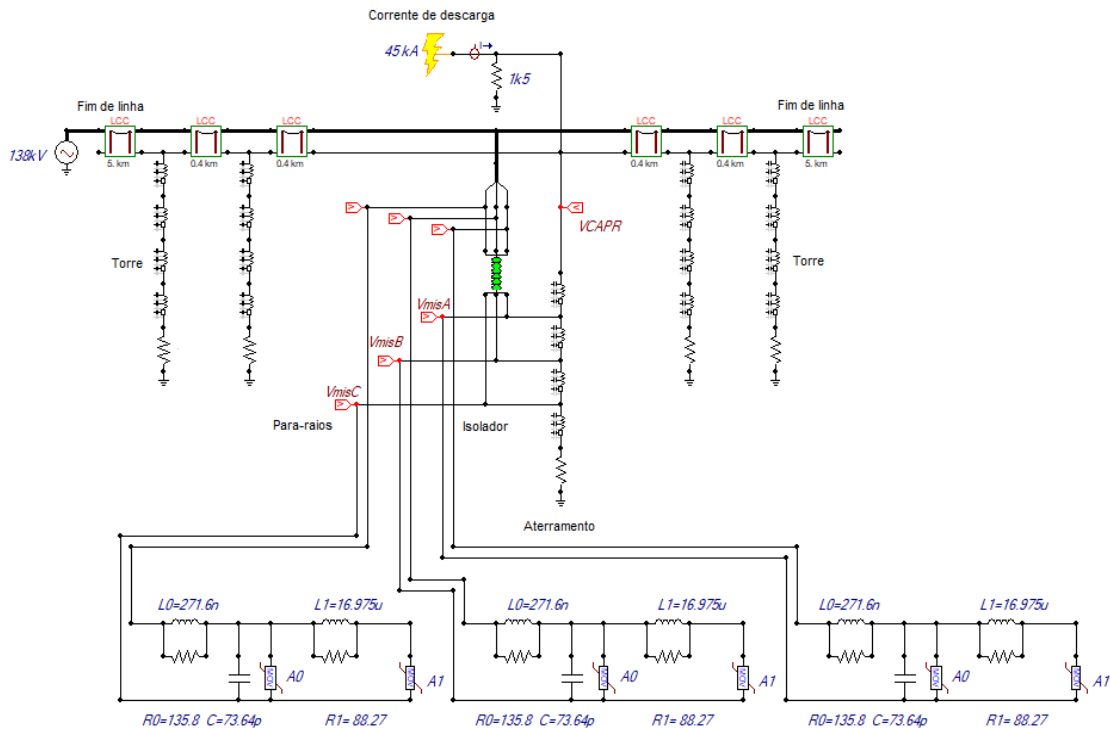
Um estudo de caso foi proposto consistindo de uma LT de 138 kV com características típicas de LTs de mesma classe de tensão encontrada em Minas Gerais.

Nessa etapa foram realizadas pesquisas em livros, artigos e materiais virtuais no tema deste trabalho, permitindo a avaliação de diferentes técnicas de aterramento e proteção do sistema elétrico de potência.

A utilização do software ATPDraw traz a possibilidade de gerar simulações, sendo possível a modelagem de componentes do aterramento e das linhas de transmissão, facilitando a geração de resultados que permitam concluir sobre a melhoria de desempenho no SEP, frente a casos de incidências de descargas atmosféricas.

A Figura 14 apresenta a linha de transmissão, na qual é possível identificar os elementos considerados no estudo, sendo eles: modelos da corrente de descarga, das torres, dos condutores da linha, do aterramento, dos isoladores elétricos e dos dispositivos para-raios. A Figura 14 ilustra as principais etapas de desenvolvimento do presente trabalho.

Figura 14 – Linha de transmissão típica de 138 kV modelada no ATPDraw.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os próximos itens são dedicados à apresentação do estudo de caso e a modelos adotados para a corrente de descarga e os componentes da LT.

4.1 Modelagem da descarga atmosférica

Neste trabalho, utilizou-se a função Heidler para simular as ondas de corrente de descargas atmosféricas com amplitudes de 5 kA até 90 kA. Tal faixa de valores foi escolhida pois representa a faixa de valores de medições reais de descargas atmosféricas em regiões tropicais, derivadas da base de dados da estação de pesquisa do Morro do Cachimbo (do inglês, Morro do Cachimbo Station - MCS), localizada na região metropolitana de Belo Horizonte (SCHROEDER, 2001).

A Tabela 1 apresenta os valores de probabilidade das descargas atmosféricas conforme amplitude de corrente indicada em kA. Em outras palavras, corresponde à probabilidade das descargas possuírem picos de corrente iguais ou superiores aos valores indicados em kA. A partir desses dados obtidos na estação do Morro do Cachimbo, pode-se dizer que o valor mediano de pico de corrente é de 45 kA.

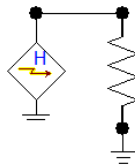
Tabela 1 – Probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas pela amplitude em kA.

Amplitude [kA]	5	10	15	25	31	45	60	90
Probabilidade [%]	—	99,9	99	88	70	50	25	6

Fonte: SCHROEDER, 2001.

O uso da função Heidler permite serem configurados a amplitude, o tempo de frente e o tempo de cauda da descarga atmosférica. Para gerar esse componente no ATPDraw, é necessário clicar com o botão direito do *mouse* > *Sources* > *Heidler Type 15* (Figura 15).

Figura 15 – Modelo da função Heidler, simbolizando as descargas atmosféricas.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

Ao modelo adicionou-se um resistor aterrado para representar a dissipação da energia da descarga atmosférica para o ambiente.

Os seguintes parâmetros são necessários para simular uma corrente de descarga pela função Heidler no ATPDraw, conforme Tabela 2:

- Amplitude: é um número multiplicativo, em ampère, da função;
- T-f: é o tempo de frente da onda, dado em segundos. Intervalo entre $t = 0$ e o valor máximo da curva. O tempo de frente foi assumido a partir do valor mediano dos registros do MCS para o parâmetro T10, que está ilustrado na Figura 5. Ao dividi-lo por 0,8 tem-se a estimativa do tempo de frente, ou tempo de pico, conforme (CIGRÉ, 2013);
- τ : é a duração da descarga de retorno em segundos, o intervalo entre $t = 0$ e o ponto na cauda em que a amplitude da função alcança 37% do seu valor de pico. O tempo tau do ATPDraw deve ser ajustado para que a amplitude de meia onda ($0,5 \times I_p$) ocorra em T50. O valor mediano para o tempo de meia onda, T50, corresponde a 53 μ s, conforme Cigré (2013) e Visacro Filho (2002);
- n: fator influenciador da taxa de subida da função ou fator de inclinação da corrente, conforme (IEC, 2010);
- Tstart: tempo na qual a função inicia, em segundo. $Tsta = 0$;
- Tstop: tempo na qual a função termina, em segundo. $Tst0 = 500 \mu$ s;

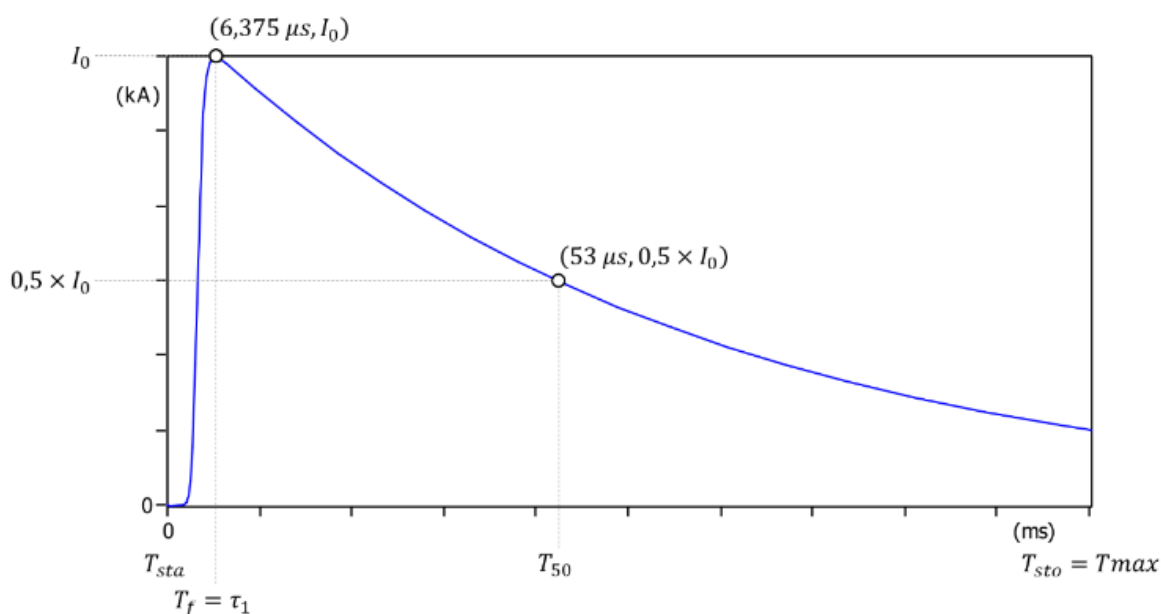
Tabela 2 – Parâmetros de entrada da função Heidler referentes às descargas de 5 kA até 90 kA no ATPDraw.

Parâmetro	Valores
Amplitude	5 kA, 10 kA, 15 kA, 25 kA, 31 kA, 45 kA, 60 kA, 90 kA
T-f	6.375E-6
T	6.635E-5
N	10
T start	0
T stop	0.0005

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

O modelo da função Heidler foi utilizado neste trabalho pelo fato de representar bem a concavidade da frente de onda, a derivada máxima e o decaimento de onda. Apesar de sua simplicidade em relação a outros modelos da literatura, abordados em Cigré (1990), ele é suficiente para representar a corrente de descargas nas análises propostas neste trabalho de TCC. A Figura 16 ilustra a onda de corrente obtida com os parâmetros aqui definidos.

Figura 16 – Onda de corrente da descarga atmosférica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.2 Estudo de Caso: LT de 138 kV

Como estudo de caso foi considerada uma LT de 138 kV (Figura 14), com características típicas de LTs encontradas no estado de Minas Gerais. Suas principais características são:

- Extensão da linha de 11,6 km (GIAROLA, 2016);
- Torres do modelo L6, como a apresentada na Figura 6, onde é possível ver as dimensões (GIAROLA, 2016);

- Comprimento médio de vãos (distância entre torres) de 400 metros (GIAROLA, 2016);
- O cabo fase é um condutor de alumínio com alma de aço (CAA), codinome Linnet. E o cabo para-raios é um condutor de aço revestido de alumínio do tipo Alumoweld ASTM B-416 (GIAROLA, 2016);
- Resistência de 30 ohms ou 100 ohms para representar a resistência de pé de torre. Valores considerados típicos em linhas de transmissão no estado (CUNHA, 2010);
- Resistividade média do solo de 1000 ohms-metro, assumindo-se terra homogênea. Dado escolhido conforme a teoria de Carson (VISACRO FILHO, 2002);
- Dispositivos para-raios: os utilizados foram do modelo IEEE, os quais são os mais adequados para a situação abordada.
- Isolador: foi utilizado o método de integração, o mais adequado para verificar a ocorrência de *backflashover* na cadeia de isoladores de uma linha trifásica.

Para construir o caso estudo no software ATPDraw, os componentes da LT foram interligados como mostrado na Figura 14. Nos próximos itens são explicados os modelos empregados para os componentes da LT.

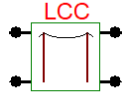
4.3 Modelagem da linha de transmissão

Dentre as rotinas existentes no ATPDraw, tem-se a rotina de parâmetros distribuídos dependentes da frequência, LCC template, empregada neste trabalho. Adota-se, neste trabalho, a representação do modelo JMartí para a linha de transmissão, considerando a dependência da frequência dos parâmetros da linha (GIAROLA, 2016).

No ATPDraw, os parâmetros considerados no modelo LCC template incluem as coordenadas dos condutores das fases e do cabo para-raios, comprimento do vão, quantidade de fases e as propriedades físicas dos condutores (como raio e resistência), resistividade do solo, entre outros.

Para incluir tal componente, é necessário clicar com o botão direito do *mouse* em *Line/Cables > LCC template* (Figura 17 e Figura 18).

Figura 17 – Modelo de linha de transmissão do ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

Figura 18 – Rotina LCC da linha de transmissão, estrutura do tipo do L6 ATPDraw.

A imagem mostra a janela de configuração 'Line/Cable Data: LTO' com as seguintes configurações visíveis:

- System type:** Name: LTO, Template, Overhead Line, #Ph: 4.
- Standard data:** ρ_{ho} [ohm*m]: 1000, Freq. init [Hz]: 60, Length [km]: 5, Set length in icon.
- Options:** Transposed, Auto bundling, Skin effect, Segmented ground, Real transf. matrix.
- Units:** Metric, English.
- Model Type:** Bergeron, PI, JMarti, Semlyen, Noda.
- Data:** Decades: 8, Points/Dec: 10, Freq. matrix [Hz]: 500000, Freq. ωS [Hz]: 60, Use default fitting.
- Buttons:** OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View (destacado), Verify, Edit defin., Help.

Fonte: GIAROLA, 2016.

Nessa rotina foram incluídos 4 cabos, sendo 3 cabos fase e 1 cabo para-raios, devido ao formato e definição da torre L6.

Para que as reflexões no fim de linhas não afetassem a simulação, foi necessária a utilização de vãos de comprimentos elevados nos vãos extremos da linha, simulando um casamento de impedância nas extremidades. A linha de transmissão é considerada não transposta.

Os parâmetros do modelo adotados no estudo são:

- $l = 400 \text{ m}$ – É a distância entre vãos da linha de transmissão;
- $f = 60 \text{ Hz}$;
- $\rho = 1000 \Omega.m$ – Resistividade do solo da terra homogênea (teoria de Carson) (VISACRO FILHO, 2002);
- $f_{matriz} = 500 \text{ kHz}$ – O ATPDraw recomenda permanecer dentro da faixa de 1 Hz a 1 MHz e que a frequência da matriz seja selecionada em torno da resposta de

frequência dominante do estudo. O IEEE (1996) propõe a obtenção de parâmetros de linha em frequência constante, entre 400 kHz e 500 kHz, para simulação de sobretensões atmosféricas, conforme Cigré (1990);

- *Points/decade*: O ATPDraw recomenda que o número de pontos de frequência por década seja em torno de 10;
- Os condutores de fase empregados são de alumínio com alma de aço, enquanto o condutor do cabo para-raios é de aço revestido de alumínio;

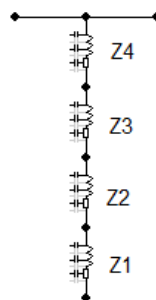
4.4 Modelagem da torre de transmissão

Há uma grande variedade de opções de estruturas existentes. Sendo assim, a definição de qual modelo de torre utilizar representa uma importante etapa do trabalho. Neste estudo de caso foi viável implementar o método mais utilizado, que é representar as torres por meio de parâmetros de circuitos.

Devido aos tempos de frente curtos relacionados às descargas atmosféricas, grande parte dos modelos de torres implementadas no ATPDraw consideram somente o efeito eletromagnético transversal da onda (CIGRÉ, 1991). Para compensar os caminhos paralelos pelas treliças percorridos na torre, adotou-se como velocidade de propagação de onda de 85% da velocidade da luz, resultando em $2,55 \times 10^8 \text{ m/s}$ conforme recomendação do Cigré (2021).

São utilizadas quatro impedâncias de surto em série, como indicado na Figura 19. Para configurá-las, basta clicar com o botão direito do *mouse* > *Line/Cables* > *Distributed* > *Transposed lines (Clarke)* > *1 phase*.

Figura 19 – Modelo de torre de transmissão do ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

A primeira porção de baixo para cima, aqui denominada de impedância de surto $Z_1 = 204,43 \, \Omega$, vai do solo até a altura da fase C. A impedância $Z_2 = 271,09 \, \Omega$ vai da mísula da fase C até a mísula da fase B, a impedância $Z_3 = 274,82 \, \Omega$ vai da mísula da fase B até a mísula da

fase A, a impedância $Z_4 = 289,67 \Omega$ vai da mísula da fase A até o cabo para-raios (GIAROLA, 2016).

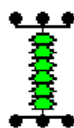
4.5 Modelagem da cadeia de isoladores pelo método de integração

Como dito anteriormente, os isoladores desempenham um papel importante nos sistemas elétricos, dentre eles a isolação dielétrica entre os cabos das fases e a estrutura da torre.

Foi utilizado o modelo do método de integração, a fim de prever o desempenho do isolamento em função de parâmetros da forma de onda. Visando o estudo de sobretensão e ocorrência ou não de *backflashover* na cadeia de isoladores, foi incorporado às simulações no ATPDraw o algoritmo desenvolvido por Mariano (2012), também apresentado no Anexo A deste texto.

Para representar o modelo abaixo no software, é necessário clicar com o botão direito do *mouse* > *MODELS* > *Default model* (Figura 20). Ao abrir a janela propriedades, clicar em *Edit*, inserir a rotina apresentada no Anexo A e clicar em *Done*, para que o arquivo seja gerado.  viável mudar a disposição dos terminais de conexão em *Edit definitions* > *Nodes*. Há a disposição do componente em *bitmap*, onde é possível desenhar o componente, e em *vector*, podendo ser gerado por meio de coordenadas (x, y).

Figura 20 – Modelo de isolador criado no ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

Os níveis de suportabilidade das cadeias de isoladores devem respeitar os valores normatizados e tais valores dependem da classe de tensão, conforme pode ser visto na Tabela 3, extraída de Mariano (2012).

Tabela 3 – Níveis de suportabilidade das cadeias de isoladores.

Nível de tensão de operação da linha (kV)	Valor mínimo de tensão suportável ao impulso atmosférico (TSIA)	Valor usual da TSIA
69	380	450
138	650	850
230	975	1200
345	1240	1350
500	1612	1750

Fonte: MARIANO, 2012.

O nível máximo de sobretensão que a cadeia de isoladores suporta para uma linha típica de 138 kV, sem que haja ruptura, pode ser estimado através da Equação 3 :

O modelo matemático abaixo foi proposto por Darveniza et al. (1975) para descrever a característica de isoladores de porcelana em sistemas de ultra alta tensão (UAT), frente a impulsos não normalizados.

$$V = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}} \right) d \quad 3$$

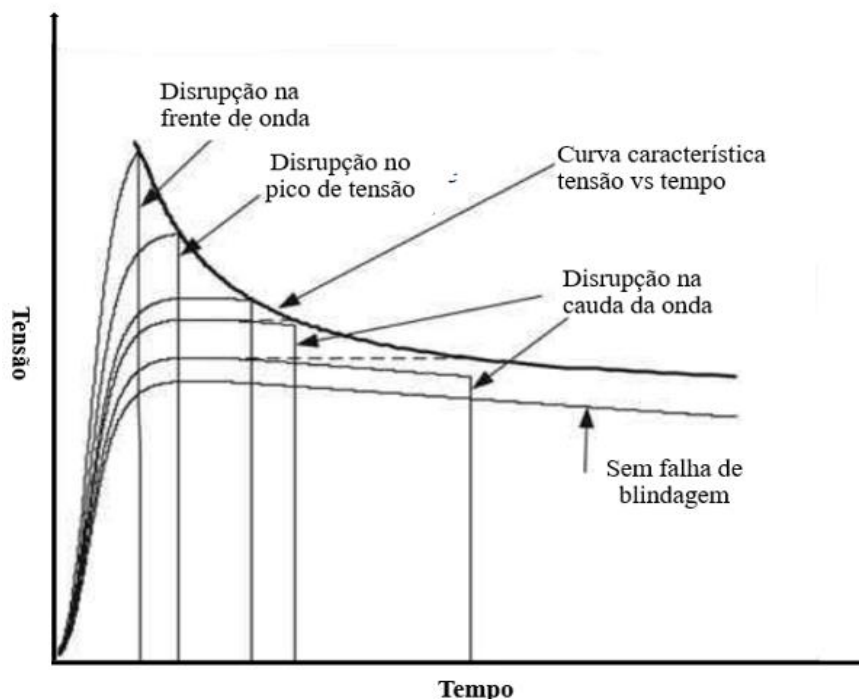
Fonte: DARVENIZA, 1975.

Onde:

- V é o valor de pico da tensão de ruptura, em kilovolt.
- t é o tempo de ruptura, em microssegundos (*time-to-breakdown*).
- d é o comprimento da cadeia de isoladores, em metro ($d = 1,358$).

Essa função resulta em uma curva como a apresentada em **negrito** na Figura 21. Nesta figura, são ilustradas sobretensões de diferentes valores de pico e os tempos de ruptura em que a curva de suportabilidade é ultrapassada. O entendimento desse comportamento é muito importante para compreensão das simulações realizadas e análise dos resultados encontrados.

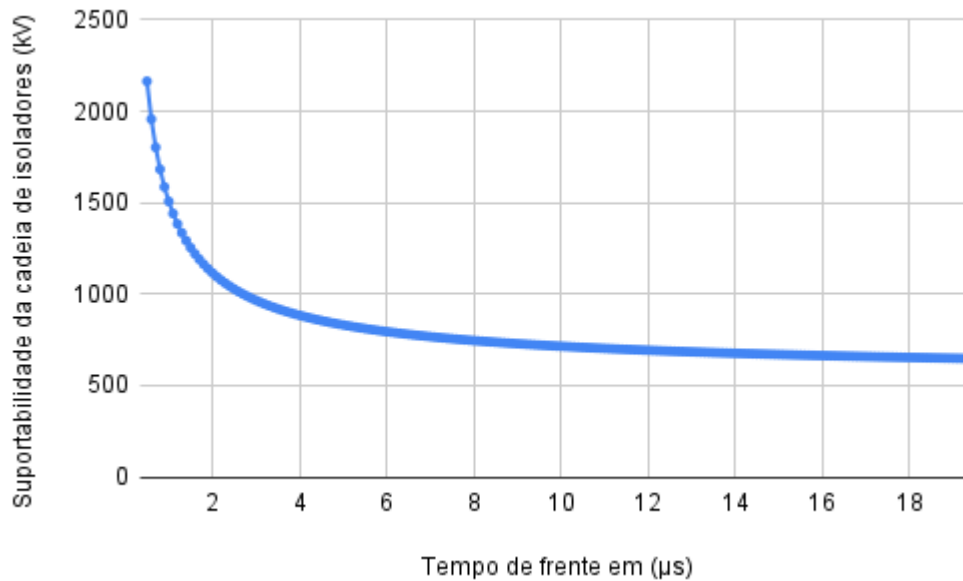
Figura 21 – Modelo de tensão versus tempo da curva de suportabilidade da cadeia de isoladores.



Fonte: MARTINEZ-VELASCO, 2009.

Para a cadeia de isoladores empregada neste trabalho, obtemos a curva de suportabilidade conforme ilustrada na Figura 22.

Figura 22 – Curva de suportabilidade da cadeia de isoladores.

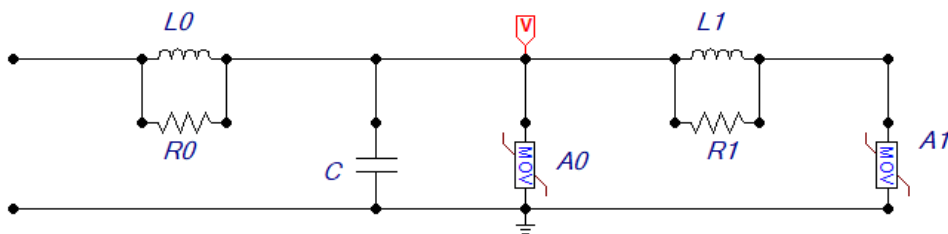


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.6 Modelagem do dispositivo para-raios

Foi considerado o modelo de para-raios do IEEE (Figura 23), considerando que o mesmo é empregado em simulações de impulsos atmosféricos e de manobra em subestações, com impulsos de frente de onda íngreme, em alta e extra alta tensão (IEEE, 1992).

Figura 23 – Modelo de para-raios proposto pelo IEEE.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

O modelo do IEEE foi escolhido porque é o modelo mais adequado para descargas atmosféricas, conseguindo representar o pico de tensão residual que ocorre antes do pico de corrente nos ensaios reais de alta frequência com para-raios.

Uma de suas desvantagens é que ele não considera os efeitos dos terminais de ligação. O qual requer um modelo complexo, exigindo muitas simulações por tentativa e erro e testes de campo na especificação dos componentes inseridos no modelo e de dados específicos dos para-raios.

Os parâmetros utilizados no modelo adotado neste trabalho são:

- Comprimento do invólucro $d = 1,358 \text{ m}$;
- Número de colunas de disco de ZnO em paralelo $n = 1$;
- Tensão nominal $V_n = 120 \text{ kV}$;
- $V_{ref} = 240 \text{ kV}$ – Conforme o modelo do ATPDraw, essa tensão deve ser o dobro da tensão nominal do para-raios;
- V_{ss} – Tensão residual de impulso de manobra de $0,5 \text{ kA } 30/60 \mu\text{s}$;
- V_{10} – Tensão residual de impulso atmosférico para uma corrente de $10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}$;

Elementos do modelo de circuito do IEEE:

- $L_0 = 271,6 \text{ nH}$ – Branch Linear > Inductor;
- $L_1 = 16,975 \mu\text{H}$ – Branch Linear > Inductor;
- $R_0 = 135,8 \Omega$ – Branch Linear > Resistor;
- $R_1 = 88,27 \Omega$ – Branch Linear > Resistor;
- $C = 73,64 \text{ pF}$ – Branch Linear > Capacitor;
- A_0 e A_1 : os valores iniciais são obtidos da tabela do IEEE (1992). A_0 e A_1 correspondem a resistências não lineares e podem ser encontradas em *Branch Nonlinear > MOV Type 92*.

4.7 Modelagem do medidor de tensão

Este modelo representa um medidor de tensão, que pode ser monofásico, bifásico, trifásico ou multifásico. Para gerar esse componente, é necessário clicar com o botão direito do mouse > *Probes & 3-phase > Probe Voltage* (Figura 24).

Figura 24 – Modelo de medidor de tensão do ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

4.8 Modelagem do medidor de corrente

Representa um medidor de corrente, que pode ser monofásico, bifásico, trifásico ou multifásico. Para gerar esse componente, é preciso clicar com o botão direito do *mouse* > *Probes & 3-phase* > *Probe Current* (Figura 25).

Figura 25 – Modelo de medidor de corrente do ATPDraw.

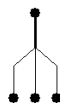


Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

4.9 Modelagem do componente divisor

Representa um separador de fases, onde há a possibilidade de separar o sistema trifásico em três sistemas monofásicos. Serve também para representar curto-circuito entre fase-fase e fase-terra. Para gerar esse componente, é necessário clicar com o botão direito do *mouse* > *Probes & 3-phase* > *Splitter (3 phase)* (Figura 26).

Figura 26 – Modelo de divisor do ATPDraw.



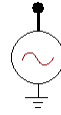
Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

4.10 Modelagem da tensão da rede 138 kV

Esse modelo representa uma fonte alternada trifásica, onde ela está configurada em $138\sqrt{2}$ kV de pico. Para obter este componente, deve-se clicar com o botão direito do *mouse* > *Sources* > *AC source (1&3)* (Figura 27).

A fonte AC pode ser modelada com os dados de tensão eficaz ou de pico como: $V_{rms} = 138\text{kV}$, quando selecionada *Voltage* > *3 phase* > *Degress* > *RMS LG* > *Grounded*, e quando for tensão de pico $V_{peak} = 138\sqrt{2}$ kV = 195,161 kV, *Voltage* > *3 phase* > *Degress* > *Peak LG* > *Grounded*. A frequência permanece sendo a da rede, $f = 60$ Hz.

Figura 27 – Modelo de fonte AC source (1&3) do ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

4.11 Modelagem do aterramento

Foi utilizado o modelo de parâmetros concentrados, representado por uma resistência linear. Este modelo pode ser inserido da respectiva forma: clicar com o botão direito do *mouse* > *Branch linear* > *Resistor* (Figura 28). O valor da impedância impulsiva deve ser inserido, ao invés da resistência.

Figura 28 – Modelo de impedância impulsiva de aterramento do ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2023.

Assim, fixamos a impedância de aterramento, ora em 30 ohms, ora em 100 ohms, visto que são valores medianos demonstrados em (CUNHA, 2010) e a resistividade em 1000 ohms-metro.

5 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TRABALHO

Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas através de simulações que objetivaram investigar as sobretensões oriundas da incidência de descargas atmosféricas na linha em estudo. Inicialmente, torna-se importante deixar claro quais as grandezas relacionadas às sobretensões que são consideradas: a tensão da fase A (VAA), a tensão entre a mísula e a terra (VMISA), e no cabo para-raios (VCAPR), conforme circuito da Figura 14.

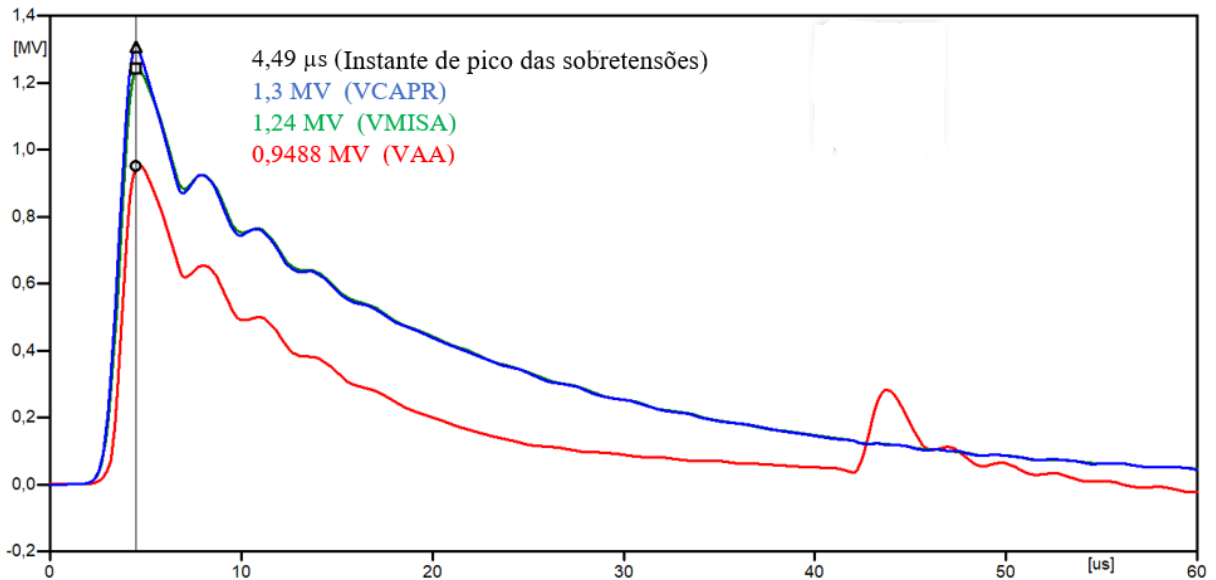
Antes das simulações de incidências de descargas foi simulado os valores das tensões nesses pontos da torre. Como esperado, na operação em regime permanente senoidal, foram obtidas as tensões nominais nas fases e potencial zero no cabo para-raios e nas mísulas da torre. Tais verificações foram confirmadas tanto para o aterramento de 30 ohms quanto de 100 ohms.

A seguir são apresentadas as simulações de incidência de descargas atmosféricas na linha de transmissão, considerando inicialmente a incidência no topo da torre e, posteriormente, em meio do vão. Em ambos os casos é avaliado o efeito do aterramento das torres.

5.1 Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre - torre com aterramento de 30 ohms

Com o propósito de ilustrar a dinâmica de apresentação de resultados das simulações, optou-se por simular primeiramente a incidência de uma descarga de 45 kA no cabo para-raios instalado no topo da torre. A simulação gerou as ondas de sobretensões resultantes no cabo para-raios (VCAPR), na mísula da fase A (VMISA) e no cabo fase A (VAA), apresentadas na Figura 29. Neste caso, considerou-se a presença do dispositivo para-raios paralelo à cadeia de isoladores. A tensão nos terminais desses equipamentos pode ser vista na Figura 30, que corresponde à diferença ponto a ponto da onda de sobretensão da mísula A e do cabo fase A.

Figura 29 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no cabo para-raios no topo da torre, torre L6 com aterramento de 30 Ω .



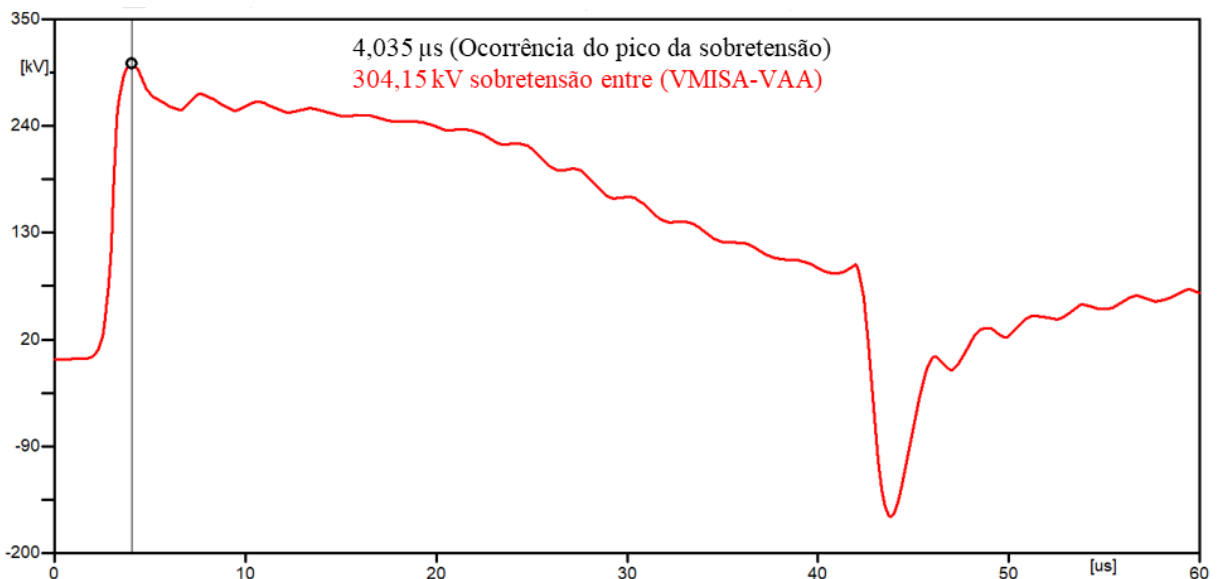
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Conforme observado na Figura 29, temos:

- VCAPR ($t = 4,49 \mu s$) = 1,3 MV.
- VMISA ($t = 4,49 \mu s$) = 1,24 MV.
- VAA ($t = 4,49 \mu s$) = 948,8 kV.

Ao considerar a onda de sobretensão, apresentada na Figura 30, observa-se que o valor máximo foi de 304,15 kV, que acontece no instante de 4,035 μs .

Figura 30 – Tensão entre a mÍsula e a fase A, com o dispositivo para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Pode-se observar na cauda da sobretensão um pico de polaridade inversa, que possivelmente está associado ao efeito de reflexão da onda que ocorre ao final da linha (a 5,8 km do ponto de incidência da descarga). Assumindo-se que a velocidade de propagação seja próxima à velocidade da luz, a expectativa é que a parcela do surto se propague no cabo fase por um tempo de cerca de 20 microssegundos até o final da linha, onde sofre reflexão, e retorne ao ponto de impacto da linha após o mesmo intervalo de tempo, sobrepondo-se à onda original. Tal comportamento pode ser notado na sobretensão do cabo fase VAA ilustrado na Figura 29. De qualquer forma, como o objetivo é avaliar o valor de pico que ocorre nos momentos iniciais da sobretensão, a variação que ocorre na cauda não impacta nos estudos desse trabalho.

A máxima tensão encontrada não supera a tensão residual do para-raios, neste caso 320 kV, logo, ele não terá danos.

Para o isolador é considerada a Equação 3, aplicando exatamente o instante de pico da tensão nos seus terminais, $t = 4,035 \mu s$, obteve-se a tensão de disrupção de 881,87 kV, valor bem superior à sobretensão gerada nos terminais. Em outras palavras, não haverá *backflashover* na cadeia de isoladores.

No entanto, ao considerar o mesmo caso, porém sem a existência dos dispositivos para-raios na torre, a tensão resultante na cadeia de isoladores é superior à suportabilidade, o que resultaria na disrupção e constituição do arco elétrico (*backflashover*).

Para o tempo de $t = 4,47 \mu s$, com a ocorrência do pico da descarga atmosférica na linha de transmissão sem os dispositivos para-raios, obteve-se uma tensão de disrupção do isolador de 856,837 kV.

Foram simuladas injeções de corrente de diferentes amplitudes no cabo de blindagem (no topo da torre) para obtenção dos níveis de sobretensão, com e sem a presença de dispositivos para-raios. A Tabela 4 apresenta os valores encontrados. Conforme a Equação 3 utilizada para o cálculo de suportabilidade da cadeia de isoladores, quanto maior for o instante de pico da sobretensão resultante em seus terminais menor será a sua suportabilidade. A Figura 31 apresenta a onda de sobretensão nos terminais do isolador para a intensidade de corrente de 34,93 kA.

Tabela 4 – Valores das descargas atmosféricas na torre L6, com resistência de aterramento de 30 Ω .

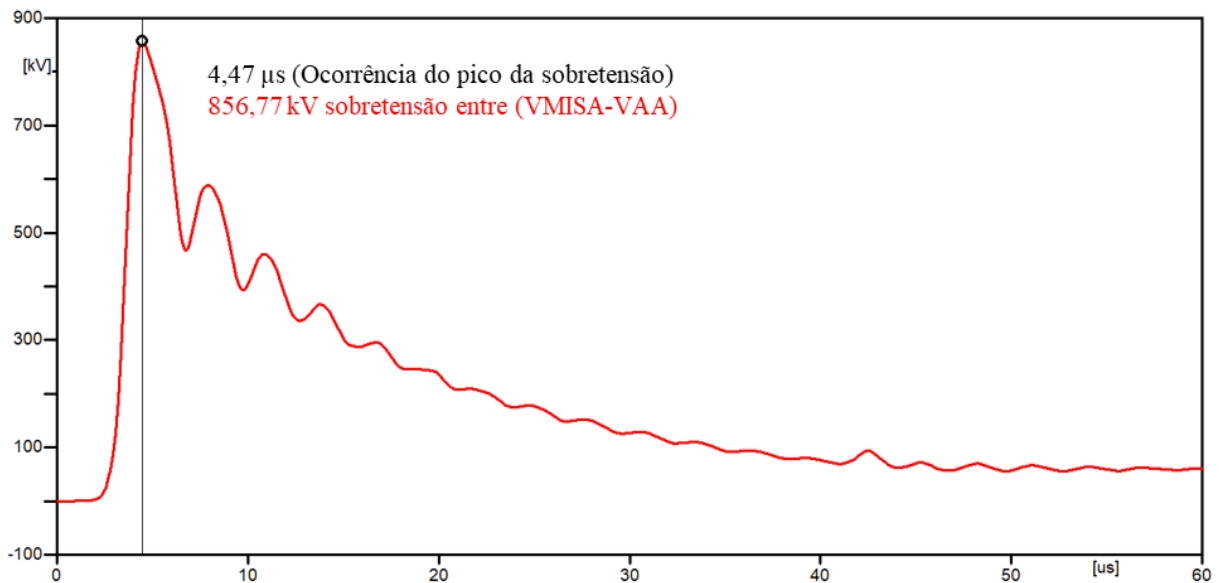
Amplitudes das descargas atmosféricas	Sobretensão na cadeia dos isoladores com para-raios	Sobretensão na cadeia dos isoladores sem para-raios
5 kA	122,59 kV	122,47 kV
10 kA	229,33 kV	245,14 kV
15 kA	256,22 kV	367,81 kV
25 kA	278,53 kV	613,15 kV
31 kA	287,77 kV	760,35 kV
45 kA	304,15 kV	1,1 MV
60 kA	316,4 kV	1,47 MV
90 kA	331,75 kV	2,2 MV

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Objetivando a busca do valor máximo de pico de corrente que a cadeia de isoladores suportaria sem a presença dos dispositivos para-raios, simulou-se a incidência de descargas com picos compreendidos entre 31 kA e 40 kA, encontrando-se o valor de 34,93 kA.

A cadeia de isoladores suporta descargas atmosféricas menores do que ou iguais a 34,93 kA, sem para-raios, já que para essa descarga foi obtida uma sobretensão de 856,77 kV (Figura 31) e, para o tempo referente ao pico de corrente, a cadeia suportaria 856,837 kV. Acima desse valor de pico, a sobretensão irá ultrapassar o valor de suportabilidade. Sendo assim, haverá uma interrupção na cadeia.

Figura 31 – Tensão entre a mísula e a fase A, sem o dispositivo para-raios.



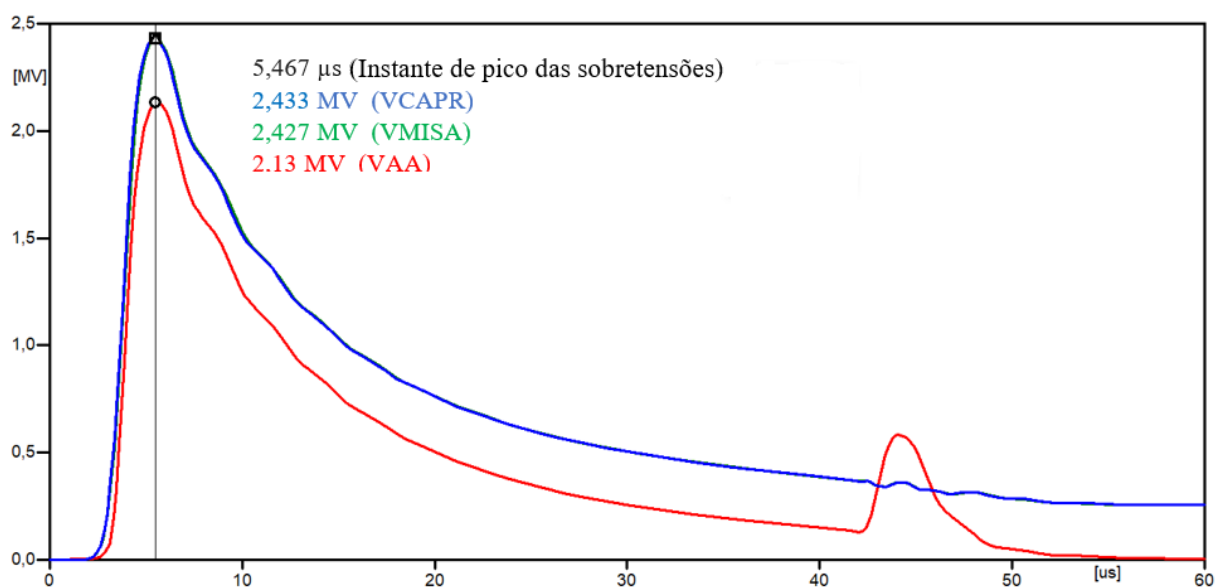
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.2 Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre - torre com aterramento de 100 ohms

A mesma análise foi realizada para o caso da resistência de aterramento de 100 ohms.

Com o propósito de ilustrar a dinâmica de apresentação de resultados das simulações, optou-se por simular primeiramente a incidência de uma descarga de 45 kA no cabo para-raios instalado no topo da torre. A simulação gerou as ondas de sobretensões resultantes no cabo para-raios (VCAPR), na mísula da fase A (VMISA) e no cabo fase A (VAA), apresentadas na Figura 32. Neste caso, considerou-se a presença do dispositivo para-raios em paralelo à cadeia de isoladores. A tensão nos terminais desses equipamentos pode ser vista na Figura 33, que corresponde à diferença ponto a ponto da onda de sobretensão da mísula A e do cabo fase A.

Figura 32 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no cabo para-raios no topo da torre, torre L6 com aterramento de 100 Ω .



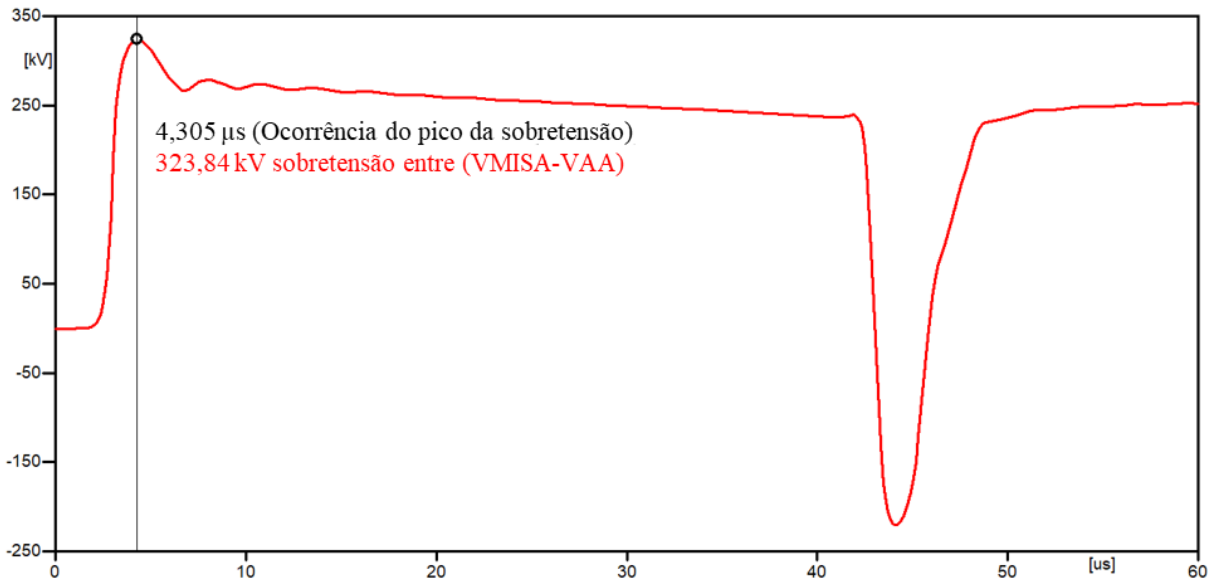
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Conforme observado na Figura 32, temos:

- $VCAPR (t = 5,467 \mu s) = 2,433 MV$.
- $VMISA (t = 5,467 \mu s) = 2,427 MV$.
- $VAA (t = 5,467 \mu s) = 2,13 MV$.

Ao considerar a onda de sobretensão, apresentada na Figura 33, observa-se que o valor máximo foi de 323,84 kV, que ocorre no instante de 4,305 μs .

Figura 33 – Tensão entre a mística A e a fase A, com o dispositivo para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para o isolador é considerada a Equação 3, aplicando exatamente o instante de pico da tensão nos terminais do isolador, $t = 4,305 \mu\text{s}$, obteve-se a tensão de ruptura de 865,81 kV, valor bem superior à sobretensão gerada nos seus terminais. Em outras palavras, não haverá *backflashover* na cadeia de isoladores.

No entanto, ao considerar o mesmo caso, porém sem a existência dos dispositivos para-raios na torre, a tensão resultante na cadeia de isoladores é superior à suportabilidade, o que resultaria na ruptura e constituição do arco elétrico (*backflashover*).

Para o tempo de $t = 5,36 \mu\text{s}$ com a ocorrência do pico da descarga atmosférica na linha de transmissão sem os dispositivos para-raios, a tensão de ruptura do isolador é de 816,9 kV.

Foram simuladas injeções de corrente de diferentes amplitudes no cabo de blindagem (no topo da torre) para obtenção dos níveis de sobretensão, com e sem a presença de dispositivos para-raios. A Tabela 5, apresenta os valores encontrados. Conforme a Equação 3, utilizada para o cálculo de suportabilidade da cadeia de isoladores, quanto maior for o instante de pico da sobretensão resultante em seus terminais menor será a suportabilidade da cadeia de isoladores. A Figura 34 apresenta a onda de sobretensão imposta aos terminais do isolador para tal intensidade de corrente, 14,575 kA.

Tabela 5 – Valores das descargas atmosféricas na torre L6, com resistência de aterramento de 100 Ω .

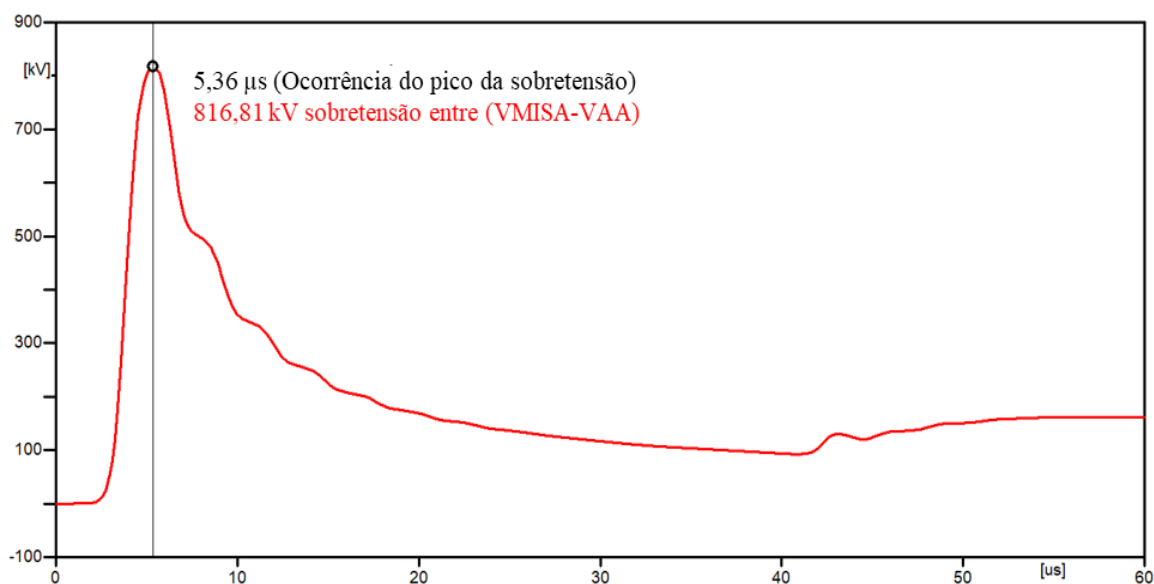
Amplitudes das descargas atmosféricas	Sobretensão na cadeia dos isoladores com para-raios	Sobretensão na cadeia dos isoladores sem para-raios
5 kA	237,42 kV	280 kV
10 kA	265,48 kV	560,35 kV
15 kA	280 kV	840,63 kV
25 kA	300 kV	1,4 MV
31 kA	309 kV	1,737 MV
45 kA	323,8 kV	2,52 MV
60 kA	334,22 kV	3,36 MV
90 kA	347 kV	5,04 MV

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Pode se concluir que, quanto maior o valor da resistência de aterramento, maior é a sobretensão e maior o instante de pico, que torna a suportabilidade da cadeia de isoladores menor.

A cadeia de isoladores sem a presença de dispositivos para-raios suporta descargas atmosféricas com picos menores ou iguais a 14,575 kA, já que para esta descarga foi obtida uma sobretensão de 816,81 kV (Figura 34) e para o tempo referente ao pico de tensão, a cadeia de isoladores suportaria 816,9 kV. Acima deste valor de pico a sobretensão irá ultrapassar o valor de suportabilidade, sendo assim a disrupção irá ocorrer.

Figura 34 – Tensão entre a mísula e a fase A, sem o dispositivo para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

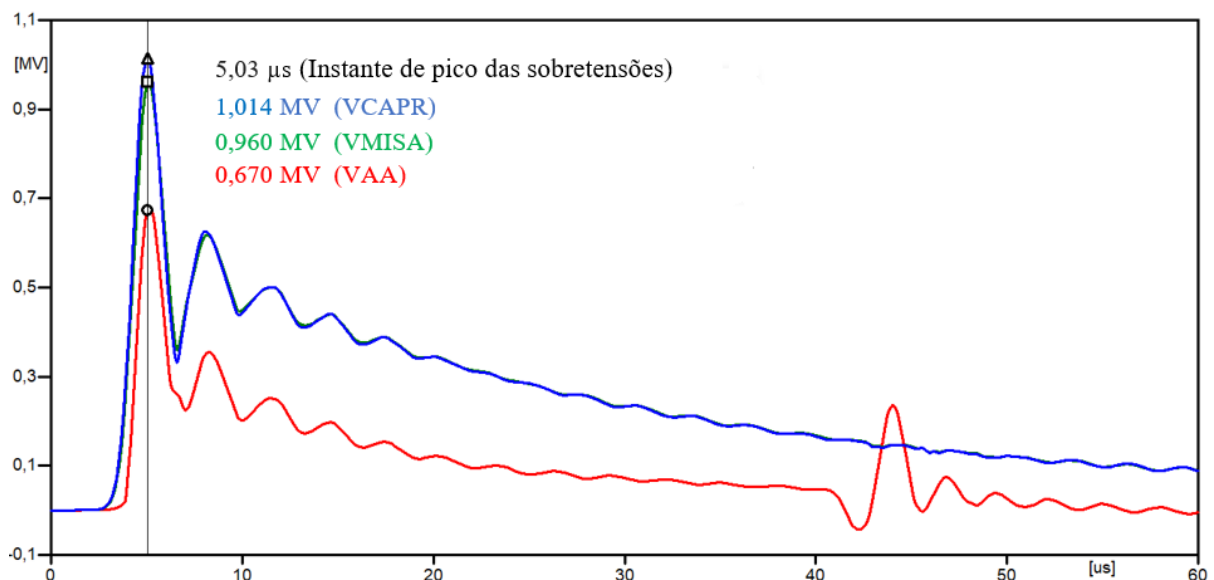
5.3 Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica em meio de vão - torre com aterramento de 30 ohms

A incidência da descarga atmosférica pode ocorrer em pontos distantes das torres e de seus aterramentos, fazendo com que linhas de transmissão longas e elevadas favoreçam a ruptura em meio de vão (SILVA, 2016). Por esses fatores a incidência em meio de vão foi avaliada e os mesmos procedimentos foram adotados de forma a identificar o valor de descarga que seria suportável sem que resultasse em *backflashover*.

Vejam, portanto, as sobretensões nos mesmos pontos (i.e., topo da torre), durante a incidência da descarga atmosférica, após injeção de uma descarga de 45 kA, a simulação gerou as ondas de sobretensões resultantes em meio de vão no cabo para-raios (VCAPR), na mísula da fase A (VMISA) e no cabo fase A (VAA), apresentadas na Figura 35. Neste caso, considerou-se a presença do dispositivo para-raios paralelo à cadeia de isoladores. Na

Figura 36 pode ser vista a tensão nos terminais desses equipamentos, que corresponde à diferença ponto a ponto da onda de sobretensão da mísula A e do cabo fase A.

Figura 35 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no meio de vão, torre L6 com aterramento de 30 Ω .



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

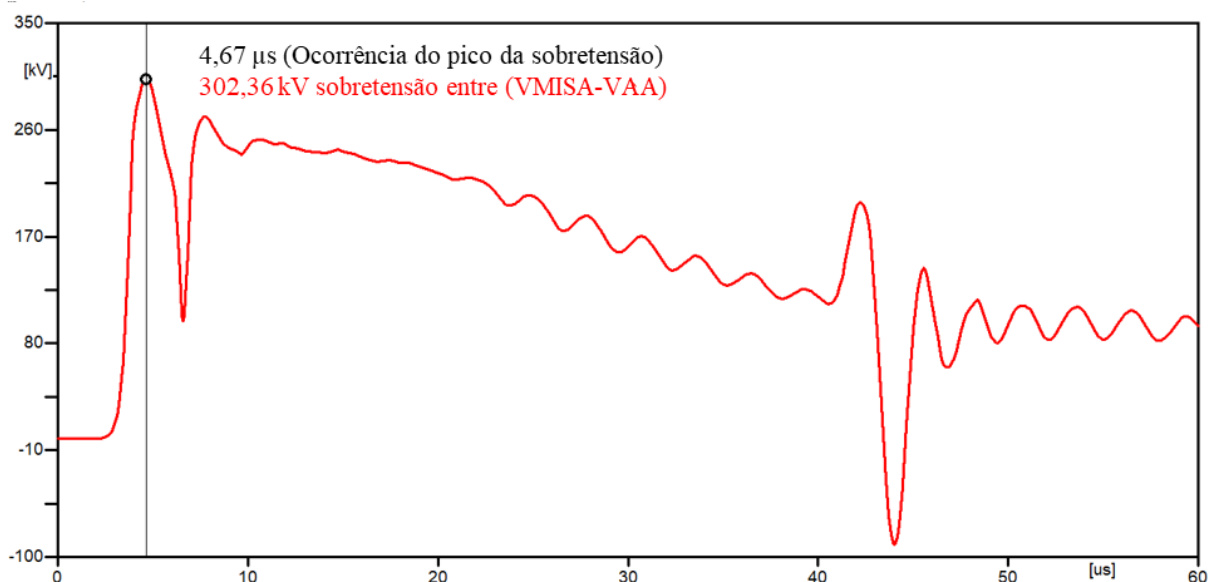
Conforme observado na Figura 35, temos:

- VCAPR ($t = 5,03 \mu s$) = 1,014 MV.
- VMISA ($t = 5,03 \mu s$) = 0,960 MV.
- VAA ($t = 5,03 \mu s$) = 0,670 MV.

Ao considerar a onda de sobretensão, apresentada na

Figura 36, observa-se que o valor máximo foi de 302,36 kV, que acontece no instante de 4,67 μ s.

Figura 36 – Tensão entre a mísula e a fase A, com o dispositivo para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A máxima tensão encontrada não supera a tensão residual do para-raios (que neste caso, é 320 kV), então ele não terá danos.

Para o isolador é considerada a Equação 3, aplicando exatamente o instante de pico da tensão nos terminais do isolador, $t = 4,67 \mu$ s, obteve-se a tensão de ruptura de 846,7 kV, valor bem superior à sobretensão gerada nos seus terminais. Em outras palavras, não haverá *backflashover* na cadeia de isoladores.

No entanto, ao considerar o mesmo caso, porém sem a existência dos dispositivos para-raios na torre, a tensão resultante na cadeia de isoladores é superior à suportabilidade, o que resultaria na ruptura e constituição do arco elétrico (*backflashover*).

Para o tempo de $t = 4,93 \mu$ s, com a ocorrência do pico da descarga atmosférica na linha de transmissão sem os dispositivos para-raios, a tensão de ruptura do isolador é 834,62 kV.

Foram simulados a injeção de diferentes níveis de pico de corrente no cabo de blindagem (em meio de vão) para obtenção dos níveis de sobretensão, com e sem a presença de dispositivos para-raios. A

Tabela 6 apresenta os valores encontrados. Conforme a Equação 3, utilizada para o

cálculo de suportabilidade da cadeia de isoladores, quanto maior for o instante de pico da sobretensão resultante em seus terminais menor será a suportabilidade da cadeia de isoladores. A Figura 37Figura 34 apresenta a onda de sobretensão imposta aos terminais do isolador para tal intensidade de corrente, 36,9 kA.

Tabela 6 – Valores das descargas atmosféricas no meio de vão, com resistência de aterramento de 30 Ω .

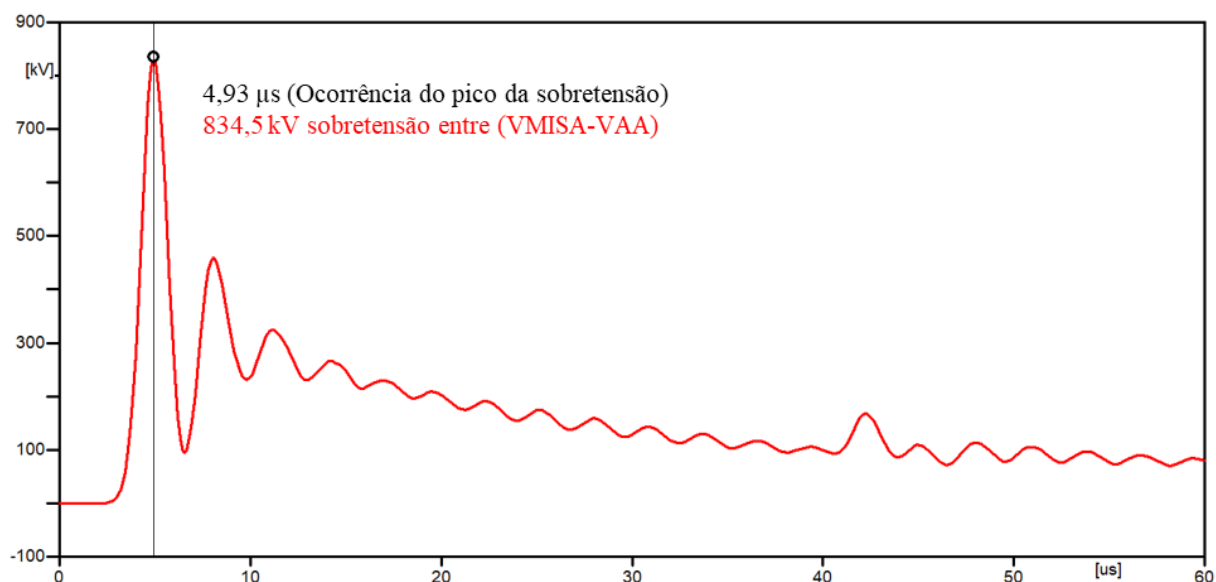
Amplitudes das descargas atmosféricas	Sobretensão na cadeia dos isoladores com para-raios	Sobretensão na cadeia dos isoladores sem para-raios
5 kA	113,26 kV	112,91 kV
10 kA	219,48 kV	226 kV
15 kA	252,93 kV	339,11 kV
25 kA	276,45 kV	565,31 kV
31 kA	285,85 kV	701,04 kV
45 kA	302,37 kV	1,018 MV
60 kA	314,75 kV	1,357 MV
90 kA	330,27 kV	2,035 MV

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A cadeia de isoladores sem a presença dos dispositivos para-raios suporta descargas atmosféricas com picos menores ou iguais a 36,9 kA, já que para esta descarga foi obtida uma sobretensão de 834,5 kV, conforme a Figura 37 e para o tempo referente ao pico de tensão a cadeia de isoladores suportaria 834,62 kV. Acima deste valor de pico a sobretensão irá ultrapassar o valor de suportabilidade, sendo assim haverá uma ruptura na cadeia.

Apesar de as sobretensões na torre escolhida serem menores quando a descarga incide em meio de vão em comparação com a incidência no topo da torre, ainda sim o risco de ruptura da cadeia de isoladores é bem relevante, caso a linha seja desprovida de proteção pelos dispositivos para-raios. As sobretensões são bem expressivas, principalmente quando as descargas injetadas são maiores do que ou iguais a 45 kA.

Figura 37 – Tensão entre a mística e a fase A, sem o dispositivo para-raios.



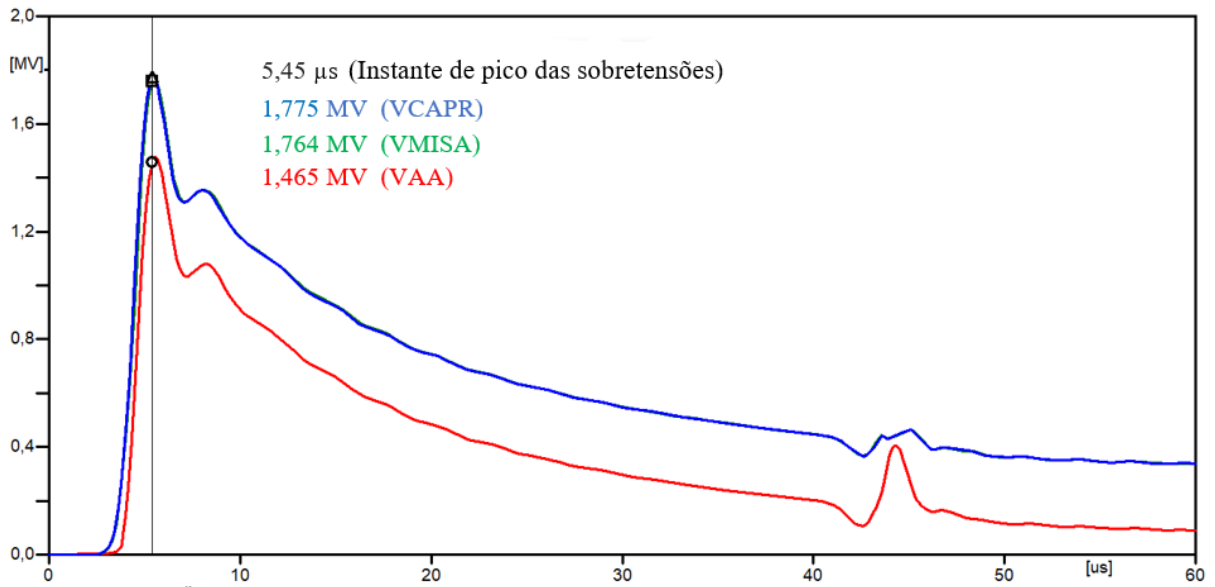
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5.4 Sobretensões devido à incidência de descarga atmosférica em meio de vão - torre com aterramento de 100 ohms

Também foi avaliada a incidência em meio de vão, porém com a resistência de aterramento de 100 ohms. Os mesmos procedimentos foram adotados de forma a identificar o valor de descarga suportável sem resultar em *backflashover*.

Vejamos, portanto, as sobretensões nos mesmos pontos (i.e., topo da torre), durante a incidência da descarga atmosférica, após injeção de uma descarga de 45 kA, a simulação gerou as ondas de sobretensões resultantes no cabo para-raios instalado em meio de vão. A simulação gerou as ondas de sobretensões resultantes no cabo para-raios (VCAPR), na mística da fase A (VMISA) e no cabo fase A (VAA), apresentadas na Figura 38. Neste caso, considerou-se a presença do dispositivo para-raios paralelo à cadeia de isoladores. Na Figura 39 pode ser vista a tensão nos terminais desses equipamentos, que corresponde à diferença ponto a ponto da onda de sobretensão da mística A e do cabo fase A.

Figura 38 – Ocorrência de sobretensões devido à descarga atmosférica incidir no meio de vão, torre L6 com aterramento de 100Ω .



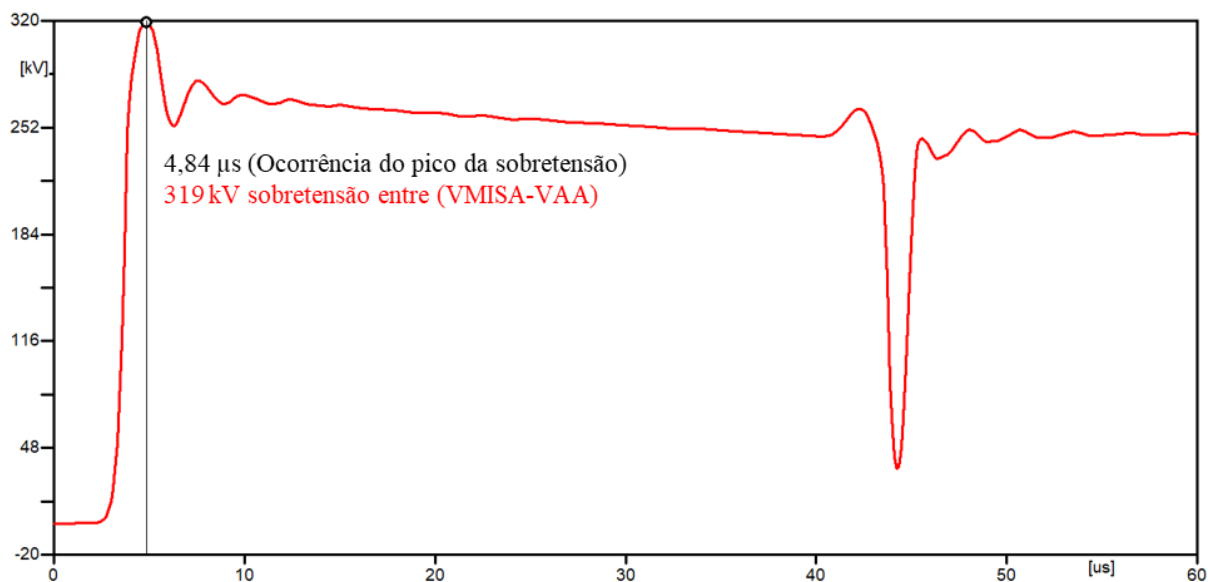
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Conforme observado na Figura 38, temos:

- VCAPR ($t = 5,45 \mu s$) = 1,775 MV.
- VMISA ($t = 5,45 \mu s$) = 1,764 MV.
- VAA ($t = 5,45 \mu s$) = 1,465 MV.

Ao considerar a onda de sobretensão, apresentada na Figura 39, observa-se que o valor máximo foi de 319 kV, que acontece no instante de 4,84 μs .

Figura 39 – Tensão entre a mística e a fase A, com o dispositivo para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A máxima tensão não superara a tensão residual do para-raios (que, neste caso, é 320 kV).

Considerada a Equação 3, aplicando exatamente o instante de pico da tensão nos terminais do isolador, $t = 4,84 \mu\text{s}$, obtem-se a tensão de ruptura de 838,67 kV, valor bem superior à sobretensão gerada nos seus terminais, não ocasionando *backflashover*.

No entanto, ao considerar o mesmo caso, porém sem a existência dos dispositivos para-raios na torre, a tensão resultante na cadeia de isoladores é superior à suportabilidade, resultando no *backflashover*.

Para o tempo de $t = 5,29 \mu\text{s}$ com a ocorrência do pico da descarga atmosférica na linha de transmissão sem os dispositivos para-raios, a tensão de ruptura do isolador é 819,62 kV.

Foram simulados a injeção de diferentes níveis de pico de corrente no cabo de blindagem (em meio de vão) para obtenção dos níveis de sobretensão, com e sem a presença de dispositivos para-raios. A Tabela 7

Tabela 6 apresenta os valores encontrados. Conforme a Equação 3, utilizada para o cálculo de suportabilidade da cadeia de isoladores, quanto maior for o instante de pico da sobretensão resultante em seus terminais menor será a suportabilidade da cadeia de isoladores. A Figura 40 apresenta a onda de sobretensão imposta aos terminais do isolador para a intensidade de corrente máxima suportável, 18,88 kA.

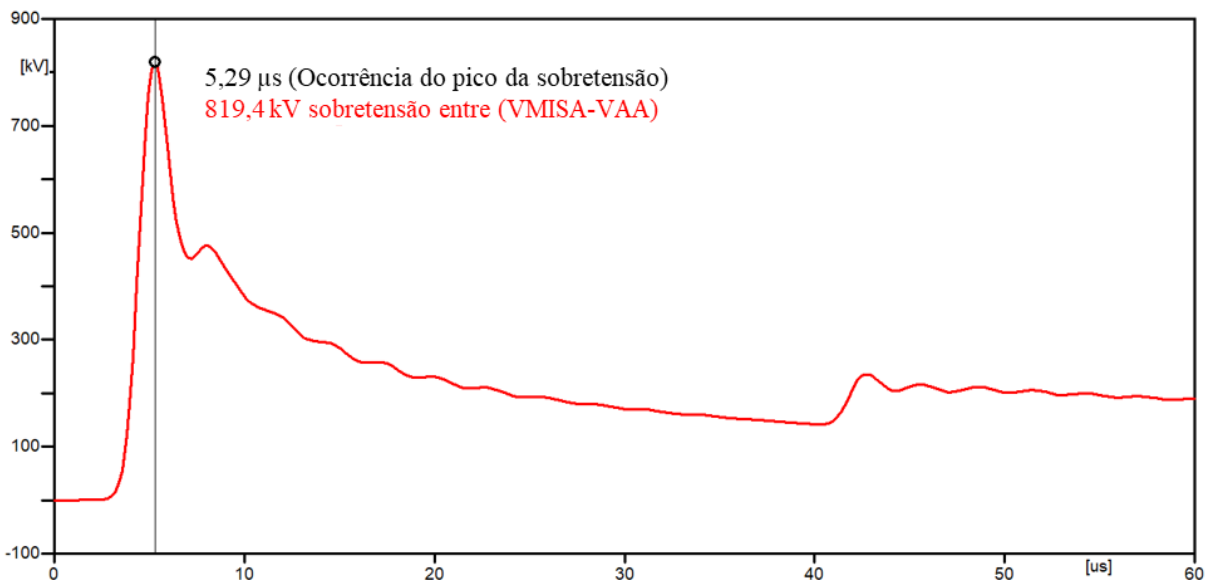
Tabela 7 – Valores das descargas atmosféricas no meio de vão, com resistência de aterramento de 100 Ω .

Amplitudes das descargas atmosféricas	Sobretensão na cadeia dos isoladores com para-raios	Sobretensão na cadeia dos isoladores sem para-raios
5 kA	212,28 kV	216,86 kV
10 kA	259,48 kV	433,91 kV
15 kA	274,86 kV	650,96 kV
25 kA	295 kV	1,08 MV
31 kA	303,87 kV	1,345 MV
45 kA	319 kV	1,953 MV
60 kA	329,72 kV	2,604 MV
90 kA	342,87 kV	3,907 MV

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

A cadeia de isoladores sem a presença dos dispositivos para-raios suporta descargas atmosféricas com picos menores ou iguais a 18,88 kA, já que para esta descarga foi obtida uma sobretensão de 819,4 kV (Figura 40) e para o tempo referente ao pico de tensão a cadeia de isoladores suportaria 819,62 kV. Acima deste valor de pico a sobretensão irá ultrapassar a suportabilidade da cadeia de isoladores, ocasionando uma disrupção.

Figura 40 – Tensão entre a mísula e a fase A, sem o dispositivo para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

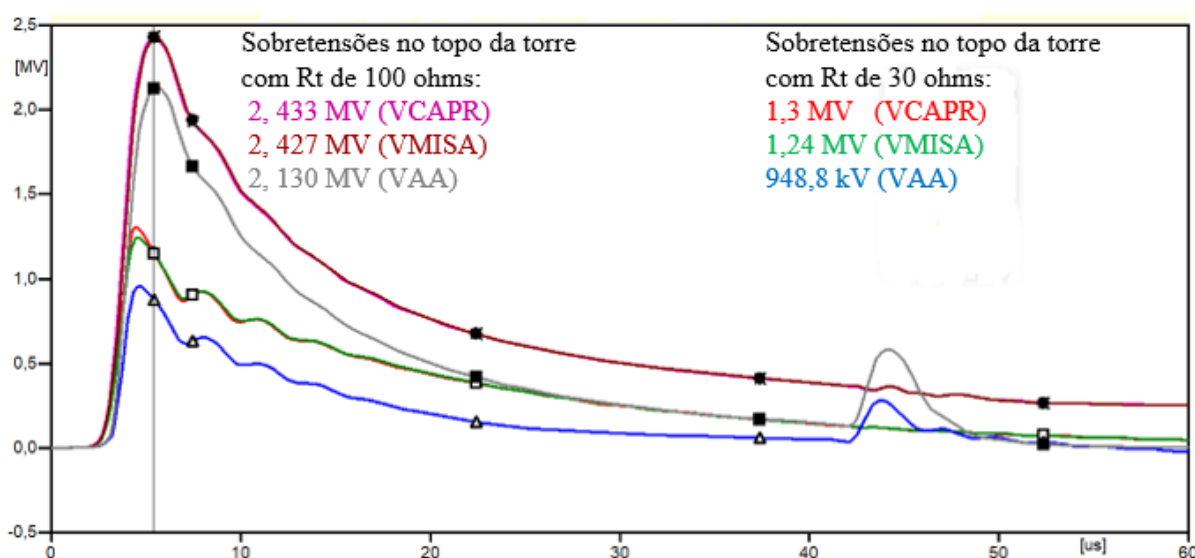
5.5 Análises dos resultados

Os casos analisados abaixo consideraram o valor mediano da incidência de descarga atmosférica, pico de 45 kA. Para facilitar as comparações dos diferentes casos, as curvas de sobretensões em pontos específicos da torre foram plotadas no mesmo gráfico. Tal

procedimento teve como objetivo deixar em evidência as diferenças nas amplitudes das sobretensões para os casos de incidência ocorrendo ao topo da torre e em meio de vão, e ainda considerando os dois valores de resistência de aterramento.

A Figura 41 apresenta as sobretensões no cabo para-raios (curva rosa), na mísula A (curva marrom) e na fase A (curva cinza) da torre com o aterramento de 100 ohms, ao passo que as sobretensões no cabo para-raios (curva vermelha), na mísula A (curva verde), e na fase A (curva azul) são sobretensões resultantes na torre com aterramento de 30 ohms.

Figura 41 – Sobretensões na torre devido a incidência de uma descarga atmosférica de pico 45 kA no topo da torre, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω .



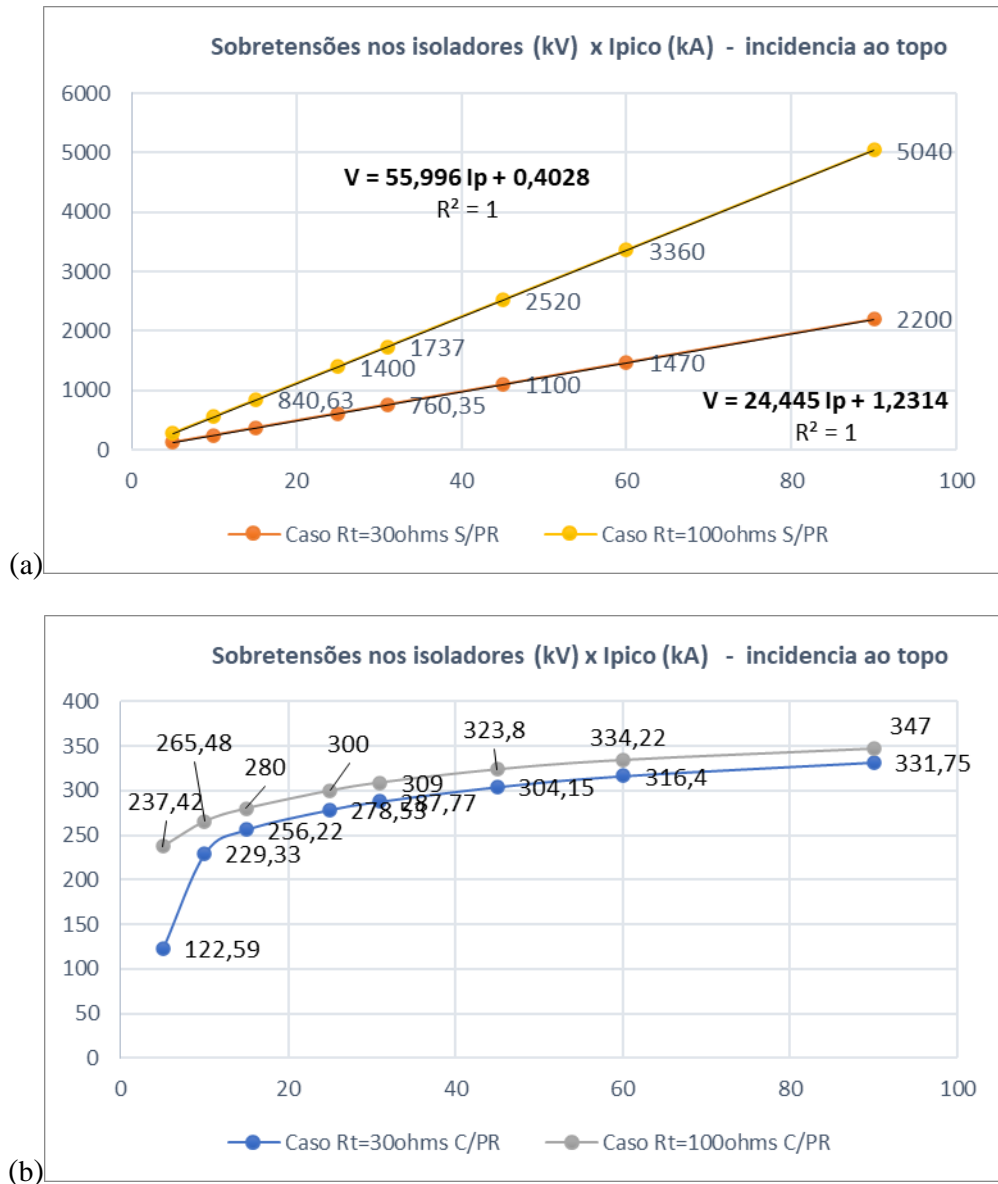
Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Podemos observar que, quanto maior a resistência de aterramento, maior a sobretensão medida na cadeia de isoladores. Porém, o mais importante é a tensão entre a VMISA (tensão na mísula A) e VAA (tensão na fase A), que é a tensão estabelecida entre os terminais dos para-raios e dos isoladores.

Nos casos de incidência de descargas atmosféricas em torres com a presença de dispositivos para-raios, não houve tanta diferença nos valores de sobretensão para os picos simulados de 5 kA a 90 kA. Este comportamento era esperado pois os dispositivos para-raios atuam ceifando as sobretensões. Já os casos de sobretensões na cadeia de isoladores sem a utilização dos para-raios e com aterramentos distintos, as diferenças nos níveis de sobretensões são nítidas, inclusive com valores superiores na torre com resistência de aterramento de 100 ohms. Tais valores são apresentados na Tabela 4 e Tabela 5, bem como apresentados de forma gráfica na Figura 42. O comportamento das sobretensões em função da intensidade da corrente

de descarga atmosférica se mostra linear nos casos em que não há presença de dispositivo para-raios. Na referida figura é possível visualizar a função que mostra a forte linearidade entre as grandezas. A taxa de crescimento da sobretensão em função do valor de pico de corrente se mostra aproximadamente o dobro nas simulações que consideram o aterramento de pé de torre de 100 ohms.

Figura 42 – Sobretensões nos terminais dos isoladores devido à incidência de descarga atmosférica no topo da torre, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω. Figuras b e c, correspondem ao detalhamento dos casos simulados sem e com para-raios.

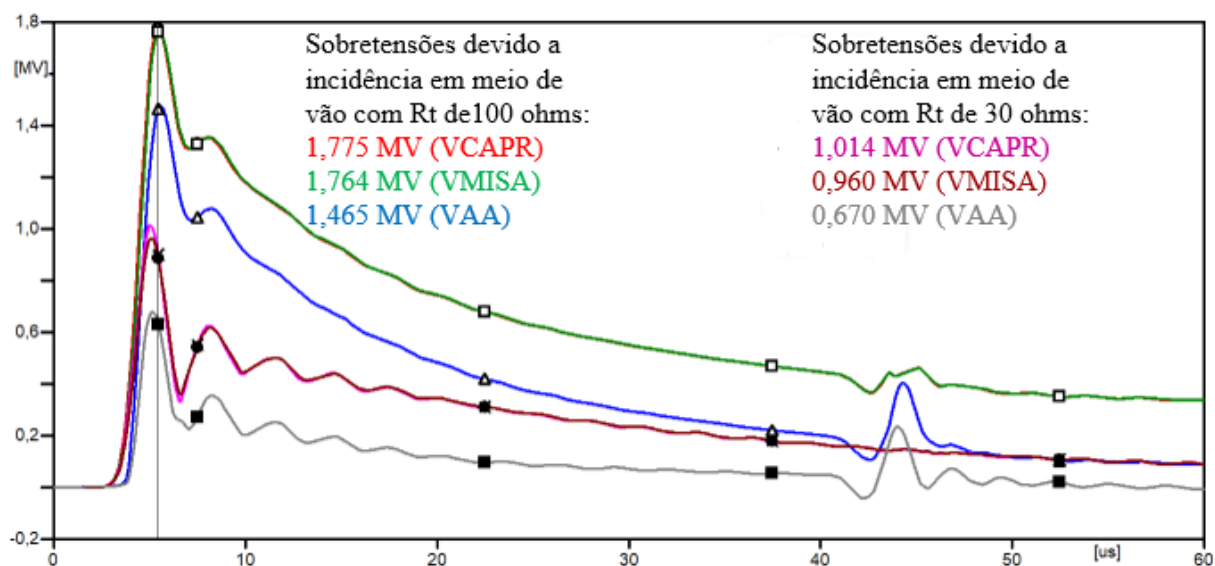


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Com relação aos casos em que as simulações foram realizadas considerando a incidência nos cabos de blindagem em meio de vão, observou-se menores níveis de sobretensão resultantes

nos terminais dos isoladores. A Figura 43 ilustra as sobretensões estabelecidas em alguns pontos da torre, considerando também os dois valores de resistência de aterramento.

Figura 43 – Sobretensões na torre devido à incidência da descarga atmosférica de pico 45 kA em meio de vão, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω .

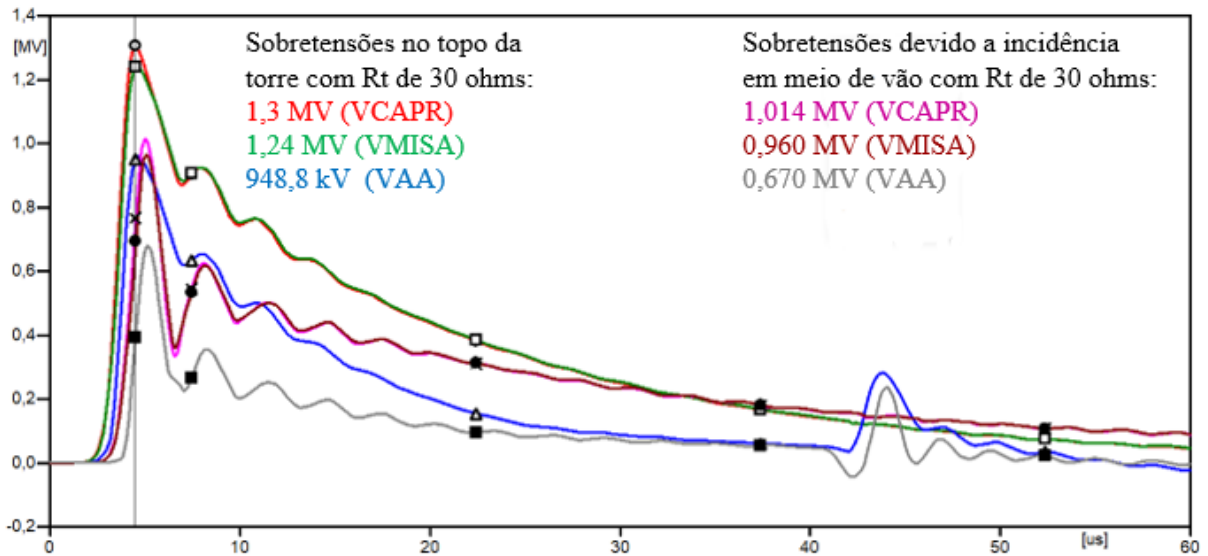


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Conforme ilustrado na Figura 43, com a descarga incidindo em meio de vão com a torre com resistência de aterramento de 30 ohms, as sobretensões são menores do que as sobretensões originadas por descargas que incidem no topo da torre com resistência de aterramento tanto de 30 ohms quanto de 100 ohms (comparar com a Figura 41). Para descargas incidindo em meio de vão com 100 ohms de resistência de aterramento, as sobretensões são menores se comparadas àquelas geradas por descargas incidentes diretamente na torre com resistência de aterramento de 100 ohms.

Referindo-se à Figura 44, as sobretensões de maior valor são as de incidência no topo da torre. Elas são as curvas do cabo para-raios (curva vermelha), tensão na mísula A (curva verde) e na fase A (curva azul), respectivamente. Já em meio de vão, temos as curvas de tensão no cabo para-raios (curva rosa), tensão na mísula A (curva marrom), e na fase A (curva cinza).

Figura 44 – Sobretensões na torre devido à incidência da descarga atmosférica de pico 45 kA no topo da torre e no meio de vão, com resistência de aterramento de 30 Ω .

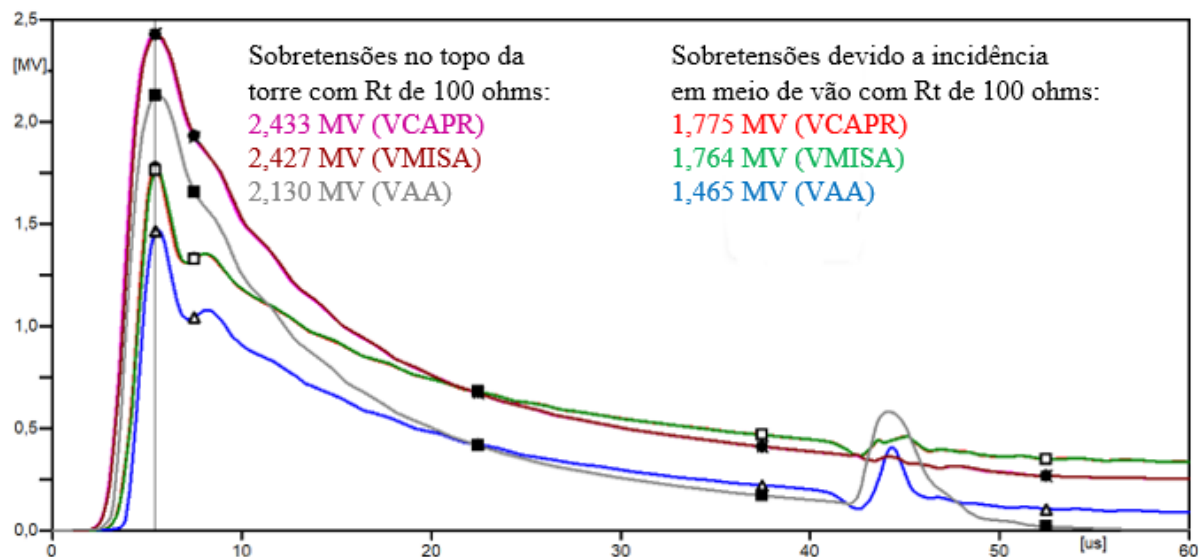


Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Para os casos da Figura 44, sem a utilização dos dispositivos para-raios as sobretensões na cadeia de isoladores são bem parecidas, sendo um pouco maiores para o caso de ocorrência direta da descarga atmosférica no topo da torre. Sendo assim, existe uma maior probabilidade de a cadeia de isoladores ter a sua suportabilidade ultrapassada pelas sobretensões geradas por correntes de descargas incidentes no topo da torre em relação àquelas decorrentes de incidência em meio de vão.

Na Figura 45 a incidência em meio de vão resulta em sobretensões menores, o que era esperado, visto que apenas parte da corrente incidente se direciona para a torre em estudo.

Figura 45 – Sobretensões na torre devido à incidência da descarga atmosférica de pico 45 kA no topo da torre e no meio de vão, com resistência de aterramento de 100 Ω .



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Na Figura 45, pode-se observar uma oscilação na cauda da onda de sobretensão. Tal comportamento, em princípio, pode ser atribuído ao fenômeno de reflexão, presente quando há uma mudança na impedância característica do meio por onde a onda se propaga.

As conclusões relativas aos níveis de sobretensões podem ser melhor embasadas na apresentação gráfica das sobretensões estabelecidas nos terminais dos isoladores versus intensidade da corrente de descarga incidentes em meio de vão, visualizadas na Figura 46.

Figura 46 – Sobretensões nos terminais dos isoladores devido à incidência de descarga atmosférica em meio de vão, com resistências de aterramento de 30 Ω e 100 Ω . Figuras b e c correspondem ao detalhamento dos casos simulados sem e com para-raios.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Para obter as sobretensões foram criadas demonstrações utilizando descargas atmosféricas de 45 kA incidindo em uma linha de transmissão. Foram medidas as sobretensões no cabo para-raios, na mísula A e na fase A, e foi perceptível que no cabo para-raios as sobretensões eram maiores. Foram analisadas as tensões sobre os dispositivos para-raios, onde eles estavam em paralelo com a cadeia de isoladores, na qual foram analisadas a tensão na mísula A subtraindo o valor de tensão na fase A (VMISA-VAA), para verificarmos se ocorreria uma sobretensão que pudesse acarretar uma disrupção da cadeia de isoladores, na qual resultaria em um desligamento.

As descargas atmosféricas foram de 5 kA até 90 kA no estado de Minas Gerais, e eventualmente foram feitos testes para distintas resistências de aterramento como 30 ohms e 100 ohms. Além disso, foram testados dois pontos de incidência da descarga atmosférica, no cabo de blindagem, ao topo da torre e em meio de vão.

As descargas atmosféricas foram testadas com e sem a utilização dos dispositivos para-raios, onde pôde-se ver que, sem a utilização dos dispositivos para-raios, as sobretensões oriundas das tensões VMISA-VAA são significativamente maiores, se comparada com aquelas simuladas com a presença dos dispositivos para-raios.

A cadeia de isoladores possui uma suportabilidade que não é superada quando está protegida por dispositivos para-raios, ficando exposta à sobretensão residual do para-raios. Porém, sem os dispositivos para-raios, a cadeia de isoladores fica vulnerável para diversas magnitudes de descargas.

As sobretensões simuladas sem para-raios possuem um instante de pico comum independentemente do valor da corrente de descarga. O instante de pico é necessário para a adequada estimativa da suportabilidade da cadeia de isoladores. Com o valor de suportabilidade calculado e os valores de sobretensões resultantes, buscou-se encontrar o máximo valor de pico da corrente de descarga que não resultaria em *backflashover*.

Dentre as simulações foi observado que quanto maior a resistência de aterramento maior a sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Tal fato é mais evidente nos casos simulados sem a presença de dispositivos para-raios. O comportamento das sobretensões versus a intensidade de corrente se mostrou linear sendo que o acréscimo da sobretensão é maior nas torres de R_t igual a 100 ohms, cerca de duas vezes maior.

Para descargas atmosféricas com incidência em meio de vão, as sobretensões são menores se comparadas à descarga incidindo diretamente ao topo da torre.

Apesar das sobretensões com a descarga em meio de vão serem menores do que no topo da torre, ainda sim o risco de ruptura da cadeia de isoladores é real caso a linha de transmissão não tenha a proteção dos dispositivos para-raios.

Como propostas de continuidade deste trabalho, seguem algumas possibilidades de estudos:

- Simulação com outros tipos de torres de transmissão;
- Analisar o grau de exposição das torres levando em consideração o Ng do local de sua instalação;
- Analisar o grau de exposição das torres levando em consideração o relevo local;
- Eleger torres da linha de transmissão para a instalação de dispositivos para-raios, com base no levantamento do grau de exposição das mesmas à incidência de descargas atmosféricas.
- Desenvolver métodos de estimativas de redução de desligamentos de linhas, com base em estudos de probabilidades de incidência de descargas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica**. Rio de Janeiro. 2023. (NBR 8449).

ASSIS, S. C. et al. Lightning performance of transmission line with and without surge arresters: comparison between a Monte Carlo method and field experience. **Electric Power Systems Research**, v. 149, 2017.

ASSIS, S. D. C. et al. **Metodologia de análise de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas considerando para-raios ZnO**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia: SBSE. 2012.

BARRETO, A. V. **Vulnerabilidade de linhas de transmissão a desligamentos por descargas atmosféricas: uma proposta de classificação como suporte para o planejamento**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

CANDEMIL, L. L. **Análise e simulação de descargas atmosféricas em linhas de distribuição de energia elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2018.

CEMIG. **Relatório 02.111-EG/PA1-3015. Proteção de surtos em linhas de distribuição – quinze anos de experiência de campo e estudos de laboratório**. Belo Horizonte: [s.n.]. 1993.

CIGRÉ. **Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines**. Cigré. Paris. 1991.

CIGRÉ. **Procedures for estimating the lightning performance of transmission lines – new aspects**. Cigré. [S.l.]. 2021.

CUNHA, L. V. **Desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: influência do efeito corona na ruptura a meio de vão**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2010.

DARVENIZA, M.; POPOLANSKY, F.; WHITEHEAD, E. R. **Lightning protection of UHV transmission lines**. *Electra*, n. 41, 1975. 39-69.

EPE. Sistema Interligado Nacional. , 2024. Disponível em : <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao168/Mapa%20do%20Sistema%20Integrado%20Nacional.pdf>>. Citado na página 21.

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**. Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei. 2016.

HVEX. Avaliação de isoladores. , 2022. Disponível em : <<https://conteudo.hvex.com.br/tecnologia/avaliacao-de-isoladores/>>. Citado na página 39.

IEEE. Modeling of metal oxide surge arresters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 1, 1992.

IEEE. Estimating lightning performance of transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 3, 1993.

IFRN. Instalações Elétricas de Alta Tensão I Transmissão em Alta Tensão. , 2022. Disponível em : <<https://docente.ifrn.edu.br/gustavolima/disciplinas/instalacoes-eletricas-alta-tensao-i/aula-05-transmissao-at>>. Citado na página 34.

INPE. O que são descargas atmosféricas? , 2022. Disponível em : <<http://www.inpe.br/webelat/rindat/menu/desc.atm/>>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 31.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 3ª. ed. São Paulo: LTC, 2005.

MARIANO, J. A. D. S. **Um ambiente computacional para cálculos de sobretensões atmosféricas e desempenho de linhas de transmissão segundo uma abordagem estocástica**. Universidade Federal de São João del-Rei. São João del-Rei. 2012.

MUNDO DA ELÉTRICA. O que são descargas atmosféricas? , 2022. Disponível em : <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-descargas-atmosfericas/>>. Citado na página 28.

RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning: physics and effects**. New York: Cambridge University Press, 2007.

REVISTA ADNORMAS. Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão. , 2020. Disponível em: <<https://revistaadnormas.com.br/2020/09/15/o-dimensionamento-de-cabos-para-raios-para-linhas-aereas-de-transmissao>> Citado na página 42.

SCHROEDER, M. A. O. **Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da Estação do Morro do Cachimbo**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2001.

SILVA, A. P. **Melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: desenvolvimento de sistema de informações e análise de casos**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

SILVA, G. R. **Avaliação do efeito da ruptura a meio de vão no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016.

TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO EM FOCO. Aterramento de estruturas de linhas de transmissão. , 2020. Disponível em : <<https://transmissao108196393.wordpress.com/2020/06/25/aterramento-de-estruturas-de-linhas-de-transmissao/>>. Citado na página 44.

TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO EM FOCO. Isoladores para linhas de transmissão e distribuição. , 2019. Disponível em : <<https://transmissao108196393.wordpress.com/2019/11/27/isoladores-para-linhas-de-transmissao-e-distribuicao/>>. Citado 2 vezes na página 40.

VASCONCELLOS, F. M.; MOREIRA, F. A. **Avaliação e dimensionamento de sistemas de aterramento para redução de desligamentos de linhas de transmissão por backflashover: estudos de caso para uma LT de 138 kV.** The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission. [S.l.]: CLAGTEE. 2017.

VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos.** São Paul: Artliber Editora, 2002.

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

VISACRO, S. F. et al. **Non-conventional measures for improvement of lightning performance of transmission lines.** International Conference on Lightning Protection. Avignon: ICPL. 2004.

ANEXO A – MODELO DE ISOLADOR PELO MÉTODO DE INTEGRAÇÃO

MODEL INTEGRACAO

COMMENT-----

|Descrição: Modelo simplificado para verificar a ocorrência |
|de backflashover na cadeia de isoladores de uma linha trifásica |
|por meio do método de integração | |-----ENDCOMMENT

INPUT UPA, UNA, UPB, UNB, UPC, UNC

DATA UO -- Valor crítico de tensão definido pelo usuário

F -- Constante especificada pela configuração geométrica dos eletrodos

VAR CLOSEI -- Assume valor 1 quando ocorre backflashover

FIM

INTGRA

INTGRB

INTGRC

DELTA

UOO

TMAX

UA

UB

UC

OUTPUT CLOSEI

INIT

UOO:=UO*1000

DELTA:=ATP(DELTAT)

INTGRA:=0

INTGRB:=0

INTGRC:=0

CLOSEI:=0

FIM:=0

TMAX:=ATP(TMAX)

ENDINIT

EXEC

UA:=ABS(UPA-UNA)

UB:=ABS(UPB-UNB)

UC:=ABS(UPC-UNC)

IF UA>UOO THEN

INTGRA:=INTGRA+(UA-UOO)*DELTA

ENDIF

IF UB>UOO THEN

INTGRB:=INTGRB+(UB-UOO)*DELTA

ENDIF

IF UC>UOO THEN INTGRC:=INTGRC+(UC-UOO)*DELTA

ENDIF

IF (INTGRA>=F) OR (INTGRB>=F) OR (INTGRC>=F) THEN

CLOSEI :=1

FIM:=ATP(TMAX)

--DEPOSIT(TMAX,T)

FIM:=ATP(VOLTBC[1])

ENDIF

IF T>=FIM THEN

--WRITE1(CLOSEI)

ENDIF

ENDEXEC

ENDMODEL

Fonte: (MARIANO, 2012).