

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

THIAGO DE CASTRO FERREIRA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA DE 34,5 kV  
FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:  
Estudo de caso na mineração de Capanema**

ITABIRITO-MG

2024

THIAGO DE CASTRO FERREIRA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA DE 34,5 kV  
FRENTE ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS:  
Estudo de caso na mineração de Capanema**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Corpo Docente do Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Itabirito, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador(a): Profa. Dra. Cláudia Rejane de Mesquita

Itabirito - MG

2024

## FICHA CATALOGRÁFICA:

F383a Ferreira, Thiago de Castro  
2025

Análise de desempenho de rede de distribuição aérea de 34,5 kV frente às descargas atmosféricas: estudo de caso na mineração de Capanema / Thiago de Castro Ferreira. – 2025.

104 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Itabirito, 2025.

Orientadora: Dra. Cláudia Rejane de Mesquita.

1. Rede de distribuição. 2. Descargas atmosféricas. 3. Sobretensões. 4. ATPdraw. I. Ferreira, Thiago de Castro. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Itabirito. III. Título.

CDD 621.317

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

**Ata da Defesa de TCC, realizada em 20 de Dezembro de 2024**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDE DE DISTRIBUIÇÃO AÉREA DE 34,5 kV FRENTE ÀS DESCARGAS  
ATMOSFÉRICAS:  
Estudo de caso na mineração de Capanema"**

**Thiago de Castro Ferreira**

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

**Aprovado** em 20/12/2024 pela banca examinadora:

Profa. Dra. Cláudia Rejane de Mesquita (IFMG - Campus Itabirito)  
**Orientador (presidente da banca avaliadora)**

Prof. Dr. William Caires Silva Amorim (IFMG-Campus Itabirito)  
**Membro avaliador**

Prof. Eng. Matheus dos Santos Braga Ferreira (IFMG-Campus Itabirito)  
**Membro avaliador**



Documento assinado eletronicamente por **Cláudia Rejane de Mesquita, Professora**, em 20/12/2024, às 19:17, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Matheus dos Santos Braga Ferreira, Professor Substituto**, em 20/12/2024, às 19:17, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **William Caires Silva Amorim, Professor**, em 20/12/2024, às 19:17, 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 **2149502** e o código CRC **3ED28B27**.

## **AGRADECIMENTOS**

Neste momento tão especial, gostaria de expressar minha profunda gratidão a algumas pessoas que foram fundamentais na minha jornada acadêmica e pessoal.

Primeiramente, agradeço à minha mãe e à minha avó, cujo amor incondicional e apoio foram essenciais para que eu chegasse até aqui. A força e a sabedoria que ambas me transmitiram sempre foram uma fonte de inspiração.

Aos meus professores, sou eternamente grato pelo conhecimento compartilhado e pela orientação ao longo do curso. Cada aula, cada conselho e cada desafio contribuíram para meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço também à minha orientadora, cuja liderança e apoio constante foram decisivos para o meu desenvolvimento durante essa trajetória.

Não posso deixar de mencionar minha esposa, que esteve ao meu lado em todos os momentos, oferecendo amor e incentivo. Sua compreensão e paciência foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar a este trabalho.

Agradeço também ao meu tio, que sempre acreditou em mim e me apoiou de diversas maneiras ao longo do caminho.

Por fim, agradeço ao meu filho, que está prestes a chegar. Sua presença já traz uma nova luz à minha vida e me motiva ainda mais a buscar um futuro melhor.

A todos vocês, meu sincero obrigado!

*“A crise é a melhor bênção que pode acontecer às pessoas e países, porque a crise traz  
progresso”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

As descargas atmosféricas que incidem nas redes de distribuição aérea de energia elétrica consistem em uma das principais causas de interrupções não programadas, acarretando significativos prejuízos para indústrias e outros consumidores. A compreensão dos efeitos dessas descargas é fundamental para o aprimoramento dos sistemas de proteção, visando minimizar sobretensões e falhas no fornecimento de energia. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de uma rede de distribuição de 34,5 kV, de uma planta mineradora, frente a descargas atmosféricas diretas, utilizando simulações computacionais no “*software*” ATPdraw. A pesquisa concentra-se na modelagem da rede e na simulação dos impactos das descargas, com ênfase nas correntes de descarga de 10 kA, 30 kA e 45 kA. Foram realizadas simulações para determinar os níveis de sobretensão e sobrecorrente, possibilitando a análise da resposta da rede a esses eventos.

Para tanto foram obtidas as ondas de sobretensões nos condutores fases e cabo guarda, sobretensões estabelecidas nos terminais dos isoladores do poste e nos terminais do dispositivo para-raios, bem como, as ondas de correntes nos aterramentos dos postes e nos para-raios. O estudo também inclui a definição dos modelos necessários para representar a corrente da descarga incidente e os componentes da rede, com o intuito de realizar uma avaliação precisa de sua vulnerabilidade. Os resultados obtidos fornecerão percepções valiosas sobre a eficácia das medidas de proteção implementadas e contribuirão para a melhoria da qualidade da energia elétrica nas redes de média tensão.

**Palavras-Chave:** Rede Distribuição, Descargas Atmosféricas, Sobretensões, ATPdraw.

## **ABSTRACT**

Atmospheric discharges impacting overhead electrical distribution grids represent one of the primary causes of unscheduled outages, leading to significant economic losses for industries and other consumers. Understanding the effects of these discharges is crucial for enhancing protection systems designed to mitigate overvoltages and power supply failures. This study aims to evaluate the performance of a 34.5 kV distribution grid at a mining facility against direct lightning strikes, utilizing computational simulations in the ATPdraw software. The research focuses on the modeling of the grid and simulating the impacts of lightning strikes, emphasizing discharge currents of 10 kA, 30 kA, and 45 kA. Simulations were conducted to determine overvoltage and overcurrent levels, facilitating the analysis of the grid's response to these events.

To this end, overvoltage waveforms were obtained for the phase conductors and the shielded cable, established overvoltages at the terminals of pole insulators and at the terminals of lightning protection devices, as well as current waveforms at the grounding systems of poles and lightning rods. The study also encompasses the definition of models necessary to accurately represent the incident lightning discharge current and the components of the grid, aiming for a precise assessment of its vulnerability. The results obtained will provide valuable insights into the effectiveness of the implemented protective measures and contribute to enhancing the quality of electrical power in medium-voltage distribution grids.

**Keywords:** Distribution Grid, Lightning Discharges, Overvoltages, ATPdraw.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma nuvem típica de tempestade.....	22
Figura 2 - Tipos de descargas.....	23
Figura 3 - Os 4 tipos de polaridade das descargas nuvem-solo.....	24
Figura 4 - Etapas do processo de conexão do canal com salto final. ....	25
Figura 5 - Representação da corrente de retorno.....	26
Figura 6 - Representação de um líder escalonado pouco antes do salto final. ....	26
Figura 7 - Representação da onda eletromagnética irradiada pela corrente de retorno.....	27
Figura 8 - Densidade de descargas no Brasil região Sudeste (raios/km <sup>2</sup> /ano) (INPE).....	30
Figura 9 - Forma de onda típica de uma primeira corrente de retorno negativa. ....	31
Figura 10 - Representação da forma de onda da corrente obtida pela função de Heidler. ....	33
Figura 11 - Forma de onda típica da corrente associada a primeiras descargas de retorno negativas descendentes.....	33
Figura 12 - Tipos dos eventos de interação das descargas atmosféricas e sistemas de distribuição.....	36
Figura 13 - Representação da sobretensão em uma rede de distribuição resultante de uma Descarga Direta. ....	37
Figura 14 - Fluxograma da Rota de Processo – Capanema.....	41
Figura 15 - Diagrama Unifilar do Trecho Analisado. ....	44
Figura 16 – Esboço do Trecho de rede aérea analisado. ....	45
Figura 17 - Fonte de Corrente de Heidler no ATPDraw. ....	49
Figura 18 - Formas de onda reproduzidas no ATPDraw.....	50
Figura 19 - Linha de Distribuição no ATPDraw. ....	52
Figura 20 - Informações técnicas da empresa induscabos.....	53
Figura 21 - Modelo estrutura típica com pontos de engastamento e conexão dos condutores.....	55
Figura 22 - Segunda Tela sub-rotina ATP.....	55
Figura 23 - Representação do Mecanismo do modelo elétrico do Isolador. ....	57
Figura 24 - Representação dos isoladores no ATPdraw.....	57
Figura 25 - Representação do Modelo de Postes. Estrutura (a) sem Blindagem, (b) com blindagem. ....	58
Figura 26 - Modelo Para-Raios para simulação. ....	62
Figura 27 - Dimensões do para-raios 36 kV Polimérico da SIEMES. ....	63
Figura 28 - Curva característica V x I típica do para-raios de óxido de zinco de 36 kV. ....	64
Figura 29 - Circuito RLC equivalente por fase. ....	65

Figura 30 - Fonte de Tensão de 34,5kV. ....	67
Figura 31 - Rede de distribuição 34,5 kV simulada sem para-raios. -10 kA.....	68
Figura 32 - Detalhamento dos componentes essenciais a serem analisados. ....	69
Figura 33 - Forma de onda da descarga de 10 kA aplicada.....	70
Figura 34 - Sobretensão nas fases A, B, C nos isoladores do ponto de descarga.....	70
Figura 35 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P09.....	71
Figura 36 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P11.....	71
Figura 37 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg. ....	72
Figura 38 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P9. ....	73
Figura 39 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P9.....	73
Figura 40 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10. ....	73
Figura 41 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.....	74
Figura 42 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11. ....	74
Figura 43 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.....	74
Figura 44 - Detalhamento dos componentes essenciais a serem analisados- 30kA. ....	76
Figura 45 - Sobretensão nas fases A, B, C nos isoladores do ponto de descarga P10. ....	76
Figura 46 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P11.....	77
Figura 47 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P12.....	77
Figura 48 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg. ....	78
Figura 49 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10 – Ponto de descarga. .....	78
Figura 50 - Corrente nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.....	79
Figura 51 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11. ....	79
Figura 52 - Corrente nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.....	79
Figura 53 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12. ....	80
Figura 54 - Corrente nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.....	80
Figura 55 - Rede de distribuição 34,5 kV simulada com para-raios. - 10 kA. ....	82
Figura 56 - Forma de onda da descarga de 30 kA aplicada.....	83
Figura 57 - Detalhamento dos componentes essenciais a serem analisados. ....	83
Figura 58 - Detalhamento da estrutura com para-raios em paralelo modelado no ATPdraw. .	84
Figura 59 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura de N°P10, no ponto de descarga. ....	84
Figura 60 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura N°P11 adjacente ao ponto de descarga. .....	85
Figura 61 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg e Aterramento do para-raios. ...	85

Figura 62 - Tensão sobre os para-raios da estrutura N°P10.....	87
Figura 63 - Corrente que flui pelo para-raios, da estrutura N°P10.....	87
Figura 64 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.....	88
Figura 65 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.....	88
Figura 66 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.....	88
Figura 67 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.....	89
Figura 68 - Detalhamento dos componentes e pontos de medição da rede modelada no ATPdraw.....	90
Figura 69 - Forma de onda da descarga de 45 kA aplicada.....	92
Figura 70 - Detalhamento dos componentes e pontos de medição da rede modelada no ATPdraw.....	92
Figura 71 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura de N°P10, no ponto de descarga. ....	93
Figura 72 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura N°P11 adjacente ao ponto de descarga. ....	93
Figura 73 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg e Aterramento do para-raio.....	94
Figura 74 - Tensão sobre os para-raios da estrutura N°P10.....	94
Figura 75 - Corrente que flui pelo para-raios, da estrutura N°P10.....	95
Figura 76 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.....	95
Figura 77 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.....	96
Figura 78 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.....	96
Figura 79 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.....	96
Figura 80 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.....	97
Figura 81 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.....	97

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Dados de cada vão da rede .....	45
Tabela 2 - Valores conforme níveis de tensão da Rede.....	56
Tabela 3 - Dimensões do poste de concreto duplo T .....	59
Tabela 4 – Parâmetros do circuito equivalente em alta frequência para os transf. ....	60
Tabela 5 – Parâmetros que caracterizam o modelo dos postes .....	64
Tabela 6 – Parâmetros do circuito equivalente em alta frequência para os transformadores. ....	66
Tabela 7 – Redução percentual dos resultados com e sem para-raios – 30 kA .....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	Alternative Transients Program
CAA	Condutor de alumínio com alma de aço
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais S.A.
CFO	Critical Flashover Overvoltage
DBM	Data Base Modularization
DPS	Dispositivos de Proteção Contra Surtos
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MTPA	Meta de Produção Toneladas por Ano
NBI	Nível Básico de Isolamento
NBR	Norma Brasileira
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QD's	Quadros de Distribuição
RDI	Rede de Distribuição Isolada
ROM	Run-of-mine
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TCLD	Transportador Correia de Longa Distância

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N_g$	Densidade de descargas atmosféricas para a terra
$T_d$	Número de dias de trovoada por ano
$I$	Corrente de pico de uma descarga
$R_{out}$	Raio externo do condutor
$R_{int}$	Raio interno do condutor
$H_c$	Altura do poste
$r_c$	Raio da base do poste
$e$	Engastamento do poste
$L$	Altura Total do Poste
$\rho_{solo}$	Resistividade do solo
$R_g$	Resistência de aterramento
$T_d$	Índice ceráunico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	Objetivos .....	18
1.1.1	<i>Objetivos Específicos .....</i>	<i>19</i>
1.2	Estrutura do Trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1	Definição de descargas atmosféricas .....	22
2.2	Classificação das descargas .....	23
2.3	Descrição do fenômeno descargas atmosféricas .....	24
2.3.1	<i>Descrição do fenômeno de campos eletromagnéticos associados a descargas atmosféricas.....</i>	<i>27</i>
2.4	Características e parâmetros das descargas atmosféricas .....	28
2.4.1	<i>Densidade de descarga atmosférica (<math>N_g</math>).....</i>	<i>28</i>
2.4.2	<i>Energia Específica .....</i>	<i>30</i>
2.4.3	<i>Corrente de Retorno .....</i>	<i>31</i>
2.4.4	<i>Tempo de Frente de Onda ou Tempo de Crista (<math>t_{cr}</math>).....</i>	<i>34</i>
2.4.5	<i>Tempo de Meia onda ou Tempo de Cauda (<math>t_{cl}</math>).....</i>	<i>34</i>
2.4.6	<i>Taxa de Variação da Corrente em Relação ao Tempo [<math>kA/\mu s</math>] .....</i>	<i>34</i>
2.5	EFEITO DAS DESCARGAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....	34
2.5.1	<i>Mecanismos de Interação das Descargas Atmosféricas.....</i>	<i>35</i>
2.5.2	<i>Sobretensões Devido Descargas Diretas.....</i>	<i>36</i>
2.5.3	<i>Melhoria do desempenho de redes de distribuição frente a descargas diretas.....</i>	<i>38</i>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
3.1	Projeto Capanema Unidade Natural.....	40
3.2	Sistema Elétrico do Projeto Unidade Natural Capanema .....	42
3.3	Topologia do Trecho da Rede de Distribuição .....	43

<b>4</b>	<b>MODELOS PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>	<b>47</b>
4.1	Modelagem da Corrente de Retorno da Descarga Atmosférica.....	48
4.2	Modelagem Dos Componentes Da Rede De Distribuição Escolhida .....	51
4.2.1	<i>Modelagem da Linha de Distribuição .....</i>	<i>51</i>
4.2.2	<i>Modelagem dos Isoladores .....</i>	<i>56</i>
4.2.3	<i>Modelagem do Poste.....</i>	<i>58</i>
4.2.4	<i>Modelagem do Para-Raios .....</i>	<i>61</i>
4.2.5	<i>Modelagem do transformador .....</i>	<i>65</i>
4.2.6	<i>Modelagem do Aterramento .....</i>	<i>66</i>
4.2.7	<i>Subestação de 34,5 kV (SE) .....</i>	<i>66</i>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
5.1	Simulação na Rede de Distribuição Sem Para-raios.....	68
5.1.1	<i>Descarga de Retorno de 10 kA .....</i>	<i>69</i>
5.1.2	<i>Descarga de Retorno de 30 kA .....</i>	<i>75</i>
5.2	Simulação na Rede de Distribuição Com Para-Raio .....	81
5.2.1	<i>Descarga de Retorno de 30kA ao Meio da rede de Distribuição.....</i>	<i>82</i>
5.2.2	<i>Descarga de Retorno de 30 kA ao Final da Rede de Distribuição.....</i>	<i>89</i>
5.2.3	<i>Descarga de Retorno de 45 kA ao Meio da Rede de Distribuição .....</i>	<i>91</i>
5.2.4	<i>Descarga de Retorno de 45 kA ao Final da Rede De distribuição.....</i>	<i>98</i>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>100</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As redes de distribuição aérea possuem como principal função distribuir a energia elétrica de forma eficiente até seus consumidores finais, como residências, comércios e indústrias. Em grandes indústrias, é comum também que a distribuição interna de energia e alimentação das plantas de processos sejam realizadas por redes aéreas, trazendo vantagens como economia, facilidade de acesso em manutenções, flexibilidade em terrenos acidentados, melhor visibilidade e monitoramento. O sistema é constituído por postes que sustentam os cabos elétricos aéreos e seus equipamentos, formando um circuito. O circuito inicia-se na subestação de média tensão, ponto de partida da alimentação da rede primária, entregando energia para as cargas e transformadores de baixa tensão da rede secundária.

Esse sistema, denominado como radial, possui uma única fonte de energia (subestação) e todos os componentes de interligação associados em série e com as cargas consumidoras. A topologia radial é caracterizada pelo caminho único entre o consumidor e a subestação de energia, visando baixo custo de implementação e operação (SANGUANINI, 2022). É possível que problemas aconteçam naturalmente a partir dessa configuração, podendo ser causadas, por exemplo, a partir de uma falha no trecho principal (tronco) capaz de ocasionar a interrupção na alimentação de todas as cargas ou nos seus ramos e, por consequência, paradas no processo da planta provocando uma diminuição na produção.

Por se tratar de uma instalação exposta ao ar livre, as redes aéreas estão vulneráveis às intempéries climáticas, tais como ventos, precipitações, poeiras e descargas atmosféricas, sendo a última uma das principais causas de faltas e avarias capazes de provocarem interrupções momentâneas e até mesmo permanentes nas redes de distribuição de energia (IEEE STD.1243, 1997; IEEE STD.1410, 2010).

Um dos principais motivos associados a vulnerabilidade das redes frente a descargas atmosféricas são as sobretensões transitórias originadas no sistema. As sobretensões devem ser comparadas ao Nível Básico de Isolamento (NBI) dos elementos que compõem o sistema de distribuição. Quando a sobretensão é superior ao nível de isolamento, falhas como descargas de contorno e curtos-circuitos podem ocorrer, causando o desligamento da alimentação devido à atuação das proteções. Nas redes com tensão de operação inferior a 69 kv, são mais perceptíveis os efeitos das descargas, quando comparadas as redes com tensão de operação

superior, isso é devido o nível de isolamento dos materiais aplicados nesse tipo de rede ser menor. (IEEE STD.1410, 2010).

Dessa forma, os efeitos das descargas no SEP afetam a qualidade da energia elétrica (QEE) podendo ocasionar paradas no sistema e má funcionamento das cargas, causando perdas na produtividade. Essas interrupções não apenas geram perdas na produtividade, mas também comprometem a eficiência operacional. A ênfase nas operações, busca elevar a produtividade e minimizar perdas e interrupções na linha de produção, prevenindo a redução na capacidade de trabalho, com conseqüente queda de produtividade em diferentes setores de serviços (BRITO,2024).

Diante desse cenário, nota-se a crescente preocupação por parte dos *stakeholders*<sup>1</sup> das indústrias no estudo do desempenho de redes de distribuição frente a descargas atmosféricas, visando melhoria no sistema de proteção a fim de reduzir o número de desligamentos, minimizando as perdas. Fato este que tem se tornado um grande desafio para engenheiros e projetistas na busca por melhorias nos índices da qualidade da energia elétrica (QEE) frente às interações das redes aéreas com as descargas atmosféricas.

Sendo assim, é de significativa importância o estudo dos transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas em redes de distribuição e o conhecimento do comportamento da rede frente aos possíveis distúrbios. No entanto, a realização de medições e análises práticas em um projeto se torna economicamente inviável e moroso. Dessa forma, uma alternativa viável e com resultados precisos amplamente utilizada são as simulações computacionais aplicadas em modelos representativos que utilizam métodos de análise de transitórios para averiguação dos parâmetros, análise, otimização e tomadas de decisão rápidas. Nessa perspectiva, de melhor entendimento e avaliação dos efeitos da incidência direta de descargas atmosféricas em redes de distribuição se desenvolveu o presente trabalho de conclusão de curso TCC.

## 1.1 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver um estudo sobre o desempenho de uma rede de distribuição aérea de 34,5 kV frente a descargas atmosféricas diretas. Para tal, foi

---

<sup>1</sup> Todas as partes interessadas em um determinado projeto

realizada a modelagem da rede e simulações dos impactos das descargas atmosféricas, via EMTP-ATP, com o intuito de avaliar os seus efeitos.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos necessários para se alcançar o objetivo geral são:

- Apresentação dos conceitos de formação, caracterização e parâmetros das descargas atmosféricas;
- Definir os modelos para representar os fenômenos de descargas diretas;
- Definir os modelos que representam adequadamente os principais componentes e equipamentos que compõe uma rede de distribuição;
- Realizar simulações no software ATP para obtenção de gráficos de sobretensão e sobrecorrente;
- Avaliar as correntes de descargas de 10 kA, 30 kA e 45kA para os pontos principais e estratégicos da rede frente as descargas atmosféricas;
- Compreender a divisão da corrente de descarga nos aterramentos dos postes;
- Verificar as ondas de corrente e de tensões nos terminais do para-raio e relacioná-las a curva característica  $V \times I$ ;
- Identificar a ocorrência das descargas de contornamento (*backflashover*) nos isoladores do poste.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos da seguinte forma:

Capítulo 1: Apresentação da introdução e objetivo do trabalho proposto;

Capítulo 2: Apresentação dos conceitos teóricos adquiridos através de revisões bibliográficas sobre o fenômeno das descargas atmosféricas;

Capítulo 3: Apresentação das características do sistema de distribuição da Mina de Capanema;

Capítulo 4: Apresentação dos modelos de representação das descargas atmosféricas diretas, modelo de redes de distribuição e apresentação da parametrização dos modelos no software ATPdraw;

Capítulo 5: Realização das simulações na rede de distribuição de 34,5 kV e análise dos resultados;

Capítulo 6: Conclusões finais dos resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os distúrbios provocados pelas descargas atmosféricas são normalmente verificados na forma de sobretensões. Uma descarga atmosférica pode ocasionar sobretensões ao atingir diretamente uma linha de transmissão podendo levar ao fenômeno conhecido como *Flashover* ou *Backflashover*. O *Flashover* refere-se à falha de isolamento nos isoladores, resultante da descarga atmosférica que atinge diretamente os cabos fase da linha, geralmente devido à falta de blindagem ou falhas nos cabos de proteção. Por outro lado, o *Backflashover* acontece quando a descarga atinge o cabo de blindagem ou a torre, levando à falha de isolamento nos isoladores (PEDROSA, 2013). Podem ainda ocorrer sobretensões resultantes na linha devido ao acoplamento de campos eletromagnéticos gerados por descargas próximas, sobretensões estas comumente chamadas de tensões induzidas (MOTA,211).

Para o sistema de distribuição esta última interação é a forma mais importante, uma vez que as sobretensões geradas pelas descargas indiretas normalmente ultrapassam o Nível Básico de Isolamento (NBI) deste sistema (relativamente baixos, em geral de 95 kV para redes convencionais e 170 kV para redes de NBI elevado) e não alcançam o NBI dos sistemas de transmissão (CASTRO,2006). Ademais, o número de descargas próximas a rede é bem superior ao número de incidências diretas na rede.

Embora menos frequentes, as descargas atmosféricas diretas, apresentam um impacto severo, resultando em elevados níveis de sobretensão. Essas sobretensões são de maior intensidade em comparação às geradas por descargas indiretas, podendo ocasionar danos significativos a equipamentos e infraestruturas da rede elétrica (THOMAZELLA, 2004). Nos sistemas de distribuição, as descargas diretas geralmente levam a desligamentos operacionais, exceto quando são adotados sistemas de proteção adequados e corretamente dimensionados, incluindo para-raios e sistemas de aterramento (IEEE STD. 1410, 2010).

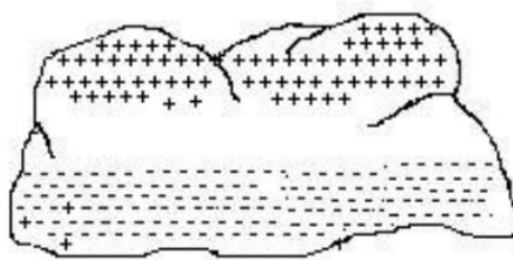
Sendo assim, é importante a compreensão deste fenômeno no que diz respeito à sua formação, propagação e probabilidades de ocorrência, bem como suas características físicas e elétricas. Neste capítulo, serão abordados esses aspectos de maneira a esclarecer o fenômeno em questão. Iniciaremos com uma descrição detalhada das descargas atmosféricas, e na sequência aborda-se os principais mecanismos de interação dos efeitos das descargas com o sistema elétrico.

## 2.1 Definição de descargas atmosféricas

O fenômeno chamado descarga atmosférica ocorre quando há o rompimento da isolação do ar entre dois corpos com cargas elétricas opostas, como por exemplo solo e nuvem carregada. Isto ocorre quando o campo elétrico é suficiente para ionizar os átomos do ar, favorecendo um intenso movimento de elétrons de um ponto a outro, gerando uma corrente elétrica extremamente alta, que dura em média meio segundo e possui uma trajetória típica de 5 a 10 km (SALARI FILHO, 2006). Quando uma nuvem está carregada, há uma indução de cargas elétricas com polaridade inversa no solo, estabelecendo uma diferença de potencial entre nuvem e solo. Essa diferença de potencial pode chegar a valores na ordem de MV, com um campo elétrico de mesma intensidade, condições favoráveis ao surgimento de descargas atmosféricas (VISACRO, 2005).

As fontes mais comuns de descargas atmosféricas são as “*Cúmulus Nimbus*”, conhecidas como nuvens de tempestade. A estrutura típica de uma nuvem de tempestade é apresentada na Figura 1. A base da nuvem é composta por uma camada de cargas negativas enquanto as cargas positivas estão dispersas na região superior da mesma. A polaridade das correntes de descargas é definida segundo a polaridade das cargas das nuvens que são transferidas para a terra. As descargas descendentes de polaridade negativa representam 90% dos casos registrados (OLIVEIRA,2001).

Figura 1 - Estrutura de uma nuvem típica de tempestade.



Fonte: (CASTRO,2006)

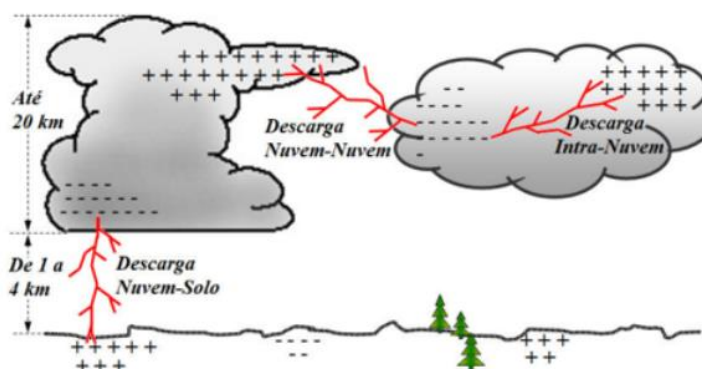
O Brasil destaca-se como um dos países com a maior incidência de descargas atmosféricas do mundo, registrando anualmente uma média superior a 77 milhões de raios. Entre os anos de 2000 e 2014, mais de 1.700 óbitos foram atribuídos a esses fenômenos, conforme dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE,2023). Essa realidade

ressalta a importância de medidas preventivas e de conscientização sobre os riscos associados a tempestades elétricas, além de evidenciar a necessidade de pesquisas mais aprofundadas sobre o impacto das descargas atmosféricas na segurança da população e do sistema elétrico brasileiro.

## 2.2 Classificação das descargas

As descargas atmosféricas podem ser classificadas em três tipos: intra-nuvem, inter-nuvem e nuvem-solo (vide Figura 2). As descargas intra-nuvem ocorrem entre centros de carga oposta dentro da mesma nuvem, enquanto as descargas inter-nuvem acontecem entre centros de carga em nuvens diferentes. Juntas, essas duas categorias representam aproximadamente 70% das ocorrências de descargas elétricas (Coelho, 2010). Essa classificação é fundamental para a compreensão dos mecanismos que envolvem a formação de raios e suas implicações para a segurança e a pesquisa meteorológica.

Figura 2 - Tipos de descargas.



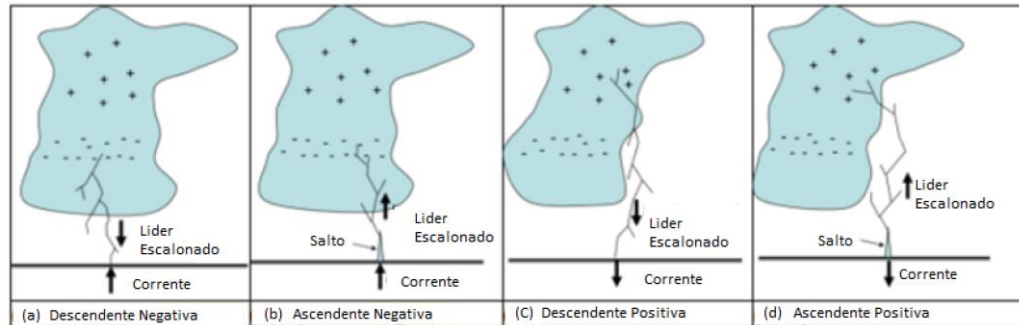
Fonte: (COELHO,2010)

Apesar de menos frequentes, as descargas nuvem-solo são as que possuem os maiores efeitos destrutivos e podem ser classificadas quanto ao sentido de propagação das cargas em ascendentes ou descendentes. As descargas ascendentes, ocorrem iniciando do solo para a nuvem e ocorrem em estruturas altas, já as descargas descendentes, ocorrem iniciando da nuvem para o solo sendo estas de maior intensidade quando comparadas as descargas ascendentes (COELHO,2010).

Quatro tipos de descargas são identificados Figura 3 (a) Descendente negativa, Figura 3 (b) Ascendente negativa, Figura 3 (c) Descendente Positiva e Figura 3 (d) Ascendente

positiva. Das descargas descendentes, os de polaridade negativa são os mais prevalentes e estima-se, de forma conservadora, que seja responsável por cerca de 90% das descargas nuvem-solo. Os de polaridade positiva, representam cerca de 10% do total. Por esta razão, apenas as descargas descendentes negativas são consideradas para estimar o desempenho de linhas de transmissão e redes de distribuição em casos de incidência de raios. (CIGRE,2021).

Figura 3 - Os 4 tipos de polaridade das descargas nuvem-solo.



Fonte: Adaptada de (CIGRE,2021).

### 2.3 Descrição do fenômeno descargas atmosféricas

Nessa situação, o ar sendo um meio com propriedades isolantes pode se tornar um meio condutor através do qual as cargas da nuvem procuram um caminho direto para o solo. Nesse processo, forma-se um traçador ou um líder descendente, que deixa a nuvem transportando parte da sua carga formando um canal ionizado, denominado canal de descarga.

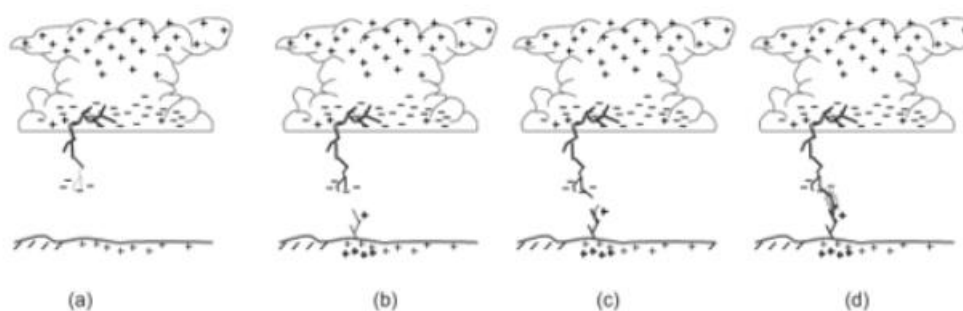
Esse líder (canal) descendente é conhecido também como "stepped *leader*" porque avança em passos discretos ou saltos (*steps*), uma das teorias mais aceitas que buscam explicar a dinâmica das descargas atmosféricas. Durante sua trajetória nuvem-solo, o canal descendente pode dividir-se em várias direções (ramificações) e propagar-se em qualquer direção, mas sempre em saltos que dependem da corrente associada a essa descarga (COORAY, 2015). O canal se estende da nuvem até a terra, formando uma longa coluna de plasma que se desenvolve em passo discretos de aproximadamente 50 metros (OLIVEIRA,2013).

O acúmulo de cargas elétricas ao longo desse canal resulta em um aumento da intensidade do campo elétrico em suas extremidades, que provoca o rompimento da rigidez dielétrica local. Esse fenômeno permite que cargas se desloquem para um novo segmento de

canal, que se forma entre o percussor e o solo. Se as condições de intensidade do campo elétrico se mantiverem, o canal ionizado pode continuar a evoluir em passos, através de descargas disruptivas consecutivas em direção ao solo, tornando-se maior e mais intenso e podendo gerar ramificações que partem de suas extremidades (VISACRO,2005).

Além disso, a medida que o canal descendente, carregado negativamente, se aproxima a algumas centenas de metros do solo, o campo elétrico se torna tão intenso que surgem canais, que partem da grande sombra de cargas positivas existente no solo abaixo da nuvem, denominados de canais ascendentes “concorrentes”. Semelhante ao processo para descargas descendente descrito anteriormente, os canais ascendentes podem evoluir por passos em dezenas de metros e ao atingirem uma altura mínima (associado a quantidade de cargas acumulada no canal), pode ocorrer uma descarga que os interliga por meio de um salto final Figura 4.

Figura 4 - Etapas do processo de conexão do canal com salto final.



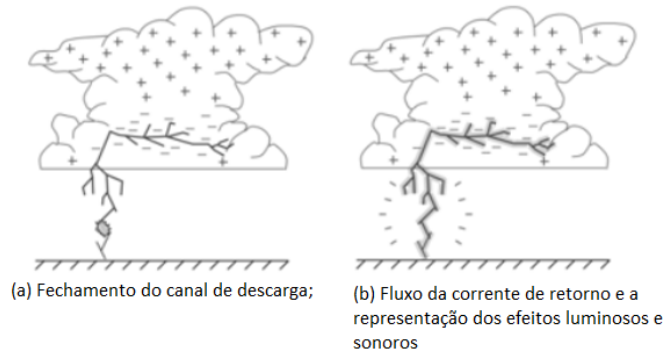
Fonte: (VISACRO,2010).

Quando ocorre a conexão entre o canal descendente e um dos canais ascendentes (entre a nuvem e o solo), inicia-se a propagação de uma corrente elétrica de alta intensidade, conhecida como corrente de retorno (do inglês, “*return-stroke*”) Figura 5 e Figura 6. O fluxo dessa corrente de descarga através do canal ionizado gera um intenso aquecimento, resultando no fenômeno luminoso conhecido como relâmpago (VISACRO 2005). Esse aquecimento provoca, ainda, a expansão do ar ao redor do canal, gerando uma onda sonora que percebemos como trovão (VISACRO, 2005).

Assim, o fluxo da corrente de retorno, denominado *stroke*, é um dos elementos mais significativos nos estudos voltados para aplicações de engenharia. Essa corrente apresenta um

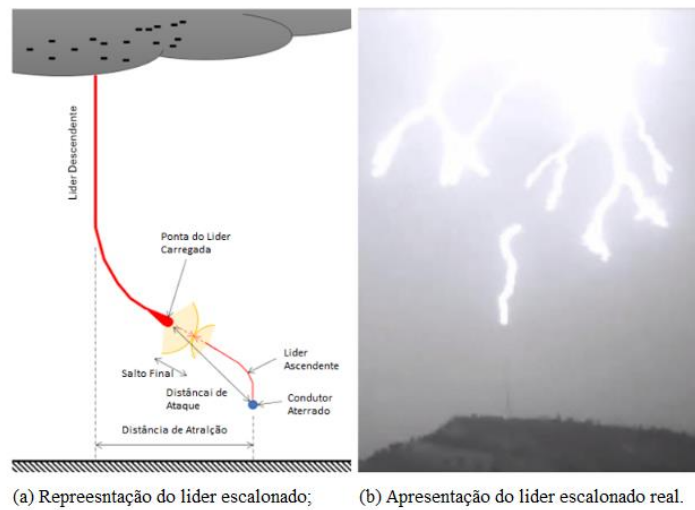
crescimento rápido nos instantes iniciais, seguido de um comportamento mais lento e gradual (DE CONTI, 2006).

Figura 5 - Representação da corrente de retorno.



Fonte: Adaptado de (VISACRO,2010).

Figura 6 - Representação de um líder escalonado pouco antes do salto final.



Fonte: Adaptada de (CIGRE,2021).

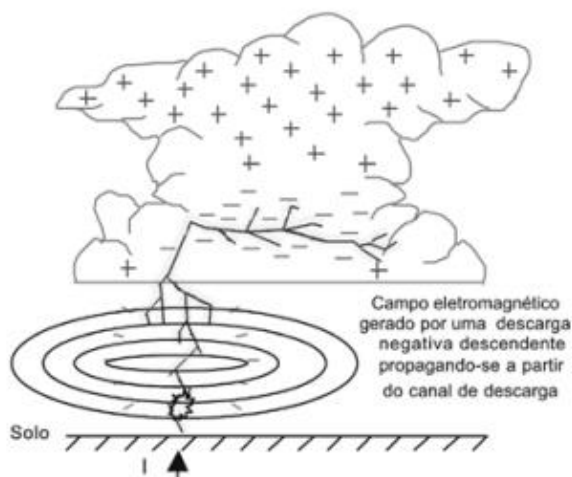
Segundo Mota (2011), a corrente de retorno, ou primeiro “*return-stroke*”, assume valores de pico de corrente em média próximo de 30kA, podendo chegar a até 300kA. Essa corrente é tipicamente de 2 a 3 vezes mais intensa do que as correntes associadas às descargas subsequentes, conhecidas como “*subsequent return-strokes*” (SANGUANINI, 2022). Além disso, em aproximadamente 80% dos casos, o processo elétrico pode se prolongar por um

período de até 100 ms, durante o qual podem ocorrer múltiplos “*strokes*” através do mesmo canal (VISACRO, 2010). É importante destacar que a transferência de cargas para a terra continua mesmo após o término do fluxo da corrente de retorno, refletindo a complexidade e a dinâmica das descargas atmosféricas.

### 2.3.1 Descrição do fenômeno de campos eletromagnéticos associados a descargas atmosféricas.

A corrente de retorno que flui através do canal ionizado durante uma descarga atmosférica apresenta uma variação temporal extremamente rápida, gerando campos eletromagnéticos que também se alteram rapidamente. Esses campos são irradiados pelo ar a partir do ponto de incidência da descarga, como ilustrado na Figura 7. Quando esses campos eletromagnéticos interagem com os condutores de uma linha de transmissão ou rede de distribuição, induzem sobretensões nos mesmos. Essas sobretensões, por sua vez, se propagam ao longo dos condutores, podendo causar sérios danos aos equipamentos elétricos conectados à rede (DE CAMPOS, 2012).

Figura 7 - Representação da onda eletromagnética irradiada pela corrente de retorno.



Fonte: (VISACRO,2005).

A tensão induzida nas redes de distribuição é influenciada por dois fatores principais: a intensidade do campo eletromagnético, que é diretamente proporcional à derivada da corrente de retorno, e a distância entre o ponto de incidência da descarga e a rede. Mesmo a distâncias de aproximadamente 200 metros, a tensão induzida pode ser significativa, frequentemente ultrapassando 100 kV (VISACRO, 2005).

## 2.4 Características e parâmetros das descargas atmosféricas

Em projetos de proteção de linhas de transmissão e redes de distribuição, o conhecimento das características e frequência da ocorrência das descargas são fundamentais para os estudos do comportamento dos sistemas frente as descargas atmosféricas. Para a engenharia os principais parâmetros associados as descargas utilizados no dimensionamento dos materiais e equipamentos que compõem a rede de distribuição são energia específica, corrente de descarga de retorno e a taxa de incidência. Tais parâmetros influenciam significativamente no balanço entre a severidade da solicitação e a suportabilidade dielétrica dos equipamentos da rede e determina a ocorrência ou não de falha, sendo fundamental para o dimensionamento de proteções do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) (CHOWDHURI, 2001).

### 2.4.1 Densidade de descarga atmosférica ( $N_g$ )

A densidade das descargas atmosféricas ( $N_g$ ) é uma medida que estima o número médio de descargas que incidem no solo por ano, sendo expresso em número de descargas/km<sup>2</sup>/ano, ou seja, estima a quantidade de descargas em um local por uma unidade de tempo.

A frequência de descargas nuvem-solo é um parâmetro de grande significado para a proteção do sistema elétrico contra descargas atmosféricas, uma vez que o número de desligamentos das redes de distribuição é diretamente proporcional à frequência de ocorrência de descargas atmosféricas na região (IEEE STD.1410, 2010). A medição do índice “ $N_g$ ” pode ser feita de três formas: a partir de uma rede de contadores de descargas, através dos dados providos por sistemas de detecção e localização de descargas atmosféricas (LLS, do inglês “*Lightning Location Systems*”) ou a partir do nível cerâmico.

O nível cerâmico, a forma mais utilizada em locais onde não há LLS, atua na indicação de frequência de tempestades de uma determinada região ou índices de densidades de tempestades, usualmente representado por “ $T_d$ ”. Esse parâmetro indica os dias de trovoadas por ano, sendo obtido através de estatística de dados acumulados por longos períodos de observação para cada região (VISACRO, 2005). Este método leva em conta tanto as descargas entre nuvens quanto as descargas nuvem-solo, sendo uma alternativa em locais onde não se dispõe dos outros métodos. O nível cerâmico por si só é insuficiente como parâmetro,

entretanto a densidade de descargas é obtida pelo nível ceráunico, através de equação empírica, cujas constantes variam de região para região.

Diversas equações são recomendadas, dependendo da região em análise. A Equação 1 corresponde a África do Sul, podendo apresentar grandes erros quando aplicada a regiões tropicais, tais como o Brasil, o que exige a utilização de expressões alternativas, como a Equação 2 (CABRAL, 2018).

$$N_{g(\text{África do Sul})} = 0,004T_d^{1,25} \quad (1)$$

$$N_{g(\text{Brasil})} = 0,030T_d^{1,12} \quad (2)$$

Onde:

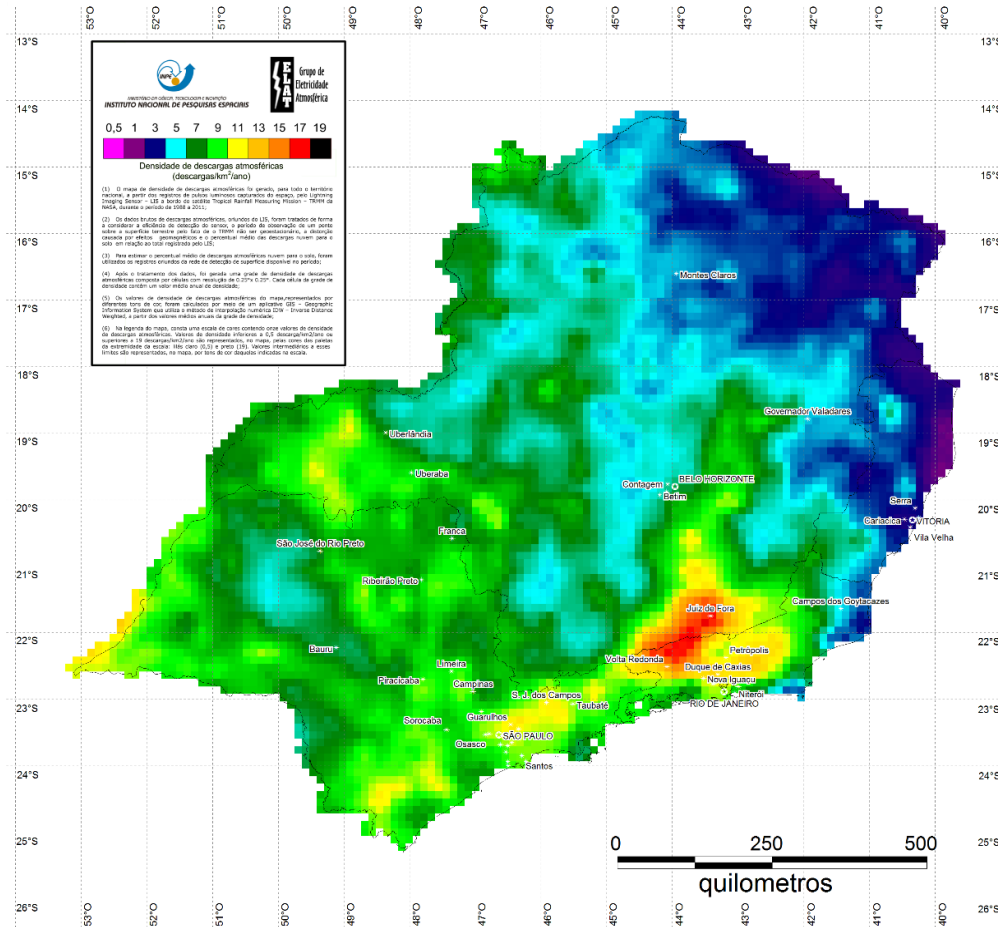
$T_d$  é o índice ceráunico (dias de trovoadas ouvidas/ano);

$N_g$  é a densidade de descargas (descargas/km<sup>2</sup>/ano).

O mapa da Figura 8, indica que a região de Juiz de Fora, Duque de Caxias e Volta Redonda, são as mais críticas da região Sudeste do Brasil, apresentando um valor de densidade de descargas próximo de  $N_g = 17$ ,  $17$  e  $11$  (descargas/km<sup>2</sup>/ano) respectivamente. Já para Belo Horizonte o valor médio é próximo de  $N_g = 7$  (descargas/km<sup>2</sup>/ano). Consultando o Site do INPE (ELAT), é possível pesquisar por cidade o índice de  $N_g$ , sendo os valores encontrados para a região de localização da Mina de Capanema:

- Ouro Preto – 6,3818 por km<sup>2</sup>/ano;
- Itabirito – 6,2939 por km<sup>2</sup>/ano;
- Mariana – 7,1895 por km<sup>2</sup>/ano.

Figura 8 - Densidade de descargas no Brasil região Sudeste (raios/km<sup>2</sup>/ano) (INPE).



Fonte: (INPE,2023).

Como pode ser observado, o método aproxima um determinado valor de  $N_g$  para uma região. Dessa forma, a constituição de mapas de densidade para regiões cada vez menores e com um grande volume de dados é buscado por muitos pesquisadores utilizando sistemas de localização de tempestades (*Lightning Location System*) e/ou redes de contadores de descargas (*Flash Counter*).

## 2.4.2 Energia Específica

A energia de específica de uma descarga atmosférica refere-se à quantidade de energia liberada por um raio no momento de sua ocorrência e é expressa geralmente em joules por ohms ou em relação à sua corrente e duração. Pode ser calculada através da integral apresentada na Equação 3 representada por (E).

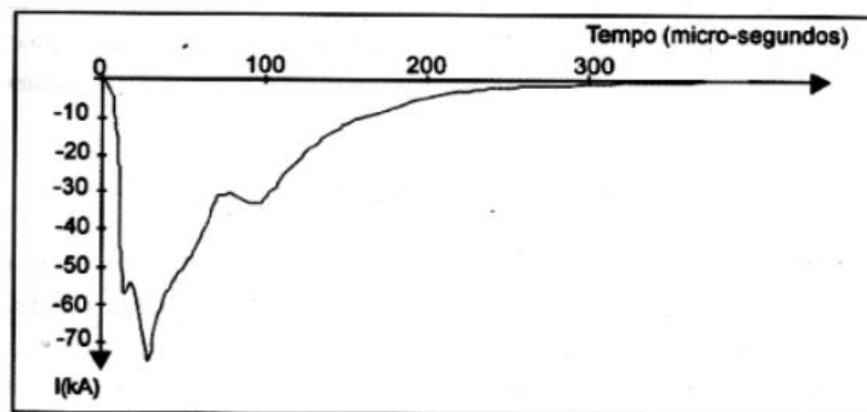
$$E = \frac{W}{R} = \int i^2 dt \quad (3)$$

Essa energia é crucial para a engenharia, especialmente no projeto e dimensionamento de materiais e equipamentos em redes de distribuição aérea. A investigação da energia específica das descargas atmosféricas permite que engenheiros avaliem o grau de severidade de uma descarga e compreendam os níveis de estresse mecânico e térmico que os componentes da rede, como cabos, isoladores e para-raios, devem suportar, garantindo assim a segurança e a confiabilidade do sistema. O balanço entre o valor da descarga e a suportabilidade dos equipamentos, determina a ocorrência ou não de falha, sendo de fundamental importância para o dimensionamento de proteções do SDEE (CHOWDHURI, 2001).

### 2.4.3 Corrente de Retorno

A corrente de retorno é caracterizada pelo valor de pico e forma de onda. A forma de onda possui uma característica de impulso com curta duração, da ordem de microssegundos. A corrente atinge um valor máximo e depois começa a decair chegando a atingir valores na escala de quilo amperes, como é mostrado na Figura 9 (VISACRO,2015).

Figura 9 - Forma de onda típica de uma primeira corrente de retorno negativa.



Fonte: (VISACRO,2015).

A forma de onda é determinada pelos parâmetros, tais como: tempo de frente de onda [ $\mu\text{s}$ ]; tempo de meia onda [ $\mu\text{s}$ ]; taxa de variação da corrente em relação ao tempo [ $\text{kA}/\mu\text{s}$ ]; forma de onda; e polaridade (positiva ou negativa). Fatores aleatórios, como: condições geológicas, características sazonais, climáticas e localização geográfica, podem influenciar na amplitude e na forma de onda da corrente de descarga. Dessa forma, a escolha de um modelo matemático

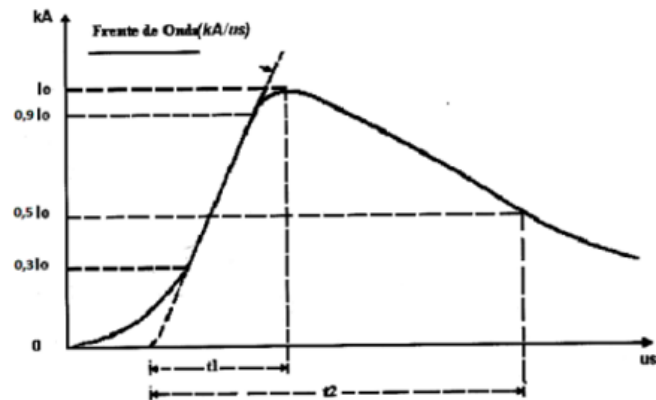
fiel a forma de onda é importante, para que os resultados obtidos reflitam fielmente os reais. Existem diversos modelos propostos para representar a corrente de descarga, entre eles um dos modelos mais utilizados e bastante difundida na literatura acadêmica foi proposto por Heidler (1999).

O modelo de Heidler destaca-se pela sua precisão na simulação dos parâmetros elétricos das descargas atmosféricas levando em consideração fatores como a amplitude do pico de corrente, tempo de subida e tempo de decaimento, permitindo uma análise detalhada e confiável dos dados. Tentando suprir as deficiências da onda dupla exponencial, foi proposta uma função analítica. Essa função é capaz de representar de forma mais eficaz as curvas médias ou medianas de corrente de descarga, elaboradas a partir de dados obtidos por medições diretas em torres instrumentadas (CABRAL,2018).

Nesse contexto, a função de Heidler contempla a reprodução da frente de onda côncava e do segundo pico, característicos das primeiras descargas atmosféricas e o decaimento de sua amplitude após a ocorrência do pico, representando com uma boa precisão os valores medianos de descargas medidas através das torres instrumentadas (DE CONTI; VISACRO, 2007; VISACRO et al., 2010). Ao incorporar os parâmetros específicos das descargas, como a intensidade da corrente, forma da onda e duração, o modelo de Heidler possibilita uma análise detalhada dos efeitos eletromagnéticos induzidos, contribuindo significativamente para o aprimoramento das técnicas de mitigação de riscos associados às descargas atmosféricas.

A Figura 10 apresenta a forma de onda típica representada por Heidler. É possível através da forma de onda averiguar alguns parâmetros, como o valor de crista (Valor de Pico)  $I_0$ , o tempo de frente  $t_1$  e o tempo de cauda ( $t_2$ ). O tempo de frente de onda da corrente de descarga corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o início da onda impulsiva até o alcance do primeiro pico da onda (VISACRO,2005). Já o tempo de cauda pode ser considerado como o tempo necessário para se atingir 50% do valor de pico após o início do surto.

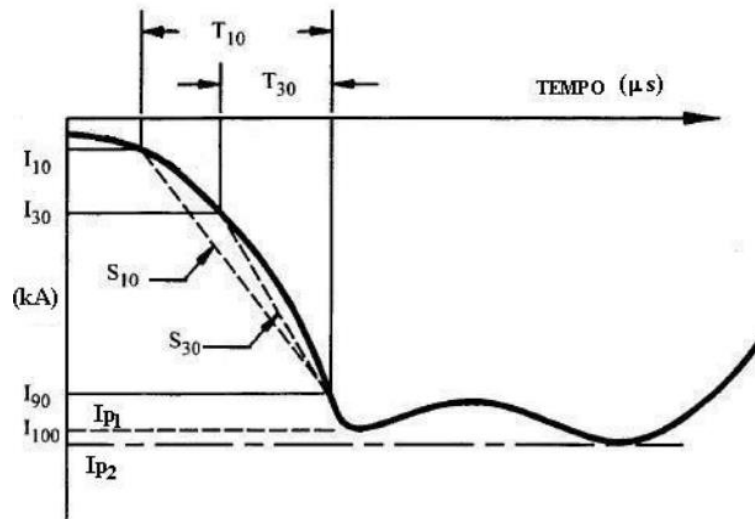
Figura 10 - Representação da forma de onda da corrente obtida pela função de Heidler.



Fonte: (RODRIGUES,2022).

Na Figura 11 é apresentada uma adaptação da forma de onda da corrente de descarga de Heidler, é possível identificar mais detalhadamente as características gerais do formato da corrente de descarga ao longo do tempo de uma descarga nuvem-solo negativa. A partir disso serão definidos alguns dos principais parâmetros a serem analisados.

Figura 11 - Forma de onda típica da corrente associada a primeiras descargas de retorno negativas descendentes.



Fonte: Adaptada de (COELHO,2010)

Os valores indicados na Figura 11 significam:

$I_{p1}$ : Valor inicial da corrente de pico que determina o tempo de frente da onda;

$I_{p2}$ : Valor final do pico da corrente que determina a amplitude da onda;

$I_{10}$ ,  $I_{30}$  e  $I_{90}$ : Valores referentes a 10, 30 e 90% de  $I_{p1}$ ;

$I_{100}$ : Maior valor entre  $I_{p1}$  e  $I_{p2}$ ;

$T_{10}$ : Tempo entre os valores de corrente  $I_{10}$  e  $I_{90}$ ;

$T_{30}$ : Tempo entre os valores de corrente  $I_{30}$  e  $I_{90}$ ;

$S_{10}$ : Taxa de crescimento média da corrente entre os valores  $I_{10}$  e  $I_{90}$ ;

$S_{30}$ : Taxa de crescimento média da corrente entre os valores  $I_{30}$  e  $I_{90}$ .

#### **2.4.4 Tempo de Frente de Onda ou Tempo de Crista ( $t_{cr}$ )**

Refere-se ao intervalo necessário de tempo para que a corrente de retorno atinja seu valor de pico após o início da descarga atmosférica, indicando a rapidez com que a corrente se propaga e é dado em microssegundo (VISACRO,2005).

#### **2.4.5 Tempo de Meia onda ou Tempo de Cauda ( $t_{cl}$ )**

É o intervalo de tempo entre o início da descarga e o ponto da cauda em que a amplitude cai a 50% do valor máximo dado em microssegundo. Esse parâmetro trás uma noção da carga transferida pela descarga. Para descargas de mesma amplitude, quanto maior o tempo de meia onda, maior o valor da carga associada (PEDROSA,2013).

#### **2.4.6 Taxa de Variação da Corrente em Relação ao Tempo [kA/ $\mu$ s]**

Representa uma medida de rapidez com que a corrente muda ao longo do tempo, expressando a intensidade da descarga. É encontrado pela derivada, no tempo, da onda da corrente de descarga em um ponto de interesse da mesma. Com este parâmetro é possível entender os efeitos eletromagnéticos e os riscos associados a descargas atmosféricas e a avaliar a sua capacidade de causar danos.

### **2.5 EFEITO DAS DESCARGAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

As descargas atmosféricas representam uma das principais causas de avarias e interrupções não planejadas no fornecimento de energia elétrica, afetando tanto as linhas de transmissão quanto as de distribuição, sendo de suma importância o estudo dessas descargas conforme destacado por Filho (2006). No Brasil, estima-se que cerca de 40% dos desligamentos

nas redes de distribuição sejam atribuídos a eventos de descargas atmosféricas (MESQUITA, 2017; SOARES, 2023).

No contexto dos sistemas elétricos, os danos causados por descargas atmosféricas variam de acordo com o nível de tensão do sistema e outros fatores relevantes. No setor de transmissão, as descargas atmosféricas diretas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos (VISACRO, 2005). Por outro lado, no setor de distribuição, tanto as descargas diretas quanto as indiretas podem gerar sobretensões impulsivas que superam o NBI das linhas de distribuição (SILVA NETO, 2004). Essas sobretensões podem resultar em falhas operacionais, interrupções de serviço e danos permanentes a equipamentos, como transformadores, reguladores de tensão e dispositivos de proteção.

É importante destacar que, os efeitos causados pela incidência das descargas diretas são bastantes intensos, já as descargas indiretas são menos intensas (LIMA, 2023). Dessa forma, se a rede de distribuição é capaz de suportar as sobretensões resultantes de descargas diretas de é capaz que ela também suporte as sobretensões induzidas por descargas indiretas da mesma intensidade. Assim, neste trabalho, será realizado um estudo sobre o fenômeno das descargas diretas em uma rede de distribuição situada em uma área de Mineração.

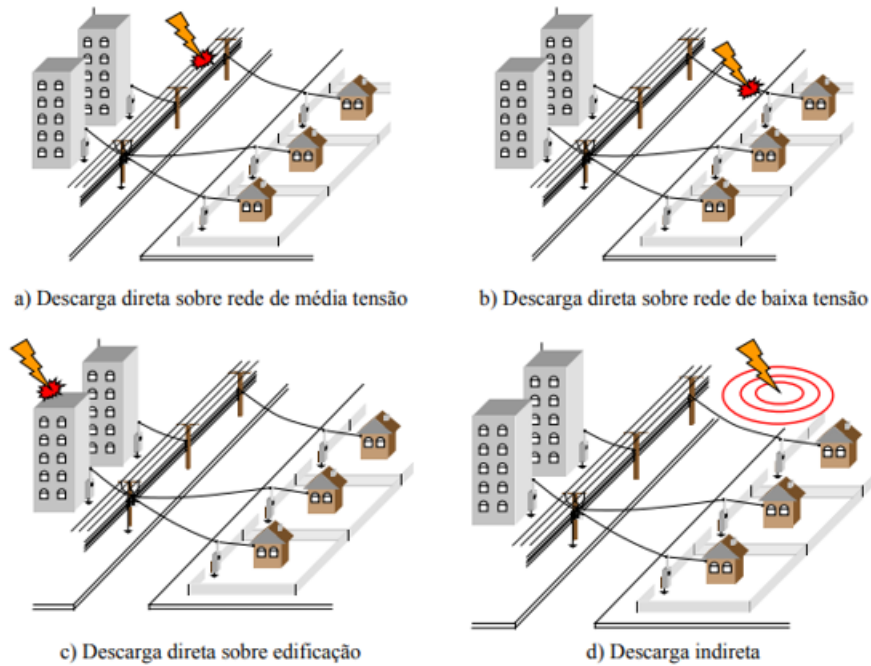
### **2.5.1 Mecanismos de Interação das Descargas Atmosféricas**

As interações entre descargas atmosféricas e sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser classificadas em dois grupos principais. O primeiro grupo Figura 12 (a), Figura 12 (b) e Figura 12 (c), envolvem as descargas diretas, que ocorrem quando uma descarga atmosférica incide, respectivamente, diretamente sobre os componentes da rede de média tensão ou incide sobre a rede de baixa tensão ou até mesmo incide sobre a própria edificação. Este tipo de interação é caracterizado por uma amplitude elevada da corrente de surto injetada na rede, resultando em uma alta energia específica que pode causar danos significativos às estruturas e aos componentes atingidos.

O segundo grupo refere-se às descargas indiretas, que ocorrem quando a descarga atinge pontos próximos à rede de distribuição, conforme ilustrado na Figura 12 (d). Essas descargas afetam a rede através dos campos eletromagnéticos gerados, induzindo tensões nas linhas e nos componentes da rede de baixa tensão, impactando diretamente os consumidores conectados. Embora a amplitude dos surtos induzidos por descargas indiretas seja geralmente

menor do que a das descargas diretas, sua frequência de ocorrência tende a ser maior, especialmente em áreas com elevada atividade elétrica atmosférica (De CONTI, 2006).

Figura 12 - Tipos dos eventos de interação das descargas atmosféricas e sistemas de distribuição.



Fonte: (DE CONTI,2006,p.2).

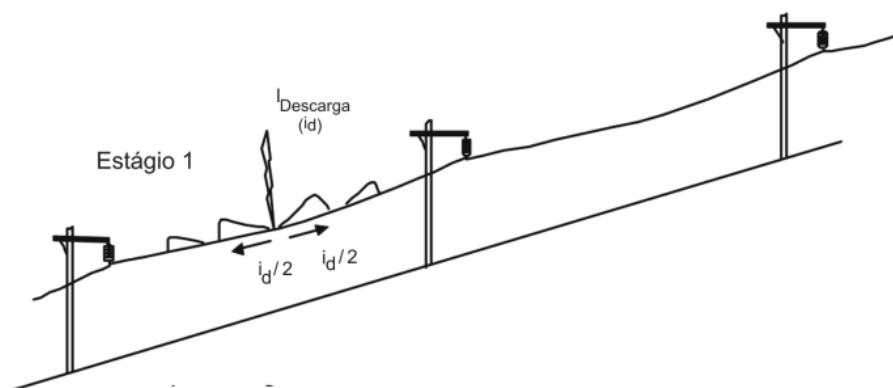
### 2.5.2 Sobretensões Devido Descargas Diretas

O impacto das descargas atmosféricas em linhas de distribuição é considerado mais crítico do que em linhas de transmissão, principalmente devido ao seu nível de isolamento inferior (IEEE STD.1410, 2010). Essas descargas podem causar danos significativos a equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), incluindo transformadores de distribuição, fusíveis, disjuntores, religadores, chaves seccionadoras e isoladores. Além disso, as descargas atmosféricas podem induzir impulsos na rede secundária, resultado da capacitância entre as bobinas dos transformadores, gerando efeitos adversos em equipamentos localizados a jusante (CABRAL,2018).

Uma descarga direta na rede, injeta uma corrente elevada a partir do ponto de descarga, a corrente de retorno  $I_d$  se divide em duas parcelas de amplitude aproximadamente iguais ( $I_d/2$ ) para ambas as direções da rede de distribuição conforme Figura 13, dando origem a uma sobretensão de valor dado por  $U=Z.I/2$ , onde  $Z$  é a impedância de surto da linha. Esse valor é

significativamente acima do nível básico de isolamento (NBI) da rede, que é estimado entre 95 kV e 300 kV para redes de distribuição. Como resultado, é esperado que ocorram disrupções ao longo da rede até que a sobretensão se reduza a níveis suportáveis pelo isolamento. Essas disrupções direcionam uma parte da onda de corrente para o solo. (GUIMARÃES, 2003)

Figura 13 - Representação da sobretensão em uma rede de distribuição resultante de uma Descarga Direta.



Fonte: (VISACRO FILHO, 2005)(Adaptado).

Relacionado as disrupções, cabe ressaltar alguns conceitos utilizados em redes de distribuição elétrica:

**Descarga de contorno:** Conhecido na literatura como *Flashover*, está associada à incidência de descargas atmosféricas diretas nas fases, resultando na ruptura do isolamento dos dispositivos de suporte da rede. Esse fenômeno ocorre quando a sobretensão gerada nas fases em direção à estrutura ultrapassa o nível de isolamento dos isoladores, levando ao surgimento de um arco elétrico. Assim, o rompimento do isolamento se traduz na formação de um arco elétrico, que pode ser superficial ou volumétrico, ao longo do contorno dos isoladores que sustentam as fases. (CABRAL, 2018);

**Descarga de contorno reversa:** Conhecido na literatura como *Back-Flashover*, refere-se a ruptura do isolamento associado a descargas atmosféricas que atingem o cabo guarda ou o poste de uma linha de distribuição. Esse impacto gera uma elevação de potencial na estrutura, resultando em uma tensão que supera o nível de isolamento dos dispositivos de suporte. Conseqüentemente, ocorre o surgimento de um arco elétrico, evidenciando a falha no isolamento. (CABRAL, 2018).

### 2.5.3 Melhoria do desempenho de redes de distribuição frente a descargas diretas

É crucial que regiões com alta incidência de descargas recebam atenção especial na escolha de sistemas de proteção e na implementação de medidas de mitigação de seus efeitos. Isso se deve à significativa variação na densidade de descargas em todo o território nacional, onde determinados locais apresentam parâmetros elevados que exigem estratégias específicas para garantir a segurança e a continuidade do fornecimento de energia.

A corrente de pico e o tempo de frente de onda são fatores cruciais na caracterização das tensões transitórias que afetam equipamentos e redes elétricas. Esses parâmetros desempenham um papel fundamental na definição da suportabilidade dielétrica dos dispositivos. Outro parâmetro é a energia transferida para a rede ou equipamento durante uma descarga atmosférica, conhecida como energia específica, é especialmente relevante no dimensionamento de para-raios de distribuição (COELHO, 2010). Os isoladores, por sua vez, estão sujeitos a uma combinação da tensão de frequência industrial e da sobretensão impulsiva gerada pelos surtos atmosféricos, o que reforça a necessidade de um projeto adequado para a proteção desses componentes.

Esses parâmetros influenciam diretamente o equilíbrio entre a severidade da solicitação (valor da descarga) e a capacidade de suportabilidade dos equipamentos. Esse balanço é determinante para a ocorrência de falhas, sendo essencial para o correto dimensionamento das proteções no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) (CHOWDHURI, 2001). Um entendimento aprofundado dessas interações é fundamental para garantir a integridade dos sistemas elétricos e a segurança dos equipamentos conectados.

Esses dois tipos de descargas, diretas e indiretas, evidenciam a necessidade de um planejamento e de um sistema de proteção adequados para as redes de distribuição, a fim de minimizar os riscos de danos e interrupções de serviço. Para mitigar os efeitos das descargas atmosféricas nas redes de distribuição, é fundamental implementar estratégias de proteção, como a colocação de cabo de blindagem ou cabo guarda sobre os condutores das fases, utilização de descarregadores para-raios e aterramentos (IEEE STD.1410, 2010). Pesquisas recentes têm explorado novos materiais e tecnologias que aumentam a robustez (NBI) dos componentes do SEP contra descargas atmosféricas, contribuindo para a segurança e confiabilidade do sistema elétrico.

Ademais, a modelagem de surtos atmosféricos representa uma ferramenta fundamental para a compreensão e previsão dos impactos das descargas elétricas em diversas configurações de redes de distribuição. Ao adotar essas abordagens, é possível realizar um planejamento mais eficaz e implementar medidas preventivas que podem reduzir significativamente os riscos associados a esses fenômenos naturais, minimizando danos a equipamentos e interrupções no fornecimento de energia.

Neste trabalho, utiliza-se o software EMTP/ATPdraw para a implementação dos modelos propostos e a análise das ondas de tensão e correntes associadas a descargas incidentes na rede de distribuição em estudo. O EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) e o ATPdraw (*Alternative Transients Program*) são amplamente reconhecidos por sua capacidade de simular transientes eletromagnéticos, permitindo uma investigação detalhada dos efeitos das descargas atmosféricas nas redes elétricas.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo se dedica a apresentar e caracterizar a rede de distribuição de 34,5 kV em estudo. A rede, consiste a em uma iniciativa de revitalização das operações da Mina de Capanema.

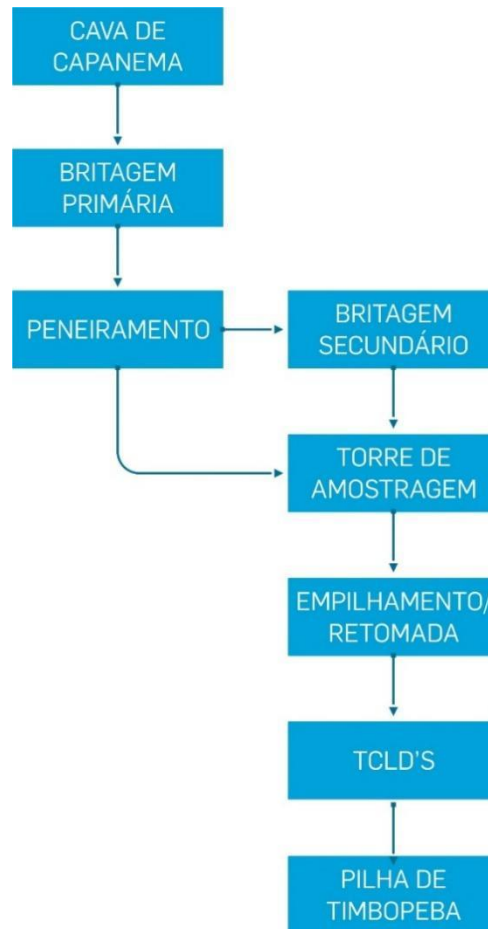
#### 3.1 Projeto Capanema Unidade Natural

O Projeto Capanema Umidade Natural, de propriedade da Vale, está situado na interseção dos municípios de Itabirito, Mariana, Santa Bárbara e Ouro Preto, em Minas Gerais. Este projeto visa a implementação e revitalização das estruturas da Usina de Capanema, que incluem as instalações de britagem primária, peneiramento, britagem secundária, até o pátio de homogeneização na Mina de Capanema.

A construção de um Transportador Correia de Longa Distância (TCLD) permitirá o transporte do material ROM (*run-of-mine*) britado até a usina da Mina de Timbopeba, localizada no município de Mariana, onde o material será beneficiado. Devido ao valor investido e capacidade de produção especulada para a Mina, atualmente o projeto Capanema se destaca como um dos mais relevantes em Minas Gerais.

O fluxograma do processo da Mina de Capanema, apresentado na Figura 14, pode ser descrito da seguinte forma: o material é transportado das cavas para a britagem primária por meio de caminhões autônomos. Após a britagem primária, o material britado é transferido para o peneiramento através de uma correia transportadora. Se a granulometria do material estiver adequada, ele segue para a torre de amostragem e é empilhado no pátio de homogeneização. Caso contrário, o material é submetido a uma segunda britagem antes de ser transportado para o pátio. No pátio, o ROM britado é empilhado e, gradualmente, enviado para a pilha de Timbopeba conforme a demanda através do TCLD.

Figura 14 - Fluxograma da Rota de Processo – Capanema.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Região de Capanema, possui condições ambientais que exigem cuidados especiais na concepção do projeto, fornecimento e montagem de redes de distribuição. Localizada em uma área montanhosa de altitude elevada e aliada ao alto nível cerâmico da região, a Mina de Capanema se torna suscetível à atividades elétricas constantes nos períodos de maior índice pluviométrico.

Abaixo, apresenta-se alguns dados relevantes sobre as características ambientais da Mina de Capanema (SNC.IAVALIN, 2018):

**Temperatura:**

- Média anual: 18,3 °C;

**Elevação:**

- A planta de Capanema está situada a aproximadamente 1.385 m acima do nível do mar;

**Período de chuvas:**

De agosto a junho.

A combinação dos fatores ambientais mencionados anteriormente contribui para um cenário propício à ocorrência de descargas atmosféricas. Adicionalmente, a natureza do ambiente de mineração, caracterizada pela presença de partículas de poeira em suspensão, cria condições severas que podem levar à degradação e ao baixo desempenho dos componentes da rede elétrica. Ambientes poluídos, assim como isoladores sujos ou com fissuras internas, comprometem significativamente o nível de isolamento, o que, em situações de transitórios atmosféricos, pode resultar em falhas de arco. Essas falhas, por sua vez, ocasionam interrupções temporárias e/ou permanentes no fornecimento de energia elétrica, impactando negativamente os indicadores de confiabilidade (COELHO, 2010)

As condições ambientais, aliadas à geografia da região, tornam a rede de distribuição de Capanema particularmente vulnerável a descargas atmosféricas. Portanto, é imprescindível a implementação de estratégias eficazes de proteção e mitigação, a fim de salvaguardar a infraestrutura e garantir a continuidade das operações na mina.

**3.2 Sistema Elétrico do Projeto Unidade Natural Capanema**

O sistema elétrico existente possui a Subestação Principal de Timbopeba como alimentação principal do projeto. A subestação, recebe energia elétrica em 138 kV da concessionária CEMIG e alimenta dois transformadores com as características 20/25/30 MVA e relação de tensão 138-34,5 kV. Estes transformadores possuem comutadores automáticos de TAP's em 19 posições de correção da tensão secundária ao barramento do Projeto Capanema. Um destes transformadores permanece em "*stand-by*" sendo utilizado apenas em caso de falha do outro equipamento.

A demanda de energia total, prevista para funcionamento de todo processo descrito anteriormente, em sua fase inicial é de aproximadamente 14,57 MVA. O sistema 34,5 kV alimenta as subestações secundárias do Projeto Capanema. A distribuição é realizada tanto em

rede aérea com cabos de alumínio nú 1/0 AWG, 4/0 AWG, cabos isolados de alumínio na bitola de 240 mm<sup>2</sup>, cabos protegidos de alumínio de bitola 150 mm<sup>2</sup>, e em leitos utilizando cabos de 240 m<sup>2</sup> ao longo das galerias de TCLD e túneis.

A distribuição secundária de energia elétrica, se dá a partir das subestações secundárias para as áreas industriais e demais instalações, (Britagem, Peneiramento, Administração, TCLD e etc.), e ocorre em sua maioria na configuração de redes aéreas, nos níveis de tensão definidos abaixo e na configuração de sistema radial, trifásico, 60 Hz.

- 4,16 kV, para área industrial, máquinas móveis e áreas de mina;
- 480 V e 690 V, para áreas industriais;
- 380/220 V, para iluminação e tomadas de áreas industriais, exceto para tomadas para máquina de solda, que deverão ser alimentadas em 480 V;
- 220/127 V, para iluminação e tomadas de instalações prediais fora da área industrial.

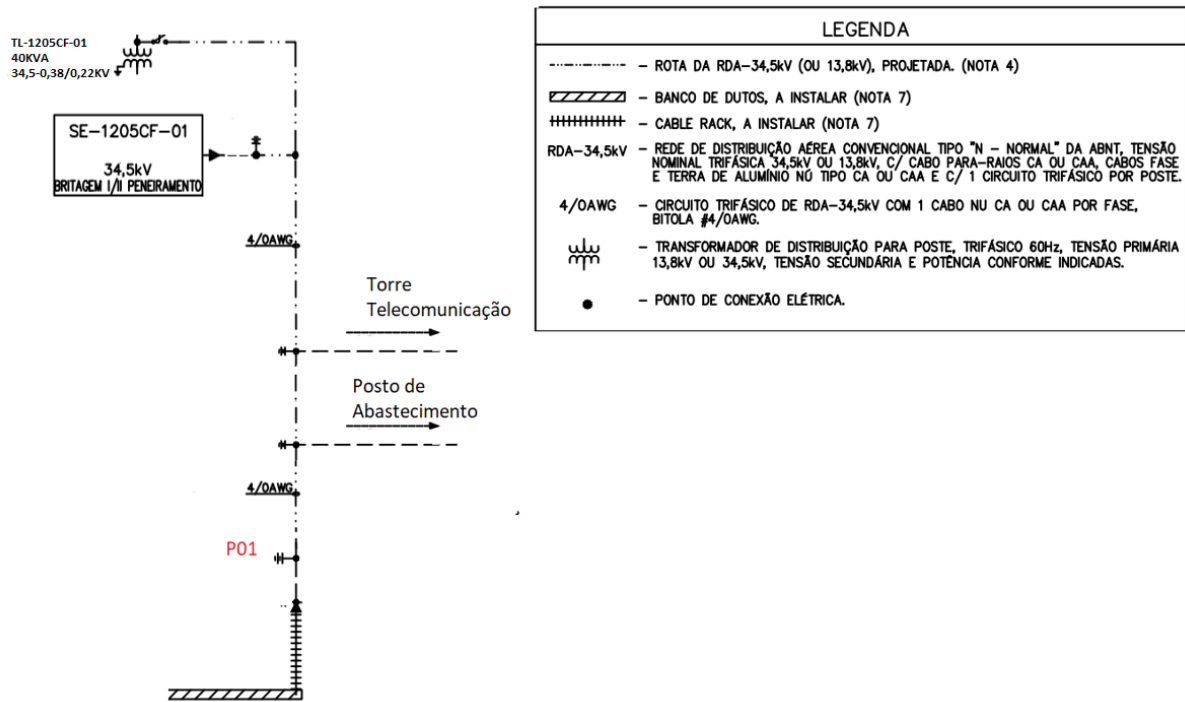
### **3.3 Topologia do Trecho da Rede de Distribuição**

O Sistema de 34,5 kV é distribuído até Capanema iniciando-se como uma Rede de Distribuição Isolada (RDI), utilizando cabos isolados de 240mm<sup>2</sup> até o início do TCLD, na qual por meio de um cable rack/TCLD percorre uma distância de aproximadamente 10,7 km para fornecer energia às cargas de processo, que estão distribuídas na Mina de Capanema. Toda a distribuição de energia na mina ocorre em nível de tensão de 34,5 kV, e as estruturas do ramo principal da rede operam em uma topologia aérea, ramificando-se por toda a planta de processos para alimentar subestações secundárias, além de transformadores de força e iluminação. Essas estruturas são compostas basicamente por postes, cruzetas, isoladores e ferragens, apresentando diferentes configurações de acordo com o tipo de rede.

O trecho analisado abrange o ponto de transição do bandejamento (P01) para a rede aérea convencional, estendendo-se até a Subestação Secundária da Britagem I/II, que define o limite do nosso estudo. A escolha desse trecho se justifica, pois ele está inserido na topologia da rede aérea convencional, tipo N, utilizando cabos de alumínio nus, que são mais suscetíveis às intempéries. Além disso, esse segmento é um dos principais ramos que alimentam não apenas a subestação secundária da britagem, mas também outras subestações secundárias relevantes

para o projeto. No entanto, é importante ressaltar que este estudo se limita ao ponto das Britagens I e II conforme apresentando no diagrama unifilar da Figura 15.

Figura 15 - Diagrama Unifilar do Trecho Analisado.

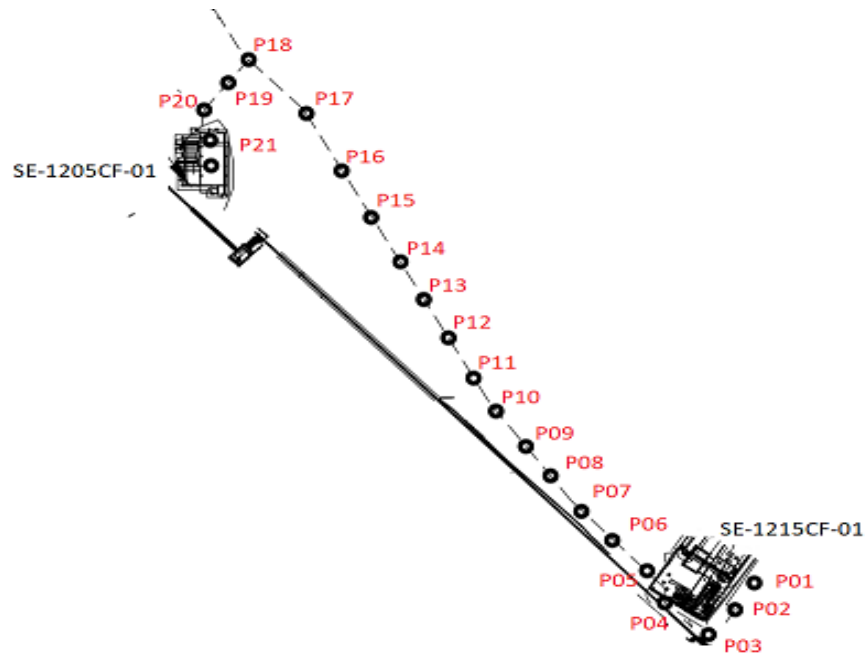


Fonte: Adaptado de (SNC.IAVALIN,2022) Uso Interno.

As estruturas da rede são compostas por postes de concreto ou madeira, com alturas variando entre 13 e 22 metros, isoladores de porcelana, além de cruzetas de fibra de vidro e madeira. O trecho, que pode ser observado na Figura 16, totaliza 1,4 km, com 20 vãos e 21 postes; o comprimento de cada vão, altura e resistência nominal <sup>2</sup> estão dispostos na Tabela 1. Os circuitos em análise utilizam cabos de alumínio sem alma de aço (CA) de 1/0 AWG para o neutro ou cabo guarda, e 4/0 AWG para as fases, conforme especificado no projeto.

<sup>2</sup> Valor de resistência que o poste suporta continuamente em qualquer direção ou face, quando submetido a um esforço, medida em daN, unidade de força e equivale a cerca de 1 kgf.

Figura 16 – Esboço do Trecho de rede aérea analisado.



Fonte: De autoria própria.

Tabela 1– Dados de cada vão da rede

N° Poste	Altura (m)	Resistência (daN)	Distância (m)	Vão
P01	13	1500	5	P01-P02
P02	13	2000	20	P02-P03
P03	13	2000	40	P03-P04
P04	13	1000	25	P04-P05
P05	13	2000	80	P05-P06
P06	13	1000	83	P06-P07
P07	13	1000	115	P07-P08
P08	13	1000	112	P08-P09
P09	13	2000	110	P09-P10
P10	13	1000	110	P10-P11
P11	13	1500	110	P11-P12
P12	13	1000	112	P12-P13
P13	13	1000	84	P13-P14
P14	13	1000	80	P14-P15
P15	13	1000	84	P15-P16
P16	13	1000	102	P16-P17
P17	15	1500	30	P17-P18
P18	22	1500	63	P18-P19
P19	22	1000	62	P19-P20
P20	15	1000	20	P20-P21
P21	15	1000	5	P21-FIM
Total			1452	

Fonte: De autoria própria.

Nesse contexto, a vulnerabilidade da rede de distribuição a descargas atmosféricas é uma preocupação significativa. A exposição contínua a condições adversas, como chuvas, ventos fortes e partículas de poeira, pode comprometer a integridade dos componentes, causando a diminuição dielétrica dos materiais, favorecendo a ocorrência de caminhos alternativos que podem possibilitar as correntes de fuga indesejadas. O acúmulo de sujeira nos cabos nus e isoladores pode criar caminhos alternativos para a corrente elétrica, intensificando ainda mais esse risco (SOUSA,2010).

Diante dessa vulnerabilidade, é fundamental realizar simulações que avaliem o comportamento do sistema elétrico sob os efeitos de descargas diretas. Essas simulações poderão fornecer conhecimentos valiosos para a melhoria da confiabilidade da rede de distribuição, possibilitando a implementação de medidas preventivas e corretivas que garantam a continuidade do fornecimento de energia na Mina de Capanema.

## **4 MODELOS PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Conforme discutido anteriormente, as falhas nas redes de distribuição são frequentemente provocadas por tensões transitórias geradas por descargas atmosféricas, que podem atingir diretamente os componentes da rede ou ocorrer nas suas proximidades. Para investigar esses fenômenos e o comportamento dos transitórios nas redes de distribuição, foram utilizados modelos adequados que representam os diversos componentes da rede, como transformadores, cabos, seccionadores e proteções, além de modelos que simulam as descargas atmosféricas e os mecanismos de interação com o sistema elétrico.

A modelagem da rede de distribuição é um processo fundamental para a compreensão das dinâmicas que afetam a confiabilidade e a performance do sistema. Neste contexto, foram empregadas ferramentas avançadas de simulação que permitem a análise detalhada de como as tensões transitórias se propagam através da rede, considerando fatores como a impedância dos componentes, a geometria, condições ambientais e as condições de aterramento da rede.

Com o intuito de avaliar a aplicação desses modelos em condições que se aproximem da realidade, este capítulo propõe a representação de uma parte do sistema de distribuição da planta mineradora da Mina de Capanema, que possui características semelhantes às encontradas nos sistemas instalados em certas áreas da Cemig, especialmente as caracterizadas pelo elevado grau de exposição em relação a circunvizinhança. São definidos modelos específicos para representar os diferentes componentes da rede, levando em conta não apenas suas características elétricas, mas também aspectos físicos e geométricos que influenciam a resposta a tensões transitórias.

Os modelos e a topologia de rede aqui apresentados servem como base para o entendimento da modelagem e simulações realizadas no software ATPDraw, sendo estes últimos tratados nos tópicos seguintes os quais se dedicarão a investigar os efeitos de descargas diretas em sistemas de distribuição. Através dessas investigações, buscamos não apenas entender melhor os mecanismos de falha, mas também desenvolver estratégias de mitigação que possam ser implementadas para aumentar a resiliência das redes de distribuição frente a eventos adversos.

#### 4.1 Modelagem da Corrente de Retorno da Descarga Atmosférica

O modelo da dupla exponencial é amplamente adotado em modelagens computacionais da corrente de retorno, destacando-se pela sua capacidade de representar com precisão a forma de onda da corrente de descarga. Como mencionado anteriormente, a função de Heidler é especialmente notável por sua precisão em simulações, pois consegue reproduzir a frente de onda côncava da corrente de descarga no início da onda, capturando a derivada máxima próxima ao pico e a declividade que se segue após a ocorrência do máximo. A função de Heidler é expressa pela seguinte equação (PEDROSA, 2013):

$$F(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{(1/n)}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{(1/n)}} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (4)$$

$$\eta = e^{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) * \left(n * \frac{\tau_1}{\tau_2}\right)^{(1/n)}} \quad (5)$$

Onde  $I_0$  corresponde à amplitude da forma de onda gerada,  $\eta$  corresponde a um fator de correção aplicado à amplitude da corrente,  $\tau_1$  e  $\tau_2$  constantes de controle dos tempos de subida e descida da onda de corrente, respectivamente, e  $n$  é um fator adimensional que controla a taxa de crescimento da curva sintetizada.

Embora não se possa afirmar com certeza que as formas de onda de correntes medidas no Morro do Cachimbo sejam representativas das descargas atmosféricas em todo o estado de Minas Gerais, como observado por De Conti (2006), é mais razoável utilizá-las para o estudo do desempenho do sistema de distribuição proposto. Isso se deve ao fato de que essas medições refletem de maneira mais realista as características das descargas em uma região tropical. Além disso, a Mina de Capanema está localizada a apenas 90 km do Morro do Cachimbo ou 44 km em linha reta no mapa. Com localidades próximas que apresentam semelhanças significativas, sugere-se que as características das descargas possam ser similares.

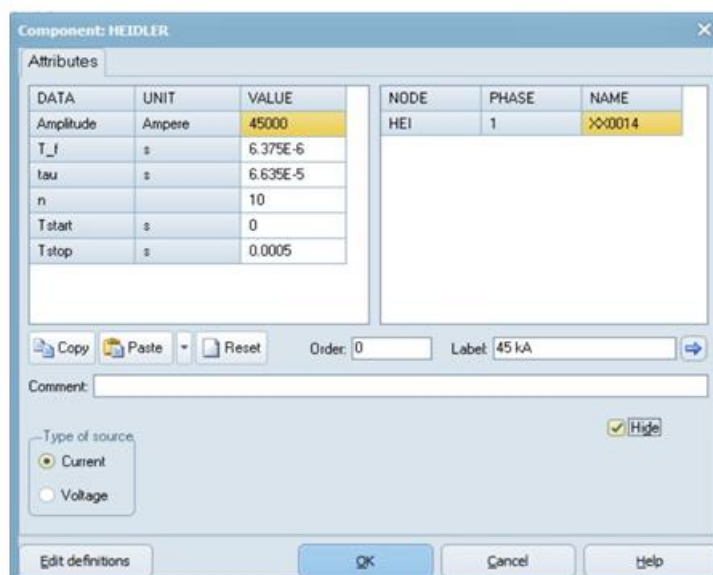
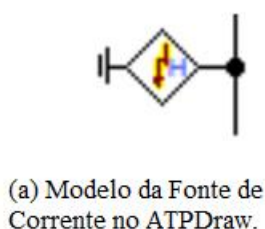
No presente trabalho, foram simuladas descargas diretas com amplitudes de 10 kA, 30 kA e 45 kA, sendo este último o valor mediano do pico de corrente máximo das medições realizadas no Morro do Cachimbo, conforme apresentado por De Conti (2006). A escolha da corrente de pico de 30 kA como parâmetro para simulações de descargas atmosféricas é

justificada pela sua natureza representativa e global, resultante de um extenso conjunto de dados coletados em diversas regiões ao redor do mundo (Anderson, 1980). A simulação da descarga de 10 kA é fundamentada na probabilidade de ocorrência das descargas atmosféricas, conforme discutido por Schoeder (2001).

O “*software*” ATPDraw inclui um componente específico que implementa a equação de Heidler para a modelagem de surtos atmosféricos, conforme ilustrado na Figura 17 (a). Para obtenção da equação de Heidler completa é necessário parametrizar a função considerando a amplitude, a duração da frente de onda (T-f), duração do surto ( $\tau$ ). Alguns autores analisaram como obter uma estimativa destes parâmetros para a reprodução da forma de onda típica de região tropical, sendo, portanto, adotado neste trabalho os parâmetros semelhantes ao apresentado em (BATISTA,2023).

Na Figura 17 (b), podem-se observar as variáveis utilizadas para modelar a fonte da descarga atmosférica utilizando o modelo de fonte tipo Heidler, do ATPDraw (BPA, 2010).

Figura 17 - Fonte de Corrente de Heidler no ATPDraw.



(b) Janela para a parametrização da função de Heidler pelo usuário.

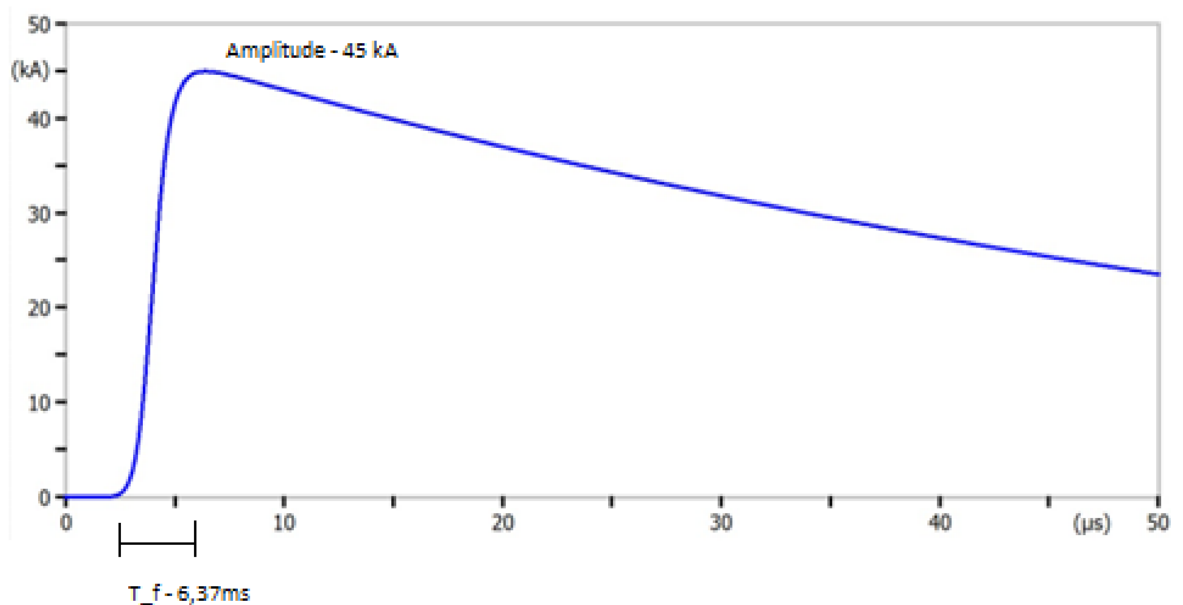
Fonte: De autoria própria.

- Amplitude é a amplitude da função corrente (A). Não representa o valor de pico do surto.
- $T_f$  é a duração da frente (s). Intervalo entre  $t=0s$ , até o tempo do pico da função. É assumido o valor dos dados medianos do morro do cachimbo para o parâmetro T10 dividido por 0,8.
- $\tau$  é a duração do surto (s). Intervalo entre  $t=0s$  e o ponto na cauda onde a amplitude da função cai para 37% do seu valor de pico. Considera-se para tal o valor mediano  $53\mu s$ .
- $n$  é o fator que influencia a taxa de aumento da função. O acréscimo de  $n$  aumenta o máximo da inclinação; Para esse fator adotou-se 10 unidades de  $n$ .
- $T_{start}$  é o tempo de início em (s), igual a 0 (zero).
- Valor de origem zero para  $T_{stop}$ , igual a  $500\mu s$ .

Essa abordagem permite configurar a fonte para a reprodução de correntes de descarga com formas de onda que possuem características aproximadas às registradas nas medições realizadas na Estação do Morro do Cachimbo.

A forma de onda reproduzida com os parâmetros propostos no ATPDraw é apresentada na Figura 18, considerando a amplitude  $45kA$ .

Figura 18 - Formas de onda reproduzidas no ATPDraw.



Fonte: De autoria própria.

## 4.2 Modelagem Dos Componentes Da Rede De Distribuição Escolhida

### 4.2.1 Modelagem da Linha de Distribuição

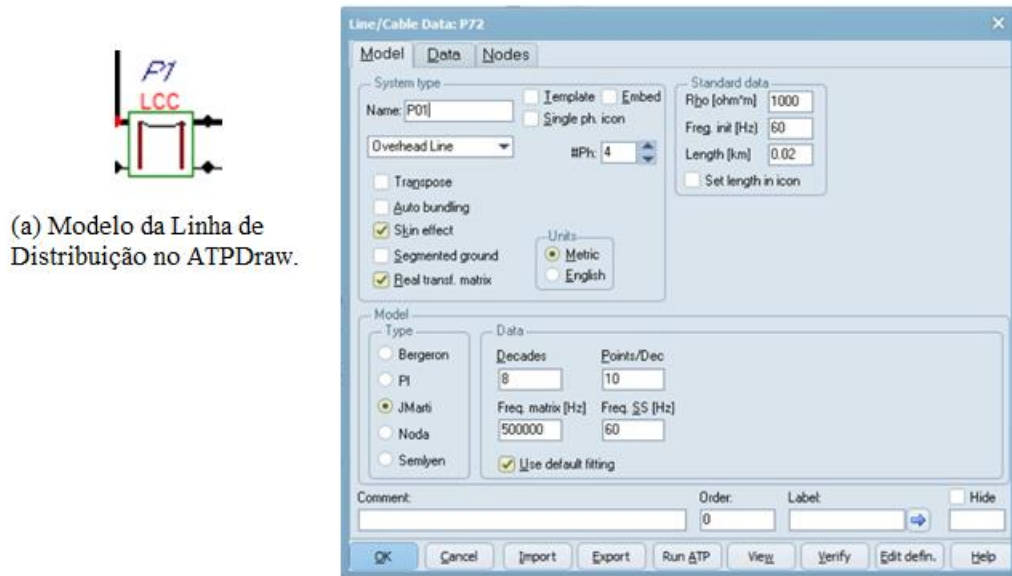
Entre as diversas rotinas disponíveis no software ATPDraw, destaca-se a rotina inclusa no bloco LCC, que permite a parametrização de modelos para linhas de distribuição. Os principais modelos utilizados no ATP incluem os modelos  $\pi$ , o modelo de Bergerron e o modelo de J. Marti. Para a presente pesquisa, optou-se pelo modelo de J. Marti, este modelo é considerado mais confiável, pois evita problemas relacionados à estabilidade numérica e pode ser aplicado a uma ampla gama de frequências (SILVA,2015). Além disso, os parâmetros da rede como a resistência e a indutância, são dependentes da frequência de operação do sistema, sendo esse modelo ideal para analisar as sobretensões de origem atmosféricas (CABRAL,2018).

Na Figura 19 (a) é apresentado a representação do bloco LCC utilizado no ATPdraw para simulação de redes de distribuição.

Ao selecionar o modelo LCC no ATPDraw e a sub-rotina (JMarti), na primeira tela apresentada na Figura 19 (b), é necessário parametrizar o modelo para realizar corretamente as simulações. Inicialmente é definido o tipo do sistema (System Type), modelo (Model) que será considerado, Resistividade do solo (Rho) e comprimento do vão (Silva,2015).

Outros dados a serem parametrizados na sub-rotina foram: frequência característica repartida em 8 décadas com 10 pontos/décadas; frequência fundamental igual à frequência industrial de 60 Hz; e o valor de 500 kHz como frequência característica para representar fenômenos relativos a surtos atmosféricos. (CABRAL.2018).

Figura 19 - Linha de Distribuição no ATPDraw.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2024.

Os parâmetros apresentados anteriormente referem-se ao primeiro vão da rede analisada. Para garantir uma modelagem precisa e abrangente, é necessário adicionar um bloco para cada vão subsequente, realizando a parametrização de acordo com os dados específicos de cada um. Esse procedimento é essencial para capturar as variações nas características da rede ao longo de sua extensão.

Além da parametrização do modelo inicial, que foi apresentada na tela anterior, é igualmente importante incluir os dados referentes aos condutores utilizados. Isso envolve informações cruciais como o raio interno do condutor ( $R_{int}$ ), o raio ( $R_{out}$ ), a resistência, a altura do condutor ( $V_{tower}$ ) e a altura do condutor no meio do vão em relação ao solo ( $V_{mid}$ ). Esses parâmetros são fundamentais para a análise do desempenho elétrico e mecânico da rede.

Conforme ilustrado na Figura 15, a rede de distribuição estudada é composta por condutores de alumínio com alma de aço (CA) 1/0 (Poppy) e 4/0 (Oxlip). Com base nas informações disponibilizadas pelo fabricante INDUSCABOS, obtém-se dados essenciais que permitem uma modelagem precisa e a simulação adequada do sistema elétrico em análise.

Figura 20 - Informações técnicas da empresa Induscabos.

Código	Bitola AWG ou MCM	Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )	Encordoamento: N° de fios x Diâmetro Nominal (mm)	Diâmetro Externo Nominal (mm)	Peso Líquido Nominal (kg/km)	Carga de Ruptura (kN)	Capacidade de Corrente	Resistência Elétrica Max. a 20°C (Ohm/km)
Peachbell	6	13,30	7 x 1,55	4,65	36,5	2,47	95	2,16762
Rose	4	21,15	7 x 1,96	5,88	58,2	3,94	130	1,36309
Iris	2	33,62	7 x 2,47	7,41	92,5	5,95	175	0,85750
Pansy	1	42,41	7 x 2,78	8,34	117,1	7,01	200	0,697977
Poppy	1/0	53,52	7 x 3,12	9,36	147,6	8,73	235	0,53866
Aster	2/0	67,44	7 x 3,50	10,50	185,7	10,99	270	0,42748
Phlox	3/0	85,02	7 x 3,93	11,79	234,1	13,45	315	0,33909
Oxlip	4/0	107,22	7 x 4,41	13,23	294,7	16,92	365	0,26888

Fonte: Catálogo Induscabos.

Com as informações da Figura 20, é possível calcular os raios internos e externos dos condutores, sendo estes a metade do diâmetro nominal do fio e diâmetro externo, conforme apresentados nas equações baixo:

Para os condutores 1/0 código Poppy:

$$R_{out} = \frac{9,36}{2} = 4,68 \text{ mm} = 0,468 \text{ cm} \quad (6)$$

$$R_{int} = \frac{3,12}{2} = 1,56 \text{ mm} = 0,156 \text{ cm} \quad (7)$$

Para os condutores 4/0 códigos Oxlip:

$$R_{out} = \frac{13,23}{2} = 6,61 \text{ mm} = 0,661 \text{ cm} \quad (8)$$

$$R_{int} = \frac{4,41}{2} = 2,205 \text{ mm} = 0,2205 \text{ cm} \quad (9)$$

O próximo parâmetro a ser avaliado é a resistência elétrica, expressa em ohms por quilômetro (ohms/km). De acordo com a Figura 20, a resistência em corrente contínua a 20°C para o cabo CA 1/0 é de 0,53866 ohm/km, enquanto para o cabo CA 4/0 é de 0,26888 ohm/km. Como mencionado no item 3.3, a temperatura média anual da Mina de Capanema é de

aproximadamente 18,3°C. Devido a proximidade das temperaturas, será considerado os valores apresentados, para os condutores do sistema em estudo.

Outros parâmetros que são fornecidos, de acordo com o vão, são:

Vtower: É a altura vertical do centro do condutor medido na torre em relação ao solo.

Vmid: É a altura vertical do centro do condutor, medido no meio do vão do cabo, em relação ao solo.

Devido à característica da rede de distribuição, que apresenta vãos curtos, considerou-se o Vmid igual ao Vtower. Este último pode ser calculado subtraindo a profundidade de engastamento do poste no solo e a distância de conexão dos cabos na estrutura da altura total do poste.

Para determinar a altura efetiva do poste em relação ao solo, é necessário subtrair da altura total do poste a profundidade de engastamento. A Equação 10, utilizada para calcular essa profundidade, é apresentada a seguir, conforme descrito em (CEMIG, 2016):

$$e = \frac{L}{10} + 0,6 \quad (10)$$

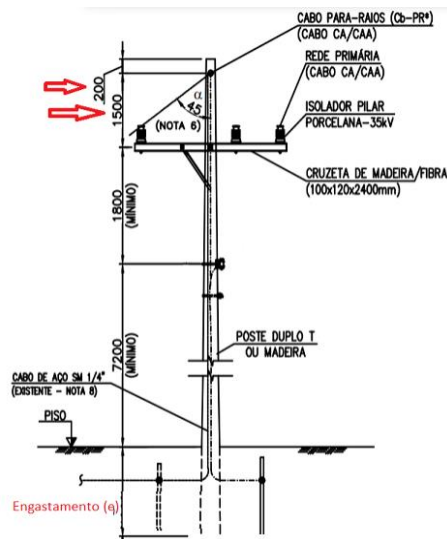
Onde, (e) é a profundidade de engastamento e (L) altura total do poste. Sendo assim, para um poste de 13 m, a profundidade de engastamento é de 1,9 m, resultando em uma altura efetiva de 11,1 m. Da mesma forma, para um poste de 15 m, a profundidade de engastamento será de 2,1 m, conferindo uma altura efetiva de 12,9 m. Para um poste de 22 m, a profundidade de engastamento é de 2,8 m, resultando em uma altura efetiva de 19,2 m.

Conforme ilustrado na Figura 24, no modelo de estrutura típico deste projeto, considera-se uma distância de 1,5 m para os cabos das fases e 0,2 m para o cabo guarda. Assim, para calcular

o Vtower, subtrai-se da altura efetiva a distância de 1,5 m para os cabos de fase e 0,2 m para o cabo guarda.

Dessa forma, para postes de 13 m, o Vtower será de 9,6 m para os cabos de fase e 10,9 m para o cabo guarda. Para postes de 15 m, os valores correspondentes serão 11,4 m e 12,7 m, enquanto para postes de 22 m, o Vtower será de 17,7 m e 19,0 m.

Figura 21 - Modelo estrutura típica com pontos de engastamento e conexão dos condutores.



Fonte: Adaptado de (SNC.IAVALIN,2022) Uso Interno.

Na segunda tela da sub-rotina LCC, apresentada na Figura 25, estão apresentados os dados para o primeiro vão da rede, considerando os condutores fase (1,2 e 3) e cabo guarda (4):

Figura 22 - Segunda Tela sub-rotina ATP.

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.119	0.661	0.53866	1.2	9.6	9.6
2	2	0.119	0.661	0.53866	0.4	9.6	9.6
3	3	0.119	0.661	0.53866	0.8	9.6	9.6
4	4	0.156	0.468	0.53866	0	10.9	10.9

Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2024

Os cabos de guarda são geralmente fabricados em aço, caracterizando-se como elementos ferromagnéticos, o modelo tipo JMarti considera todos os condutores como sendo do mesmo material. No entanto, essa abordagem apresenta a limitação de não levar em conta os efeitos dos materiais ferromagnéticos (CABRAL, 2018). Essa mesma consideração aplica-

se ao parâmetro  $V_{tower}$ , que, devido à mesma limitação, é assumido como constante para todo o vão.

#### 4.2.2 Modelagem dos Isoladores

A rede de distribuição é composta por diversos tipos de isoladores, sendo os mais comuns na topologia estudada os isoladores de pilar em porcelana e os isoladores bastão polimérico. Esses componentes desempenham um papel fundamental na proteção da rede, assegurando que os cabos permaneçam isolados das estruturas adjacentes, como postes, cruzetas e cabos de aterramento, prevenindo falhas na rede em decorrência de surtos de tensão.

Cada isolador é projetado para suportar um nível crítico de tensão, conhecido como *Critical Flashover Overvoltage* (CFO), que representa a tensão máxima que pode ser aplicada sem causar falhas no isolamento. Os fenômenos de *flashover* e *backflashover* são acionados quando a tensão nas extremidades do isolador ultrapassa esse limite crítico. Quando o CFO é excedido, a probabilidade de uma falha no sistema aumenta significativamente, podendo resultar em interrupções no fornecimento de energia e danos aos equipamentos.

O CFO é definido como o pico de tensão, em quilovolts (kV), com uma forma de onda específica de  $1,2 \times 50\mu s$ , que em 50% das aplicações, resulta em uma descarga disruptiva no isolamento, conhecida como V50% (SILVA, 2015). Para o sistema de distribuição de Capanema, obtém-se os valores de CFO diretamente na especificação técnica dos materiais a serem utilizados no projeto, os isoladores seguem as seguintes configurações abaixo:

O valor de CFO de 170 kV, pode ser obtido conforme tabela abaixo:

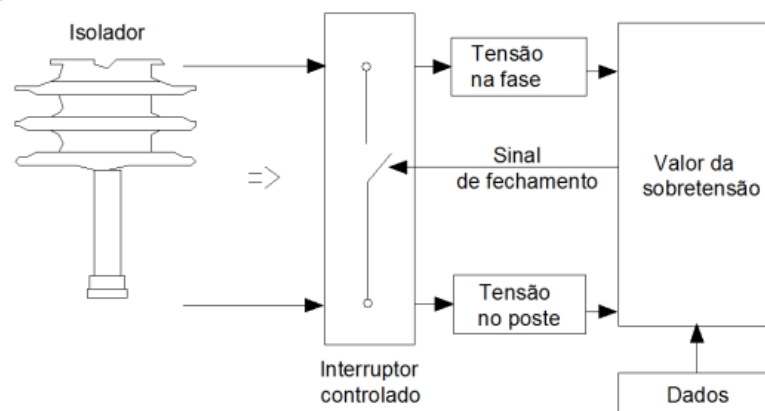
Tabela 2 – Valores conforme níveis de tensão da Rede.

Tensão $U$ kV	Tensão suportável nominal sob impulso atmosférico kV	Afastamento mínimo mm	
		Fase-fase (Valor X)	Fase-terra (Valor Y)
13,8	125	190	170
23,1	150	230	200
34,5	170	270	230

Fonte: CANDEMIL,2018.

Para a modelagem de isoladores nos estudos de simulação, esses dispositivos são tratados como chaves controladas por tensão, conforme ilustrado na Figura 23. Nessa representação, a tensão que aciona a chave é a tensão máxima ou tensão disruptiva do isolador, enquanto um capacitor é colocado em paralelo. Comumente, o valor dessa capacitância é de 60 pF (SILVA 2015). O capacitor em paralelo ajuda a simular o comportamento elétrico real do isolador durante eventos de sobretensão. Ele representa a capacitância que existe devido à geometria do isolador e à sua interação com o ambiente.

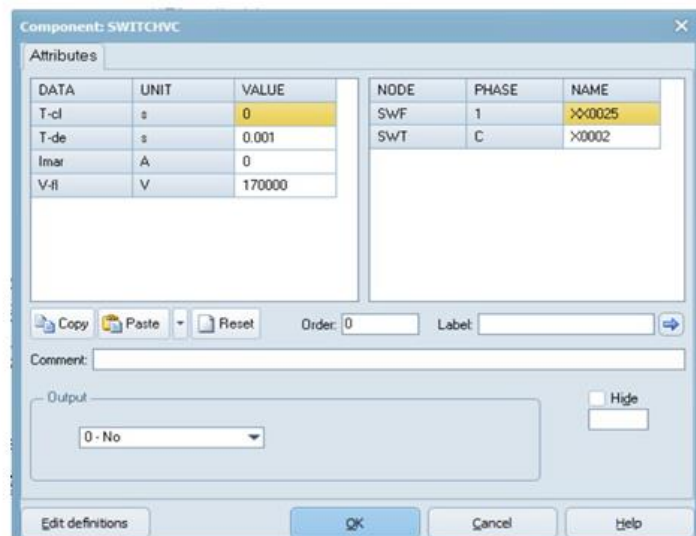
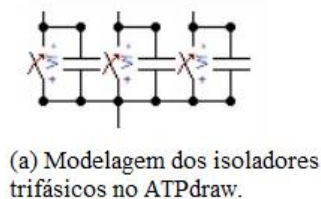
Figura 23 - Representação do Mecanismo do modelo elétrico do Isolador.



Fonte: SILVA, 2015.

A modelagem do isolador é apresentada na Figura 24 (a) e a configuração dos seus parâmetros na Figura 24 (b).

Figura 24 - Representação dos isoladores no ATPdraw.



(b) Parâmetros para modelagem do isolador no ATPdraw.

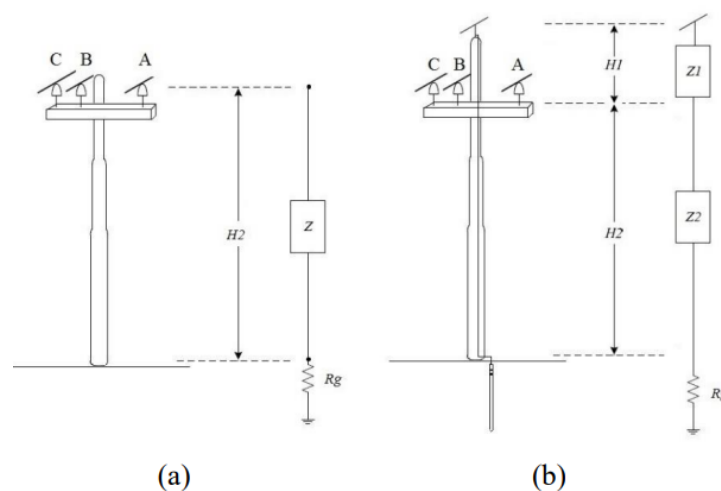
Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2024

### 4.2.3 Modelagem do Poste

Os tipos mais comuns de postes utilizados são os de concreto e de madeira (eucalipto preservado). Os comprimentos observados dentro do projeto Capanema variam de 13 metros, para redes secundárias (baixa tensão) até 22 metros utilizados nos casos especiais de travessias de vias por onde passam os caminhões autônomos. Ainda no mesmo projeto, as resistências mecânicas dos postes de concreto mais utilizados são de 600, 1000, 1500 e 2000 daN, já os postes de madeira em função da resistência mecânica são classificados em leves (L – 300daN), médios (M – 600 daN) e pesados (P – 1000daN).

Para a análise de descargas atmosféricas, os postes são modelados por impedâncias que variam de acordo com o comprimento de cada segmento de poste, abrangendo desde o cabo guarda até as fases e, em seguida, das fases até a base do poste (CABRAL, 2013). Essas impedâncias são conectadas em série com a impedância de aterramento (MARTINEZ; CASTRO, 2005a; 2005b). A modelagem dos postes é realizada utilizando impedâncias de parâmetros distribuídos, conforme o modelo LINEZT\_1 disponível no ATPDraw (CABRAL, 2018). As impedâncias apresentadas na Figura 25 são calculadas por meio da equação (11) (CANDEMIL,2018). A altura  $H1$  indica a distância entre as fases e a base do poste, aplicando-se tanto para o modelo com blindagem quanto para o sem blindagem, enquanto  $H1$  representa a distância do cabo guarda até as fases. Em sistemas de distribuição, a impedância da cruzeta é considerada desprezível.

Figura 25 - Representação do Modelo de Postes. Estrutura (a) sem Blindagem, (b) com blindagem.



Fonte: Adaptado de (CABRAL 2018).

$$Z_{\text{poste}} = 60 \ln \left( 2 \cdot \sqrt{2} \frac{H_c}{r_c} \right) - 60 \quad (11)$$

Onde  $Z_{\text{Poste}}$  é a impedância do poste ( $\Omega$ ),  $H_c$  é a altura média dos postes (m) e  $r_c$  é o raio da base do cilindro do poste (m).

É importante ressaltar que as medidas utilizadas neste trabalho são extraídas das especificações técnicas e dos projetos. No entanto, deve-se considerar que, em campo, os postes estão engastados no solo. A altura média do poste ( $H_c$ ) em relação ao solo, foi apresentado no tópico 3.6.1 e é calculado conforme a Equação 10, sendo obtida para os postes de 13m, 15 m e 22 m os valores de altura efetiva 11,1 m, 12,9 m e 19,2 m, respectivamente.

Após determinar a altura efetiva do poste, é necessário calcular o raio médio da base. Para postes de concreto circular ou de madeira, essa medida pode ser obtida diretamente. No entanto, para postes Duplo "T", o raio da base ( $r_c$ ) será calculado utilizando a área equivalente, que corresponde ao produto das Faces da base A e B do poste.

É apresentado na Tabela 3, as dimensões das faces de cada tipo de poste duplo "T", conforme fabricante, instalado na rede de distribuição em estudo, destacando os valores das dimensões da base de cada um.

Tabela 3: Dimensões do poste de concreto duplo T.

COMP. NOM. (m)	TIPO	CARGA NOMINAL (daN)	DIMENSÕES (mm)				MASSA APROX. (kg)
			FACE A		FACE B		
			TOPO	BASE	TOPO	BASE	
13,00	B	300					1.527
		400	140	504	110	370	1.542
		600					1.557
	B-1,0	800	168	532	130	390	1.752
	B-1,5	1.000	182	546	140	400	1.999
	B-3,0	1.200	224	588	170	430	2.407
	B-4,5	2.000	266	630	200	460	3.085
	B-6,0	3.000	308	672	230	490	3.553
15,00	B	300					2.046
		400	140	560	110	410	2.071
		600					2.084
	B-1,0	800	168	588	130	430	2.303
	B-1,5	1.000	182	602	140	440	2.578
	B-3,0	1.200	224	644	170	470	3.037
	B-4,5	1.500					3.112
	B-1,0	800	168	784	130	570	5.177
22,00	B-1,5	1.000	182	798	140	580	5.471
	B-3,0	1.200	224	840	170	610	5.820
		1.500					5.820

Fonte: (ROMAGNOLE,2021).

Através da fórmula da base do poste de duplo “T” é possível achar o raio da base do poste. Igualando as áreas da base de ambos os postes conforme Equação 12, tem-se:

$$\pi r_c^2 = AB \quad (12)$$

Onde:

$r_c$  é o raio da base dos postes (m).

A é o comprimento da face A do poste (Tabela 3):

B é o comprimento da face B do poste (Tabela 3).

Iniciando pelas dimensões da base, encontra-se então um valor de  $r_c = 0,26$  m para A=0,54 cm e B=0,40cm, para o poste de 13m – 1000daN;.

Aplicando a equação 12 para os demais comprimentos tem-se:

Postes de 13m-2000daN,  $r_c = 0,30$ ;

Poste de 15m-1000daN,  $r_c = 0,29$ ;

Poste de 22m-1500daN,  $r_c = 0,40$ ;

Agora utilizando as dimensões do topo, são encontrados os seguintes valores de  $r_c$  :

Postes de 13m-1000daN,  $r_c = 0,30$ ;

Postes de 13m-2000daN,  $r_c = 0,30$ ;

Poste de 15m-1000daN,  $r_c = 0,29$ ;

Poste de 22m-1500daN,  $r_c = 0,40$ .

Uma vez calculados os valores de altura (Hc) e do raio da base ( $r_c$ ), obtêm-se os valores de impedância para cada poste do sistema de distribuição, conforme apresentado na Tabela 4. Sendo Hc1 a altura para o cálculo de Z1 e Hc2 a altura efetiva para o cálculo de Z2, conforme Figura 29.

Tabela 4 - Parâmetros que caracterizam o modelo dos postes.

Altura (m)	daN	Hc1 (m)	Hc2 (m)	$r_c$ – Topo (m)	$r_c$ -Base (m)	Z1 ( $\Omega$ )	Z2 ( $\Omega$ )
13	1000	1,5	9,6	0,15	0,26	140,5383	218,9134
13	2000	1,5	9,6	0,23	0,3	114,8917	210,3274
15	1000	1,5	11,4	0,15	0,29	140,5383	222,6725
22	1500	1,5	17,7	0,19	0,4	126,355	229,7746

Fonte: De autoria própria, 2024.

Para a modelagem da resistência de aterramento  $R_g$ , apresentada em série com as impedâncias  $Z_1$  e  $Z_2$ , pode-se utilizar a formulação proposta por Dwight (1936), que se aplica a sistemas com uma única haste. Conforme apresentada na equação 13.

Essa abordagem é particularmente adequada para análise, uma vez que todos os postes do projeto da Rede de Distribuição de Capanema são equipados com um sistema de aterramento simples, composto por uma única haste. As exceções ocorrem apenas quando os postes estão associados a equipamentos adicionais, como transformadores, chaves ou para-raios, que exigem sistemas de aterramento com três ou mais hastes. Esses casos são abordados em detalhes posteriormente.

$$R_g = \frac{\rho_{solo}}{2\pi l} \left[ \ln \frac{4l}{a} - 1 \right] \quad (13)$$

Sendo assim,  $R_g$  é a resistência de aterramento,  $\rho_{solo}$  é a resistividade do solo ( $\Omega.m$ ),  $l$  é o comprimento do eletrodo (m) e  $a$  é o raio do eletrodo (m).

Considerando uma haste de aterramento cadweld, de dimensões  $\varnothing 3/4" \times 3000mm$  (ref.: tel 5823 - fabricante: termotécnica ou equivalente), e a resistividade média do solo de  $1000 \Omega.m$  (VISACRO FILHO, 2002), o valor calculado para a resistência de aterramento é  $325,57$  ohms:

$$R_g = \frac{\rho_{solo}}{2\pi l} \left[ \ln \frac{4l}{a} - 1 \right] = 325,57 \Omega \quad (14)$$

#### 4.2.4 Modelagem do Para-Raios

Os supressores de surto, ou pára-raios de distribuição, são utilizados para proteger equipamentos essenciais nas redes de distribuição elétrica. A instalação desses dispositivos é realizada nos lados primário e secundário dos transformadores, em equipamentos, em pontos de transição da rede e em pontos finais (DE CONTI, 2006). Eles atuam como altas impedâncias em condições normais e baixas impedâncias durante impulsos de tensão, conduzindo correntes de falha para a terra e limitando sobretensões a níveis seguros. O resistor não linear de óxido metálico, componente crucial dos para-raios, apresenta uma característica de tensão versus corrente que lhe confere a capacidade de atuar como uma baixa resistência durante sobretensões, enquanto em condições normais de operação do sistema se comporta como uma alta resistência (MARROQUES, 2015).

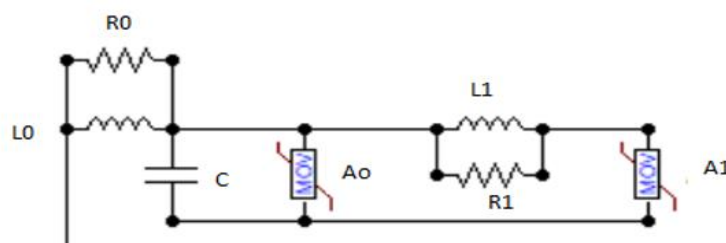
O uso de pára-raios de distribuição melhora significativamente o comportamento da rede em relação a sobretensões, resultando em menores índices de desligamentos, especialmente em redes urbanas com uma concentração elevada de transformadores protegidos. Além de proteger equipamentos, esses dispositivos também contribuem para a redução de desligamentos em redes que apresentam baixo nível de isolamento (COELHO, 2010).

Na rede de distribuição da Mina de Capanema, são empregados pára-raios do fabricante Siemens, modelo 3EK73604CH4, destinados a média tensão. Esses dispositivos são equipados com varistores de óxido de zinco (ZnO), que apresentam uma tensão nominal de 36 kV e corrente nominal de 10kA, sendo poliméricos e não-lineares com valor de MCOV ou  $U_c$  correspondente a 28,8 kV.

A proteção contra descargas diretas, proporcionada pelo uso de para-raios, enfrenta o desafio dos elevados níveis de corrente gerados durante esses eventos. De acordo com Coelho (2010), os para-raios são capazes de proteger eficazmente a rede contra descargas diretas, desde que instalados em intervalos apropriados e com as especificações corretas. Essa consideração é essencial para maximizar a eficácia dos para-raios e minimizar os riscos associados a descargas elétricas, garantindo assim a continuidade das operações na mina.

Existem diversos circuitos que podem ser utilizados para representar este equipamento, os quais tentam caracterizar de forma aceitável as características não lineares  $V - I$  do equipamento. O modelo de para-raios recomendado pelo grupo de estudos do IEEE (1992) é apresentado na Figura 30.

Figura 26 - Modelo Para-Raios para simulação.



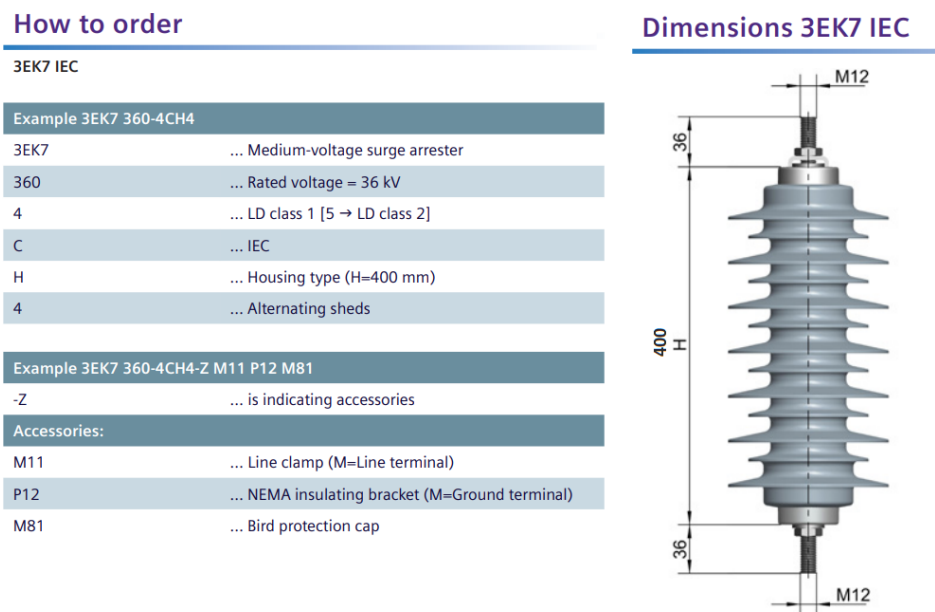
Fonte: Adaptada de (IEEE, 1992).

Neste modelo, a característica não linear  $V \times I$  do para-raios é representada pelas seções A0 e A1, separadas pela indutância L1 e a resistência R1 do modelo (IEEE,1992). Quando um surto padrão acontece, o filtro apresenta uma impedância específica que resulta em uma distribuição de correntes pelos ramos resistivos. Por outro lado, quando ocorre um surto de

frente de onda rápida, a impedância do filtro aumenta, provocando uma distribuição de correntes distinta. Isso faz com que uma fração maior da corrente passe pelo ramo A0, que possui maior resistência, resultando em uma tensão residual mais elevada no para-raios (MARROQUES, 2015).

A indutância ( $L0$ ) no modelo representa a indutância associada aos campos magnéticos nas vizinhanças imediatas do para-raios. O resistor ( $R0$ ) é utilizado para estabilizar a integração numérica durante a implementação do modelo em um software de computação digital. A capacitância ( $C$ ) refere-se à capacitância entre os terminais do para-raios. O IEEE propõe as seguintes fórmulas para determinar os parâmetros do modelo, com base na altura estimada do para-raios e no número de colunas paralelas de discos de óxido de metal. Onde “ $d$ ” é a altura estimada do pára-raios em metros e “ $n$ ” é o número de colunas paralelas. As dimensões são obtidas tendo como referência o catálogo do fornecedor Figura 31.

Figura 27 - Dimensões do para-raios 36 kV Polimérico da SIEMES.



Fonte: Catálogo de para-raios modelo 3EK7. USA: SIEMENS,2021 - Adaptada.

Assim, com  $n = 1$  e  $d = H + 0,36 + 0,36 = 0,472$  m, sendo abaixo os valores dos componentes calculados para o para-raios proposto.

$$L0 = 0.2 d/n (\mu H) = 0,2 * 0,472 / 1 = 0,0944 (\mu H) \quad (11)$$

$$R0 = 100 \text{ d/n } (\Omega) = 0,472 * 100 / 1 = 47,20 (\Omega) \quad (12)$$

$$C = 100 \text{ n/d } (\text{pF}) = 100 * 1 / 0,472 = 211,86 (\text{pF}) \quad (13)$$

$$L1 = 15 \text{ d/n } (\mu\text{H}) = 15 * 0,472 / 1 = 7,08 (\mu\text{H}) \quad (14)$$

$$R1 = 65 \text{ d/n } (\Omega) = 65 * 0,472 / 1 = 32,37 (\Omega) \quad (15)$$

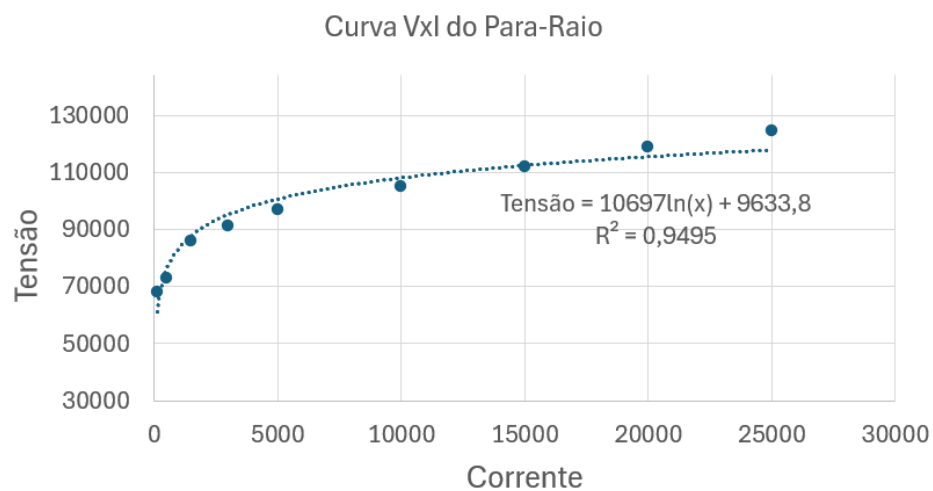
Além disso, para representação das características não-lineares do MOV A0 e A1, o para-raios será parametrizado com os valores de tensão e corrente apresentados na Tabela 5 e representados na curva V x I da Figura 28.

Tabela 5 – Curva V x I do para-raio 36 kV.

Tensão (V)	Corrente (A)
67919	125
72799	500
86048	1500
91408	3000
96766	5000
104960	10000
111900	15000
118830	20000
124820	25000

Fonte: MARROQUES,2015.

Figura 28 - Curva característica V x I típica do para-raios de óxido de zinco de 36 kV.



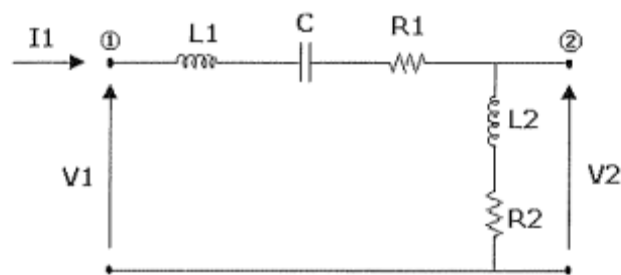
Fonte: Adaptado de (MARROQUES,2015).

#### 4.2.5 Modelagem do transformador

Para o trecho da rede de distribuição analisado, os transformadores trifásicos utilizados são do tipo triângulo/estrela com relação de transformação de 34,5 kV para 480, 380 ou 220 v, aterrados e projetados para serem instalados diretamente nos postes. Foram identificados transformadores de potência 15, 45 e 112,5 kVA.

Neste trabalho, adotou-se um modelo de transformador para altas frequências, baseado em um circuito RLC equivalente por fase apresentado na Figura 29. Este modelo é especialmente adequado para transformadores trifásicos, onde se considera que as tensões nos terminais possuem amplitudes semelhantes, uma suposição justificada pelo acoplamento entre condutores e pela atuação de para-raios.

Figura 29 - Circuito RLC equivalente por fase.



Fonte: SILVA,2015.

O modelo é válido exclusivamente em condições de operação em vazio e se mostra eficaz na simulação da transferência de surtos atmosféricos (Guimarães, 2003). Destacam-se duas características principais:

- **Comportamento Capacitivo em Baixas Frequências:** O modelo apresenta um comportamento capacitivo que varia com a frequência, influenciado pelo efeito pelicular nos enrolamentos e pelas perdas decorrentes de correntes parasitas. Além disso, considera ressonâncias série e paralelo que ocorrem em médias e altas frequências, resultantes das capacitâncias parasitas entre os enrolamentos e entre estes e a terra;
- **Comportamento Indutivo em Altas Frequências:** Para altas frequências, o transformador exibe um comportamento predominantemente indutivo,

fundamental para a análise da dinâmica de transferência de surtos entre os circuitos primário e secundário.

A Tabela 6 apresenta os valores típicos das variáveis envolvidas na modelagem do transformador em situações de surtos de alta frequência. É importante destacar o valor correspondente aos transformadores de 15, 45 e 112,4 kVA, uma vez que a rede em estudo utiliza transformadores dessa capacidade.

Tabela 6 – Parâmetros do circuito equivalente em alta frequência para os transformadores.

Potência (kVA)	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	L1 ( $\mu$ H)	L2 ( $\mu$ H)	C (pF)
15	70	90	246	54	320
30	83	42	157	29	344
45	80	5,5	33	17	400
112,5	19,6	3	41,55	0,85	596

Fonte: GUIMARÃES, 2003.

#### 4.2.6 Modelagem do Aterramento

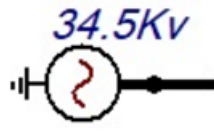
Ao ocorrer uma descarga no cabo de blindagem, como já discutido, uma onda de corrente se propaga em ambas as direções até atingir uma estrutura aterrada. Nesse processo, uma parte da corrente é direcionada para o solo, enquanto uma fração menor continua pelo cabo de blindagem. Quando o sistema é dimensionado de forma adequada, observa-se uma redução significativa da amplitude da sobretensão no topo da estrutura, sendo que essa diminuição é mais acentuada quanto menor for a impedância de aterramento. Esses critérios garantem uma elevação da amplitude da onda refletida no aterramento, resultando em uma diminuição da tensão no topo da estrutura e nos isoladores (CABRAL,2018).

O projeto da rede de distribuição considera que a resistência de aterramento não deve ultrapassar o valor máximo de 80 ohms, conforme critérios da norma ND-2.2 da CEMIG. Esse valor é considerado para malhas de terra com 3 (três) até 21 (vinte e uma) hastes e será adotado também para os aterramentos simples. Dessa forma, o comportamento da malha de aterramento foi considerado como uma simples resistência, com valor de Resistência de Aterramento igual a 80  $\Omega$ . Além disso, foi considerado para a modelagem do comportamento do cabo de descida como um simples indutor com valor de 10 uH (Guimarães,2003).

#### 4.2.7 Subestação de 34,5 kV (SE)

Para o objetivo do trabalho a representação da subestação é unicamente para representar a tensão nominal da rede em condições normais e o tipo de modelagem escolhido não interfere nas análises e nos resultados obtidos. Portanto a modelagem será um uma fonte infinita de tensão trifásica com nível de tensão de 34,5 kV conforme apresentado na Figura 30. Será adotada o ângulo de fase nulo para a fase A, à qual será a referência.

Figura 30 - Fonte de Tensão de 34,5kV.



Fonte: ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM, 2024

## 5 RESULTADOS

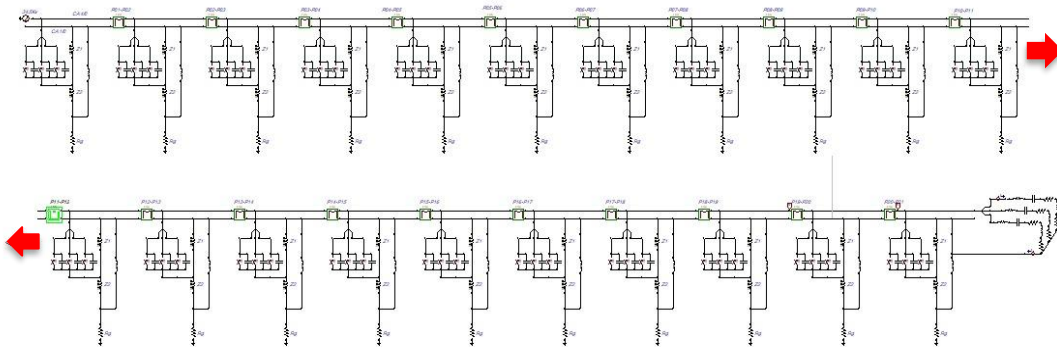
Após a apresentação dos processos fundamentais de interação entre descargas atmosféricas e linhas de distribuição, bem como a modelagem dos principais componentes do sistema de distribuição estudado para cálculos computacionais, este capítulo aborda as análises realizadas por meio das simulações no software ATPdraw, da rede de distribuição proposta. Foram simuladas descargas diretas no cabo guarda e avaliados os efeitos no circuito primário, considerando as sobretensões resultantes nos isoladores, para-raios, sistemas de aterramento e equipamentos.

Para a realização das simulações, foram considerados dois cenários: inicialmente, a rede aérea sem para-raios e, em seguida, a rede aérea com a instalação dos para-raios, conforme previsto no projeto.

### 5.1 Simulação na Rede de Distribuição Sem Para-raios

A rede de distribuição modelada no ATPdraw, sem para-raios, é apresentada na Figura 31. A seta vermelha indica a continuidade da rede, que precisou ser dividida devido ao seu tamanho. A configuração da rede é composta por 21 estruturas e 20 vãos, modelados de acordo com os dados apresentados na Tabela 1 (Dados de cada vão da Rede).

Figura 31 - Rede de distribuição 34,5 kV simulada sem para-raios. -10 kA.



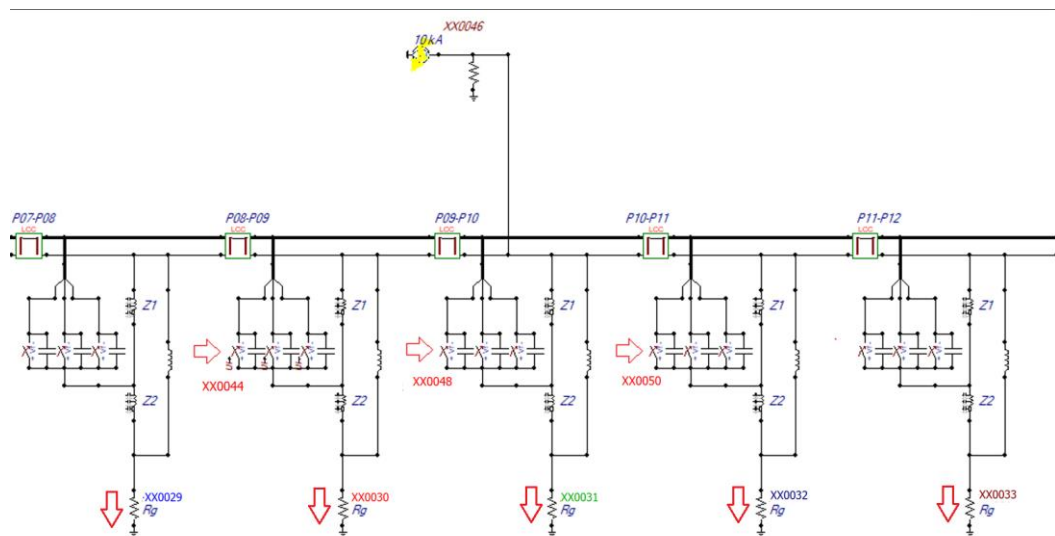
Fonte: De autoria própria.

Foram simuladas descargas de 10 kA, 30 kA e 45 kA, atingindo diretamente o cabo guarda em um ponto estratégico, correspondendo aproximadamente ao ponto médio da quantidade de postes, especificamente no poste de número N° 10. As medições das sobretensões foram realizadas em diversos pontos: no poste próximo ao ponto de impacto da descarga, nos postes subsequentes, além de avaliar a sobretensão e a corrente sobre os isoladores, bem como a corrente dissipada no sistema de aterramento de cada estrutura.

### 5.1.1 Descarga de Retorno de 10 kA

A Figura 32 apresenta um detalhamento dos componentes da rede modelados, bem como os principais pontos de coleta de dados de tensão e corrente analisados. As medições foram realizadas em locais estratégicos da rede, conforme descrito a seguir. A avaliação dessas medições é crucial para compreender o comportamento do sistema sob condições de estresse.

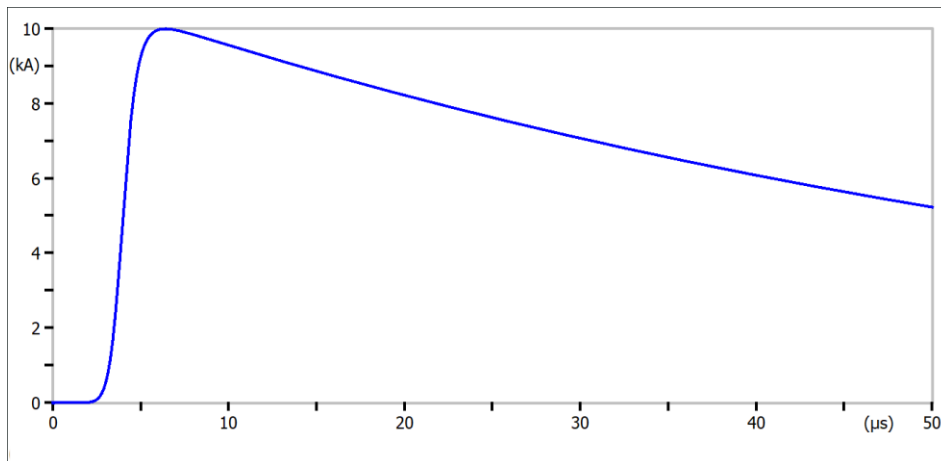
Figura 32 - Detalhamento dos componentes essenciais a serem analisados.



Fonte: De autoria própria.

Inicialmente, foi simulada uma descarga de 10 kA na estrutura de N° P10 da rede de distribuição, sendo a forma de onda da descarga apresentado na Figura 33, abaixo:

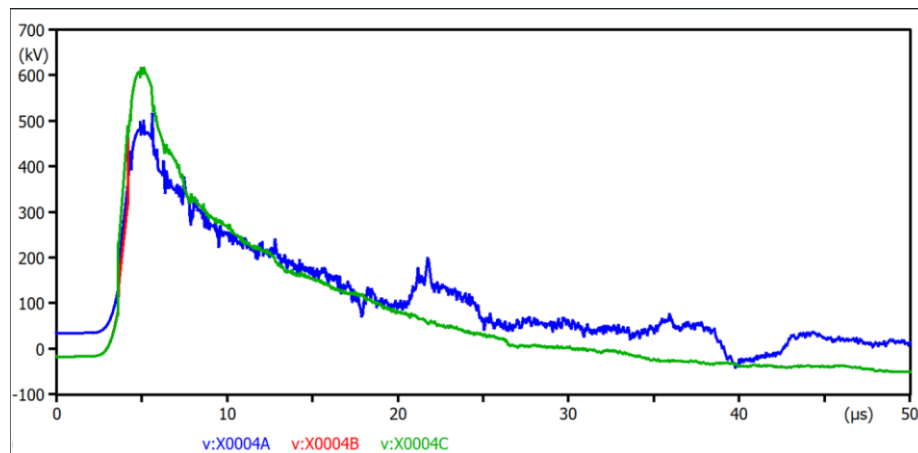
Figura 33 - Forma de onda da descarga de 10 kA aplicada.



Fonte: De autoria própria.

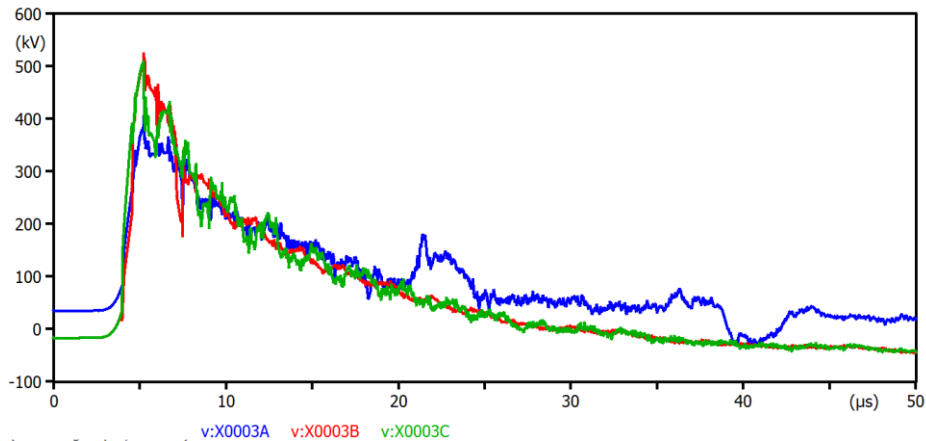
As tensões nas três fases dos postes N° P09, P10 e P11 foram medidas, e as sobretensões correspondentes estão ilustradas nas Figuras 34, 35 e 36, respectivamente. Pode-se observar a natureza impulsiva das sobretensões, assim como a onda de corrente. Como esperado, as sobretensões no poste no 10 apresentam maiores amplitudes em relação às sobretensões estabelecidas nos postes vizinhos.

Figura 34 - Sobretensão nas fases A, B, C nos isoladores do ponto de descarga.



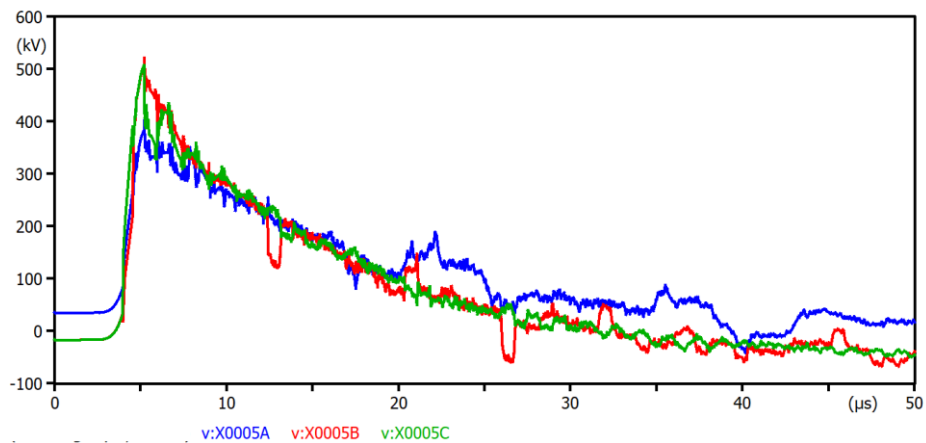
Fonte: De autoria própria.

Figura 35 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P09.



Fonte: De autoria própria.

Figura 36 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P11.



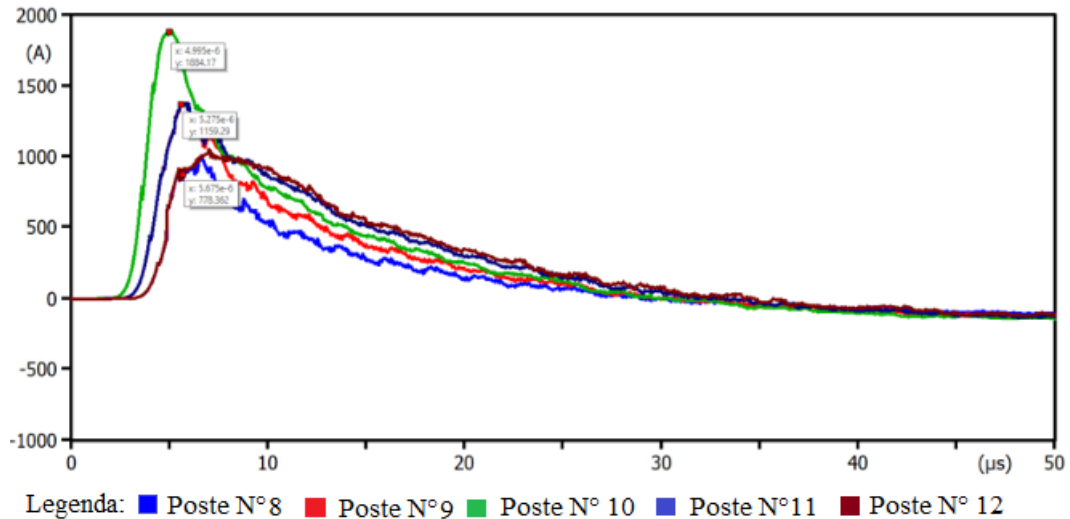
Fonte: De autoria própria.

Ao avaliar as medições realizadas, observa-se que a incidência de uma descarga atmosférica de 10 kA no cabo guarda da rede de distribuição resulta em sobretensões nas fases. O maior valor de sobretensão, aproximadamente 600 kV, é registrado no ponto de impacto da descarga, denominado P10 (Figura 34), e essa sobretensão é atenuada igualmente, para ambos os lados, atingindo o valor de aproximadamente 500 kV, como evidenciado nas medições realizadas nos postes adjacentes P09 e P11, Figura 35 e Figura 36.

Além das sobretensões nas fases, também foram registradas as correntes que fluem através do aterramento dos postes. As curvas resultantes das medições em cada poste estão apresentadas na Figura 37. Nota-se a divisão das correntes entre as estruturas próximas ao ponto de impacto da descarga, sendo que a maior das ondas de corrente ocorre no aterramento da

estrutura central e as demais ondas apresentam amplitudes menores no aterramento das torres vizinhas.

Figura 37 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg.

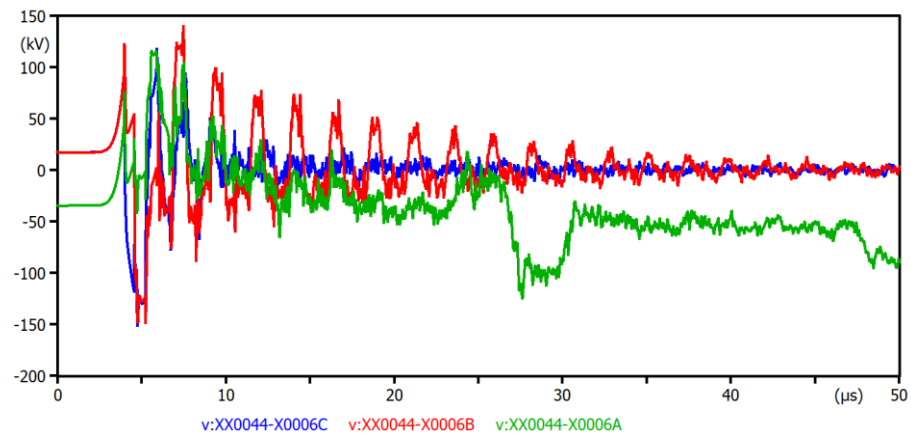


Fonte: De autoria própria.

Observa-se que o fenômeno das atenuações, também se reflete nas correntes que fluem pelo sistema de aterramento simples (Rg) dos postes, onde a intensidade é máxima no aterramento da estrutura P10, conforme Figura 37 e diminui proporcionalmente em direção aos pontos adjacentes. Em cada ponto de aterramento, observa-se uma atenuação da corrente, que flui para o solo através dos cabos de descida, uma vez que todos os postes deste projeto estão devidamente aterrados. Ao somar as correntes atenuadas em cada aterramento, retorna-se ao valor da corrente inicial.

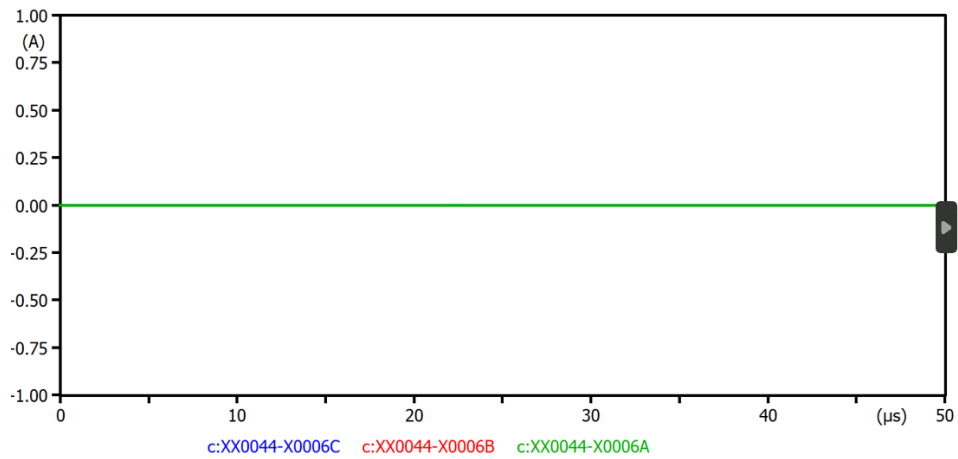
Além das sobretensões das fases e das correntes no aterramento, também foi verificada a tensão sobre os isoladores da estrutura da rede, bem como a corrente que ultrapassa os componentes sob estresse. Os respectivos postes e os pontos de medição dos isoladores avaliados são os seguintes: nº 09 (Ponto XX0044), nº 10 (Ponto XX0048) e nº 11 (Ponto XX0050). Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Figura 38 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P9.



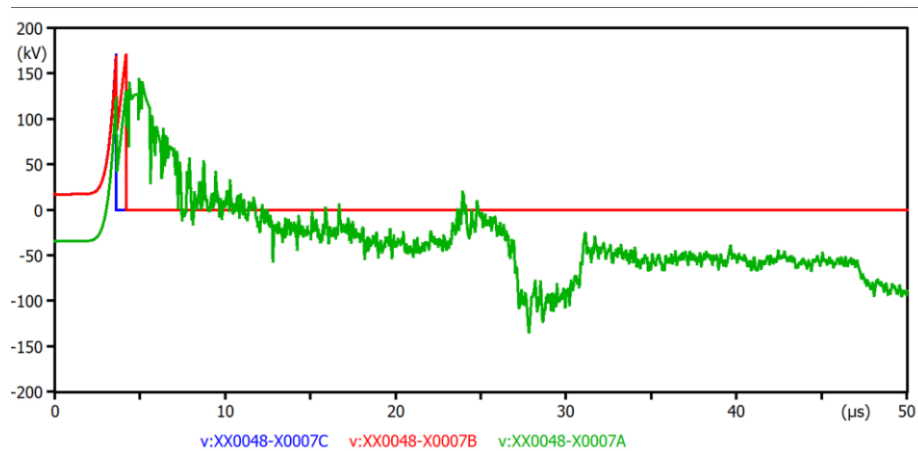
Fonte: De autoria própria.

Figura 39 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P9.



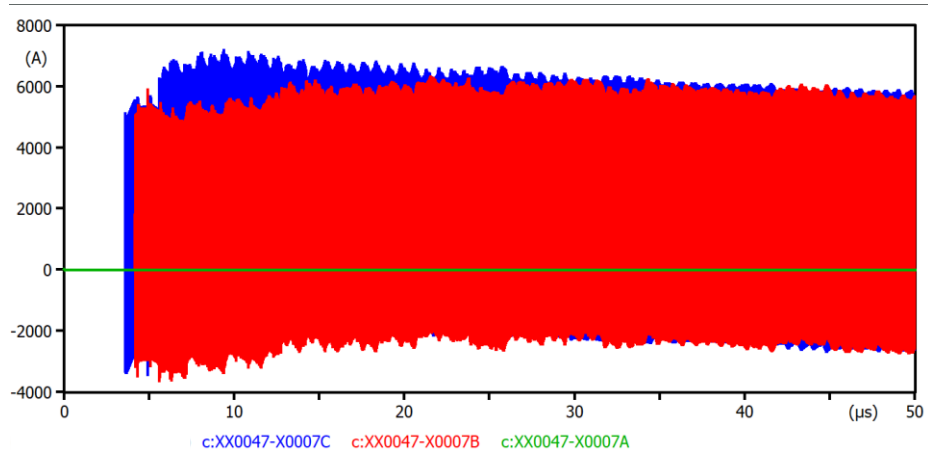
Fonte: De autoria própria.

Figura 40 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



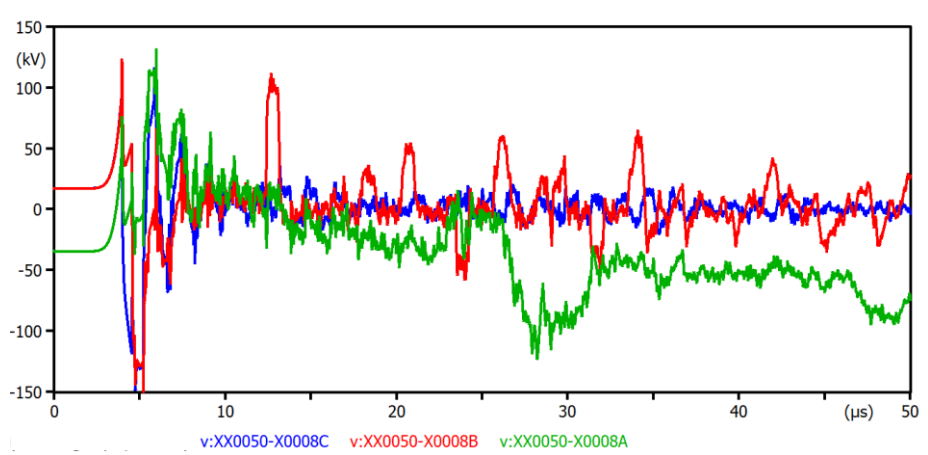
Fonte: De autoria própria.

Figura 41 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



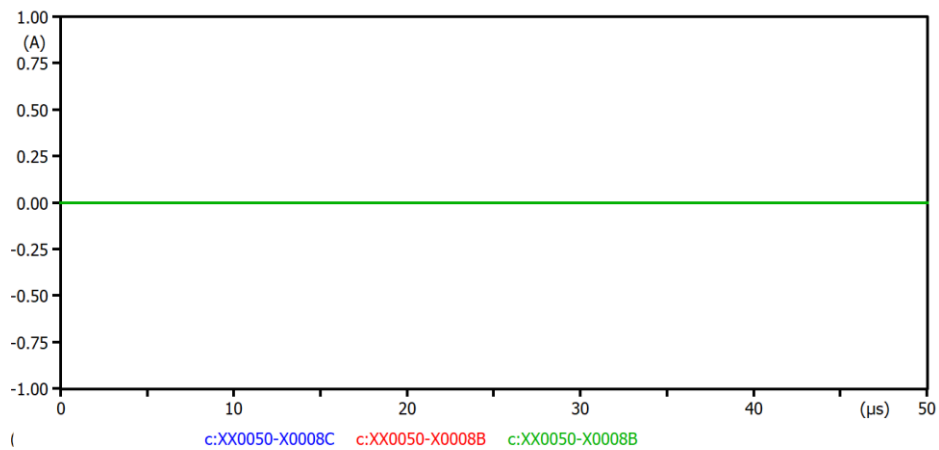
Fonte: De autoria própria.

Figura 42 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



Fonte: De autoria própria.

Figura 43 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



Fonte: De autoria própria.

Ao avaliar as tensões nos isoladores, observa-se que tanto os isoladores das estruturas P09 quanto P11 apresentam uma diferença de potencial, como pode ser verificado na Figura 38 e 42. Isso indica que a tensão no topo e na base dos isoladores é distinta. Analisando esses isoladores modelados como chaves operadas por tensão, conclui-se que as chaves permanecem abertas. Para confirmar essa observação, foram analisados os valores de corrente em ambos os postes, constatando que, para todas as fases, a corrente que flui pelos isoladores é zero, corroborando a afirmação anterior, como pode ser observado na Figura 39 e 43.

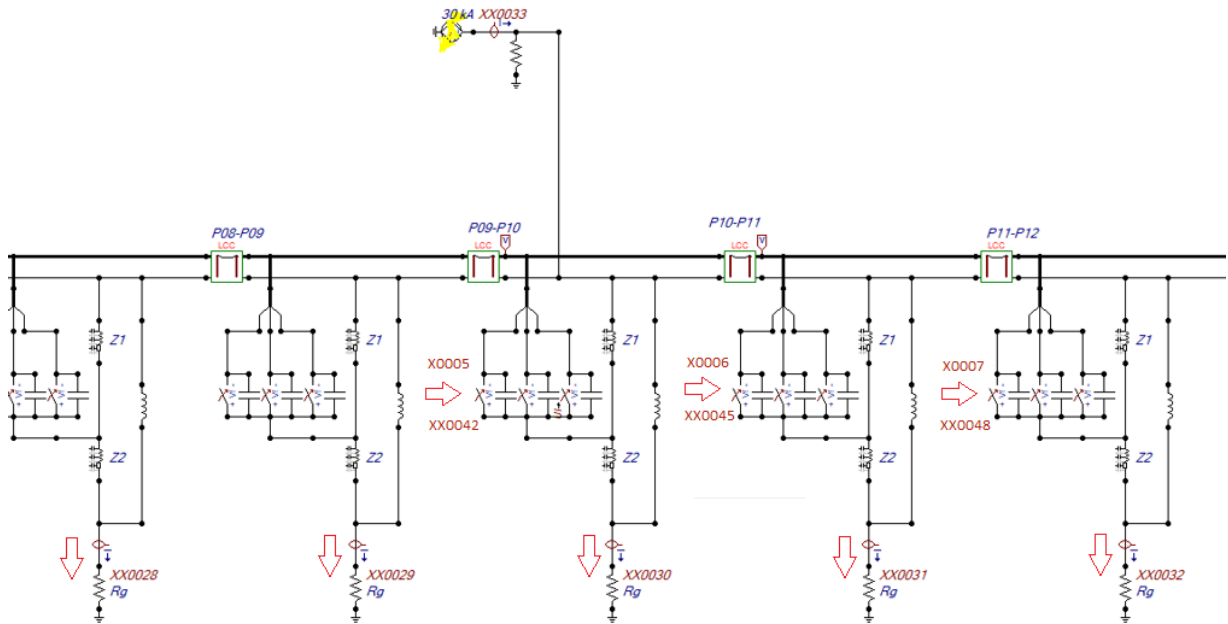
No entanto, ao examinar os resultados do isolador P10, que corresponde ao ponto de incidência da descarga, nota-se que as tensões nos isoladores das fases B e C atingem 170 kV (NBI do isolador) e, em seguida, se zeram, conforme Figura 40. Isso indica que o potencial do topo e da base do isolador são iguais, e a diferença de potencial é zero. Assim, ao modelar o isolador como uma chave operada por tensão, pode-se interpretar que, a sobretensão no isolador ao atingir a tensão de disparo de 170 kV, fecha a chave, representando à ruptura do isolamento do componente. Essa interpretação é confirmada pela avaliação da corrente que flui pelo isolador apresentada na Figura 41, que, diferentemente do caso anterior, agora apresenta um fluxo de corrente, corroborando a análise.

Em síntese, a incidência de uma descarga atmosférica de 10 kA diretamente no cabo guarda da rede, na ausência de para-raios, é suficiente para danificar os componentes do poste próximo ao ponto de descarga, mas os danos se apresentam de uma forma reduzida, uma vez que não afeta os postes adjacentes, afetando o funcionamento da rede de distribuição. Nesse contexto, a carga, que consiste em um transformador aéreo de 40 kVA e a bitagem I/II, pode ter seu fornecimento de energia interrompido devido à atuação das proteções da rede ou até mesmo por danos aos componentes.

### **5.1.2 Descarga de Retorno de 30 kA**

Após a análise de uma descarga de 10 kA, foi realizada uma nova simulação utilizando a mesma rede de distribuição modelada anteriormente. Nesta etapa, a simulação considera uma descarga de 30 kA incidindo sobre a estrutura do poste nº P10. A Figura 44 apresenta o detalhamento da rede modelada, conforme utilizado no item anterior.

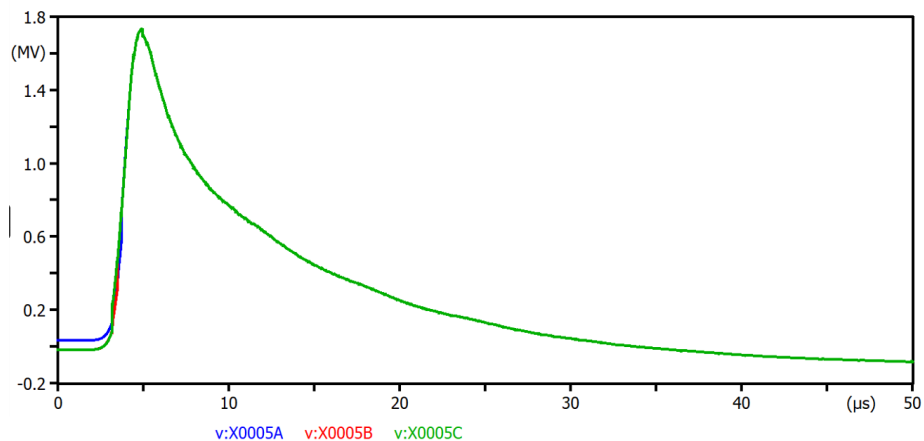
Figura 44 - Detalhamento dos componentes essenciais a serem analisados- 30kA.



Fonte: De autoria própria.

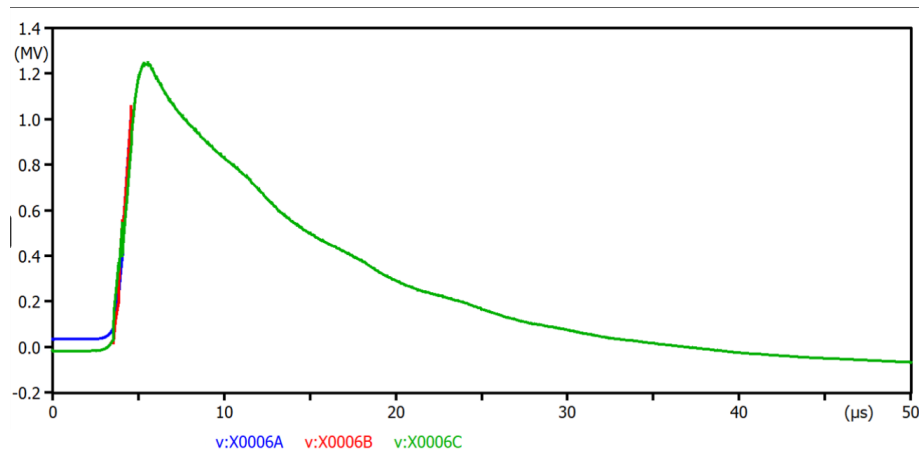
Dando continuidade às simulações anteriores, agora foi realizada uma análise da corrente de descarga de 30 kA, com foco na tensão nas três fases dos postes nº 10, nº 11 e nº 12. Os resultados das formas de onda das sobretensões correspondentes estão ilustrados nas Figuras 45, 46 e 47, respectivamente.

Figura 45 - Sobretensão nas fases A, B, C nos isoladores do ponto de descarga P10.



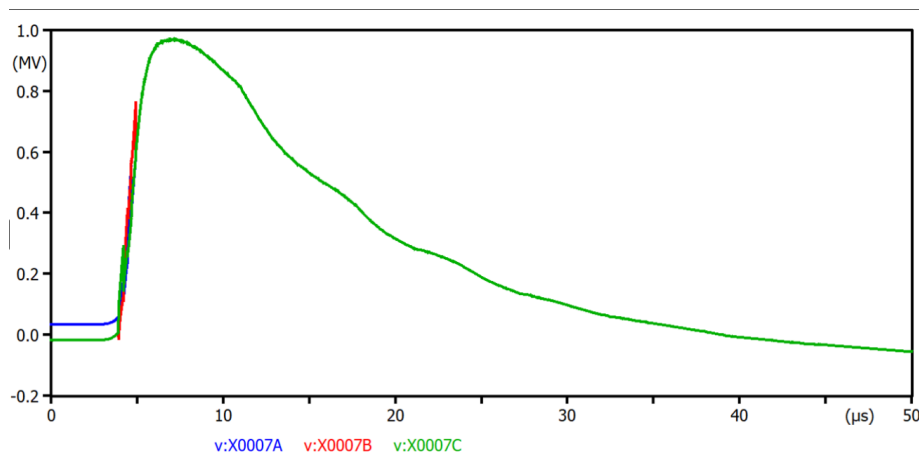
Fonte: De autoria própria.

Figura 46 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P11.



Fonte: De autoria própria.

Figura 47 - Sobretensão nas fases A, B, C estrutura N°P12.



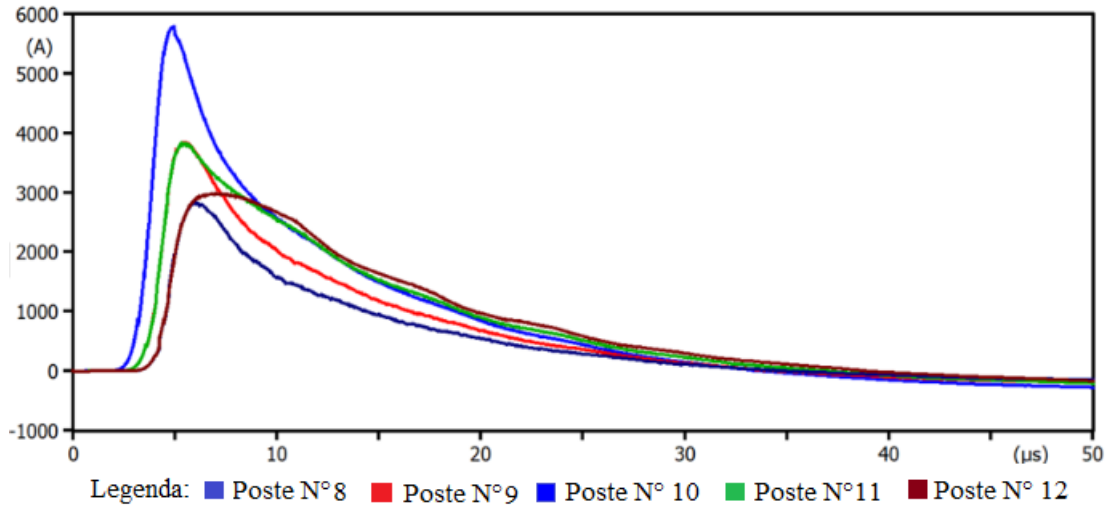
Fonte: De autoria própria.

De maneira semelhante à simulação anterior, observou-se que uma descarga direta de 30 kA no cabo guarda gera elevações de tensão nos condutores de fase, resultando em sobretensões que aumentam o potencial da rede. Embora a intensidade da descarga tenha triplicado, os níveis de sobretensão registrados superaram ligeiramente o dobro dos valores observados anteriormente com uma descarga de 10 kA, alcançando valores próximos a 1 MV nos postes adjacentes e ultrapassando até 1,3 MV no ponto de descarga.

A propagação da onda de sobretensão pela rede é acompanhada de atenuação, devido à dispersão da corrente de descarga para o solo em cada estrutura aterrada. Essa atenuação é evidenciada na Figura 48, que apresenta as curvas de corrente obtidas do sistema de aterramento (Rg). A implementação de múltiplos pontos de aterramento permite que a corrente de descarga

seja distribuída por uma área maior e por um número elevado de estruturas, evitando a sobrecarga em uma única estrutura. Essa abordagem não apenas minimiza o risco de danos aos equipamentos, mas também aprimora a segurança geral da infraestrutura elétrica.

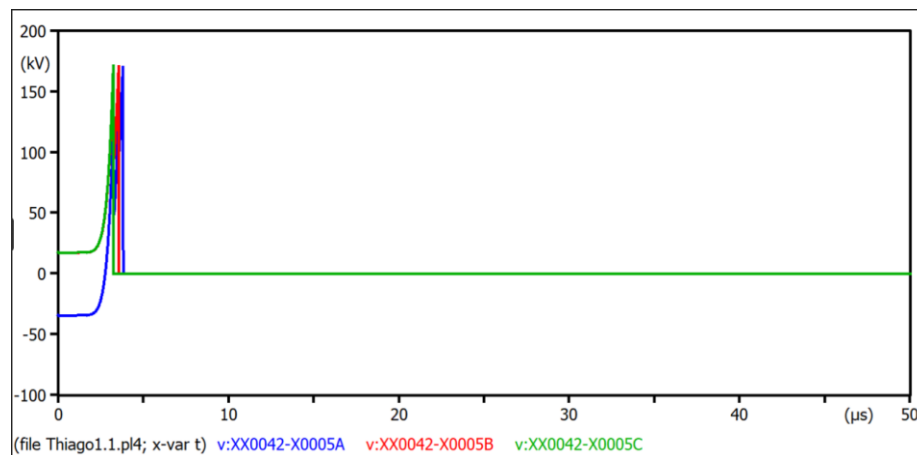
Figura 48 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg.



Fonte: De autoria própria.

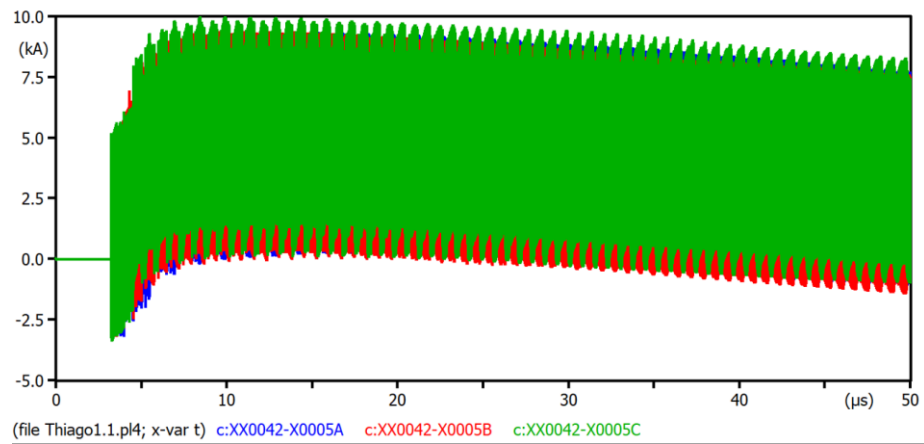
Em seguida, foram medidas as tensões e correntes nos isoladores das estruturas nº P-10 (Figuras 49 e 50), nº P-11 (Figuras 51 e 52) e nº P-12 (Figuras 53 e 54), conforme detalhado a seguir:

Figura 49 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura NºP10 – Ponto de descarga.



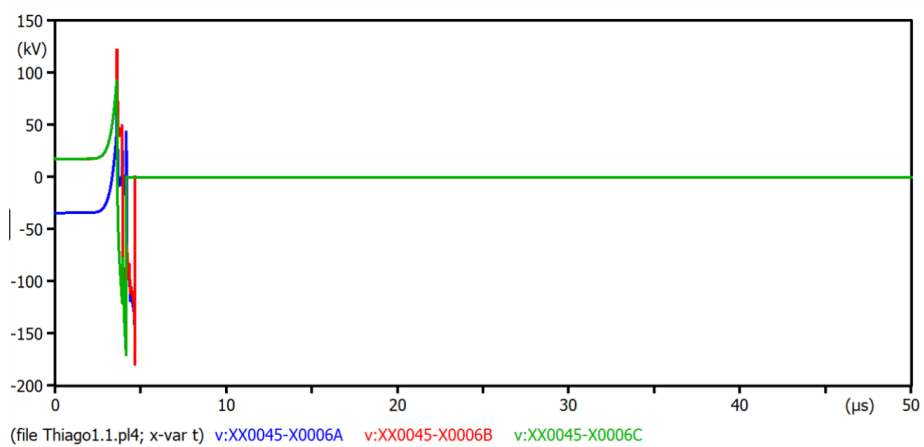
Fonte: De autoria própria.

Figura 50 - Corrente nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



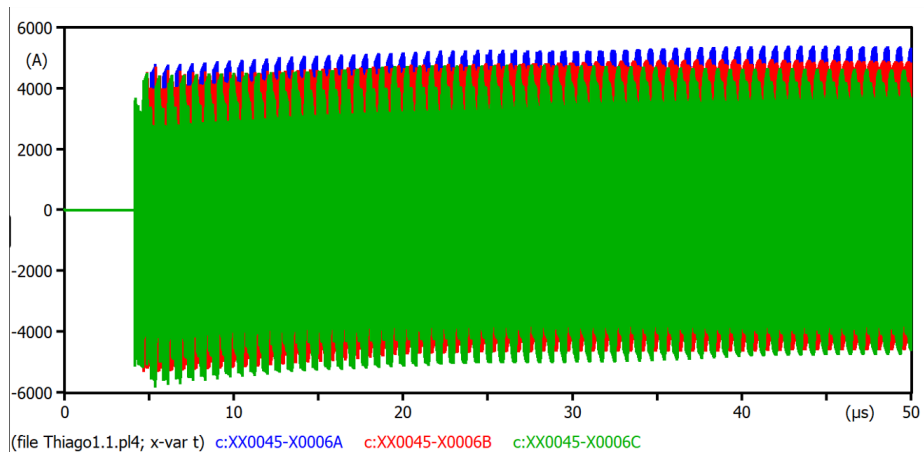
Fonte: De autoria própria.

Figura 51 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



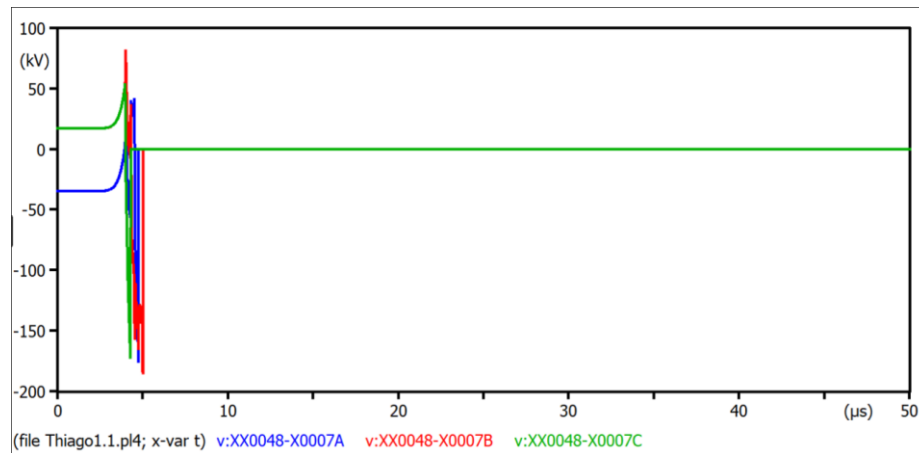
Fonte: De autoria própria.

Figura 52 - Corrente nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



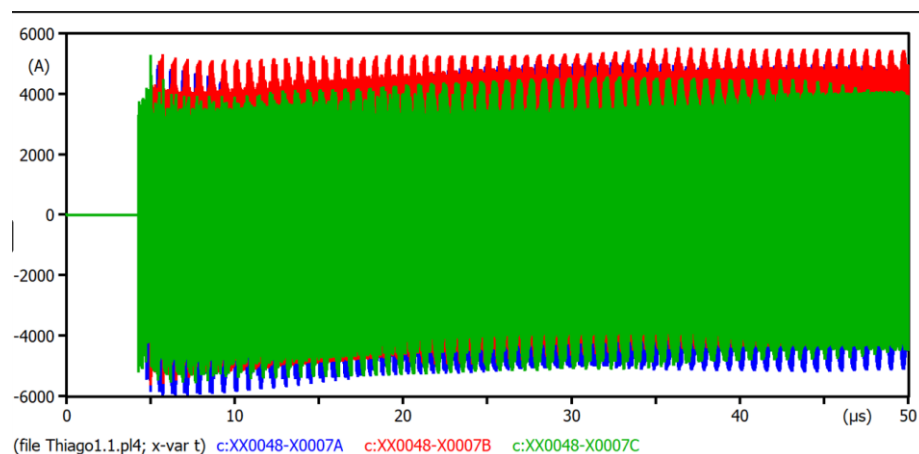
Fonte: De autoria própria.

Figura 53 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.



Fonte: De autoria própria.

Figura 54 - Corrente nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.



Fonte: De autoria própria.

Analisando as medições das correntes e tensões registradas nos isoladores da rede de distribuição em resposta a uma descarga atmosférica de 30 kA, que incidiu diretamente sobre o cabo guarda, sem a presença de para-raios. As figuras 49, 51 e 53 ilustram que as tensões nos isoladores atingiram valores superiores a 170 kV, correspondentes ao nível de ruptura definido para o isolador. Observa-se que, após alcançar esse ponto crítico, a tensão caiu abruptamente para “zero”, indicando que o isolador, modelado como uma chave acionada por tensão, foi disparada, simulando a ruptura dos isolamentos na rede.

Esse comportamento foi observado tanto nos isoladores do poste que sofreu o impacto direto da descarga quanto nos isoladores do poste adjacente, que se encontrava a uma distância considerável. A análise das formas de onda das correntes nos isoladores, conforme ilustrado

nas Figuras 50, 52 e 54, confirma que houve condução de corrente, evidenciando que o isolador estava efetivamente em estado de ruptura.

Em resumo, a incidência de uma descarga atmosférica de 30 kA diretamente no cabo guarda da rede, sem a proteção de para-raios, mostrou-se suficiente para causar danos significativos aos componentes do poste de impactado como também aos postes adjacentes. Essa situação representa um risco elevado para a continuidade do fornecimento de energia à subestação de britagem I/II, podendo resultar em interrupções devido aos danos nos equipamentos ou à atuação das proteções da rede.

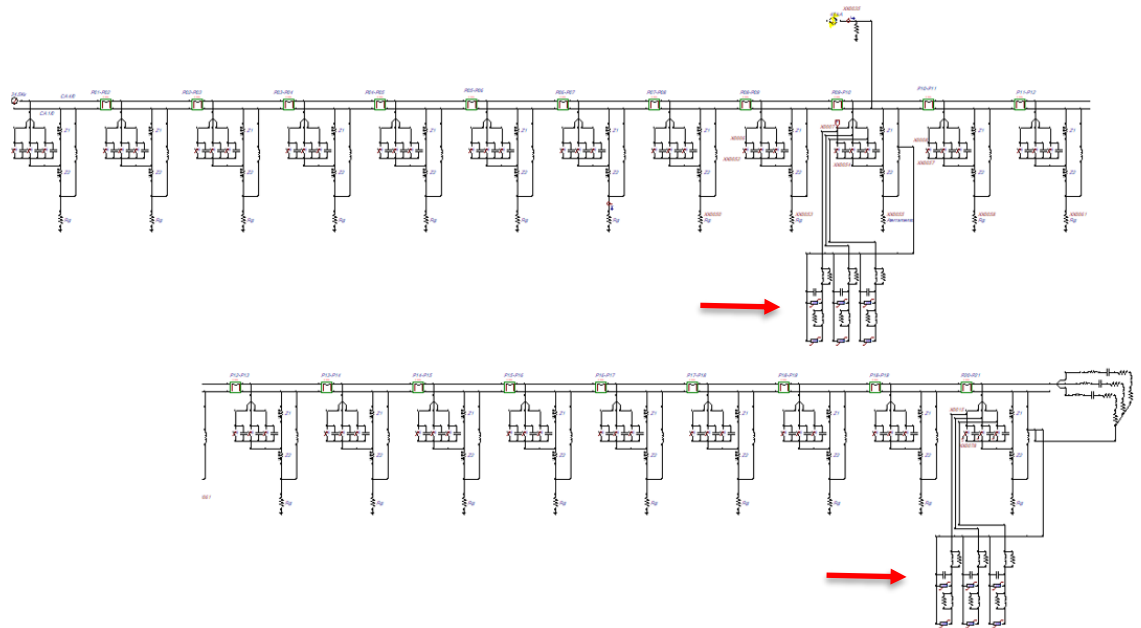
A extensa quantidade de dados e resultados a serem apresentados para dois cenários distintos, considerando três níveis de tensão, tornaria este trabalho excessivamente longo e complexo. Assim, optou-se por simplificar a apresentação dos resultados, focando não na análise detalhada de cada nível de tensão ou corrente, mas sim na eficácia do suprimento de energia à carga.

No cenário da rede de distribuição desprovida de para-raios, não será levado em consideração descargas atmosféricas em pontos estratégicos, como o início ou o final da rede. Essa decisão se justifica pelo fato de que a rede já demonstrou suscetibilidade a danos aos níveis de tensão simulados, não sendo diferente os resultados caso se mantenha as características da rede.

## **5.2 Simulação na Rede de Distribuição Com Para-Raio**

Agora será considerado a mesma rede de distribuição modelada nas simulações anteriores, inserida com dois para-raios, sendo o primeiro ao meio da rede e outro ao final. A rede de distribuição modelada no ATPdraw, com a inclusão de para-raios onde indicado com a seta vermelha, é apresentada na Figura 55.

Figura 55 - Rede de distribuição 34,5 kV simulada com para-raios. - 10 kA.



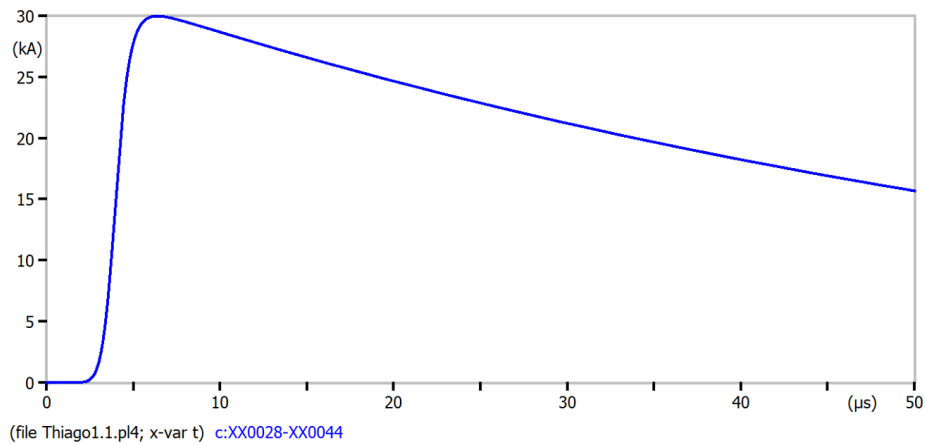
Fonte: De autoria própria.

Foram simuladas as descargas com as mesmas intensidades de corrente aplicadas anteriormente, avaliando principalmente as descargas de intensidade 30 kA e 45 kA, atingindo diretamente o cabo guarda da rede, ambos próximo ao para-raio no meio e ao final da rede. De forma a avaliar se os efeitos das descargas afetam a rede, são medidos e avaliados os valores das sobretensões nas fases próximo ao ponto de descarga e nos postes adjacentes, a tensão sobre os isoladores, a tensão sobre o para-raio e as correntes que fluem por estes mesmos componentes e pelo sistema de aterramento dessas estruturas.

### 5.2.1 Descarga de Retorno de 30kA ao Meio da rede de Distribuição

Iniciando pela descarga de 30 kA, foi realizada uma simulação considerando a incidência da descarga na estrutura número N° P10, que representa a estrutura central da rede de distribuição. A onda de corrente simulada mantém os mesmos parâmetros de tempo de frente de onda, tempo de duração e taxa de subida utilizados nas simulações anteriores, com uma amplitude de descarga fixada em 30 kA, conforme ilustrado na Figura 56 abaixo.

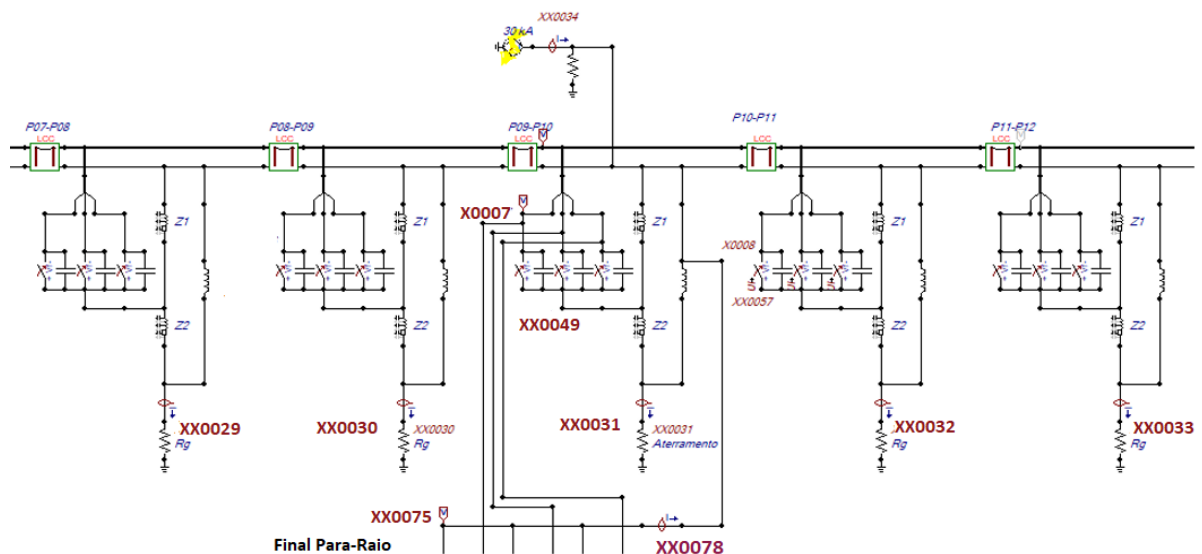
Figura 56 - Forma de onda da descarga de 30 kA aplicada.



Fonte: De autoria própria.

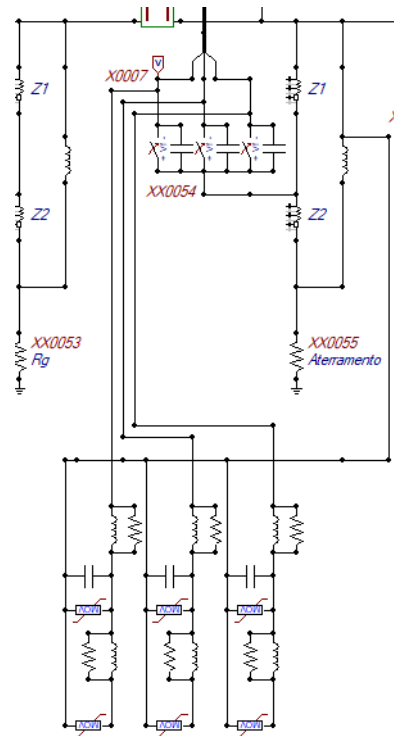
O detalhamento dos componentes da rede modelada, com ênfase no para-raios, é apresentado nas Figuras 57 e 58. Observa-se que os para-raios foram instalados em paralelo com os isoladores, formando um caminho preferencial que direciona a corrente da linha de distribuição para o cabo de descida da estrutura. Este cabo é modelado como uma indutância e está interligado à malha de aterramento. Conforme mencionado no item 4.2.6 deste trabalho, a resistência da malha de aterramento para estruturas que contêm para-raios ou equipamentos não deve ultrapassar 80 ohms. Adicionalmente, o detalhamento inclui pontos estratégicos para a coleta de dados, que foram adotados com o objetivo de obter as formas de onda necessárias para avaliação.

Figura 57 - Detalhamento dos componentes essenciais a serem analisados.



Fonte: De autoria própria.

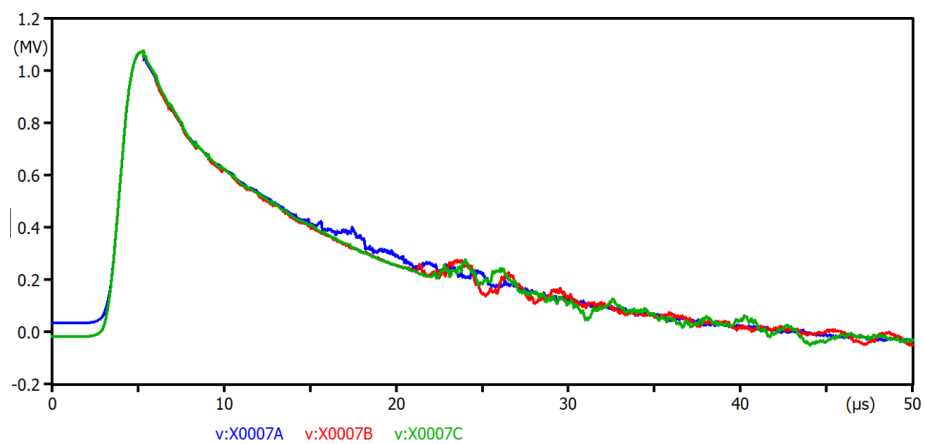
Figura 58 - Detalhamento da estrutura com para-raios em paralelo modelado no ATPdraw.



Fonte: De autoria própria.

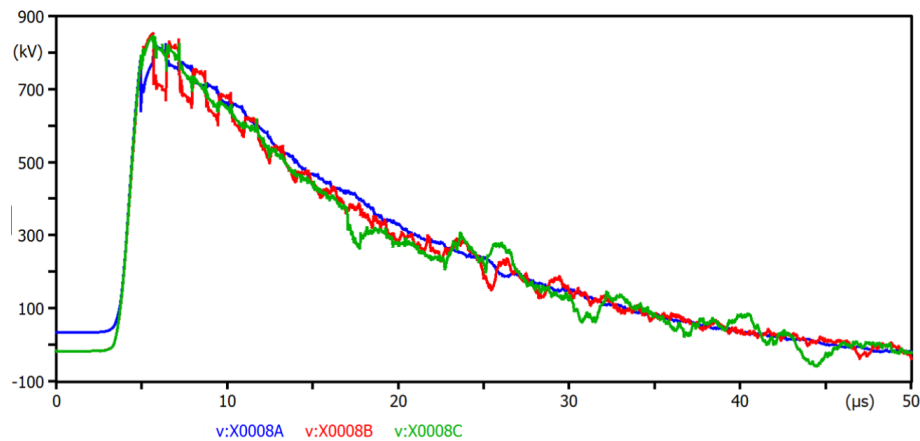
A seguir são apresentadas as formas de ondas das sobretensões nas três fases dos postes nº 10 e nº 11, ilustradas nas Figuras 59 e 60, nessa sequência:

Figura 59 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura de N°P10, no ponto de descarga.



Fonte: De autoria própria.

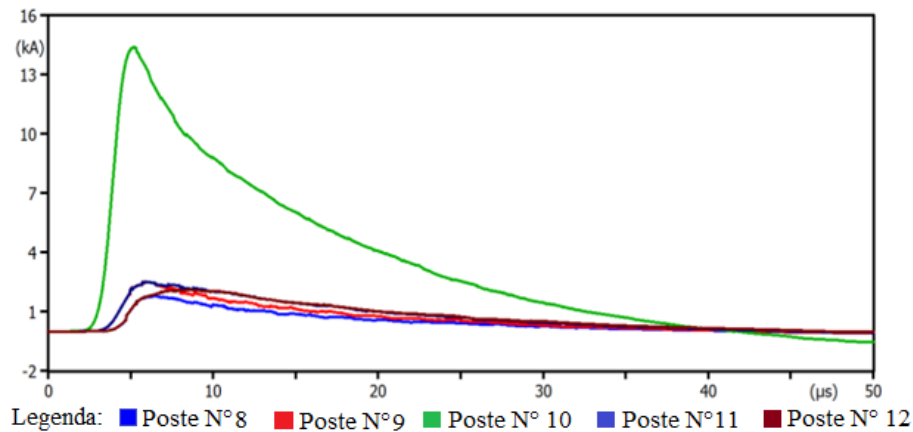
Figura 60 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura N°P11 adjacente ao ponto de descarga.



Fonte: De autoria própria.

Na análise dos resultados, foram verificados os valores das correntes que fluem através dos resistores de aterramento dos postes ( $R_g$ ), bem como no aterramento do poste P10, que está equipado com um para-raio. As curvas resultantes dessa avaliação estão apresentadas na Figura 61, proporcionando uma visão clara do comportamento das correntes de aterramento em cada um dos postes analisados.

Figura 61 - Curva da corrente no sistema de aterramento  $R_g$  e Aterramento do para-raios.



Fonte: De autoria própria.

Ao comparar os resultados obtidos na simulação anterior, apresentados nas Figuras 45 e 46, com a configuração da rede sem para-raios, se observa que a inclusão do para-raios resultou em uma significativa atenuação da amplitude da onda de sobretensão sobre as fases. Especificamente, constatou-se uma redução de aproximadamente 700 kV no ponto de

incidência da descarga no poste P10 e de 400 kV na estrutura adjacente P11. Conforme apresentado na Tabela 7 abaixo:

Tabela 7 – Redução percentual dos resultados com e sem para-raios – 30 kA.

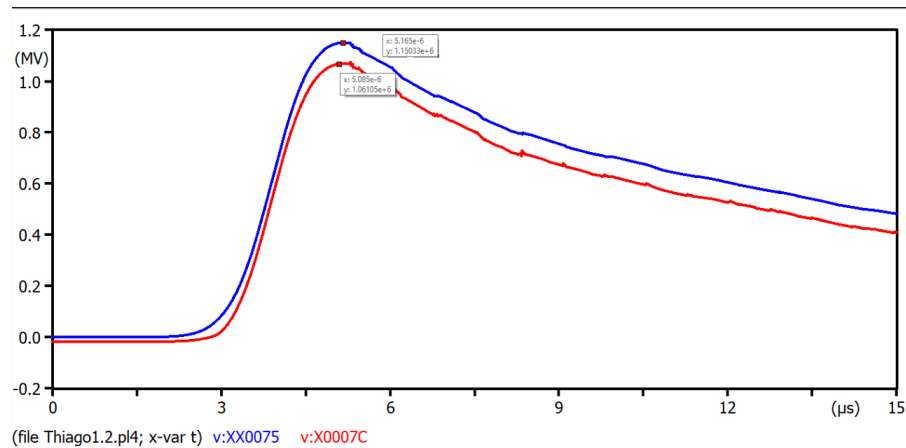
Poste	Valor da tensão induzida nas fases sem para-raios	Valor da tensão induzida nas fases com para-raios	Diferença	Atenuação percentual
P10	1,8 MV	1,1 MV	700 kV	38%
P11	1,3 MV	0,9 kV	400 kV	30%

Fonte – De autoria própria.

Essa atenuação é atribuída ao funcionamento do para-raio, que, ao ser conectado em paralelo com a linha de distribuição, estabelece um caminho preferencial para a passagem da corrente de surto. Essa configuração visa proteger os componentes e equipamentos da rede, diminuindo os níveis de sobretensão. Essa dinâmica pode ser confirmada pela análise dos valores de corrente que fluem para a terra pelo aterramento do poste P10 (ponto XX0031), conforme apresentado na Figura 61. Nota-se que a maior parte da corrente é absorvida pelo para-raio e conduzida para o solo, resultando em uma atenuação das correntes nos postes adjacentes, especialmente quando comparado aos resultados da Figura 48, que corresponde ao sistema sem para-raio.

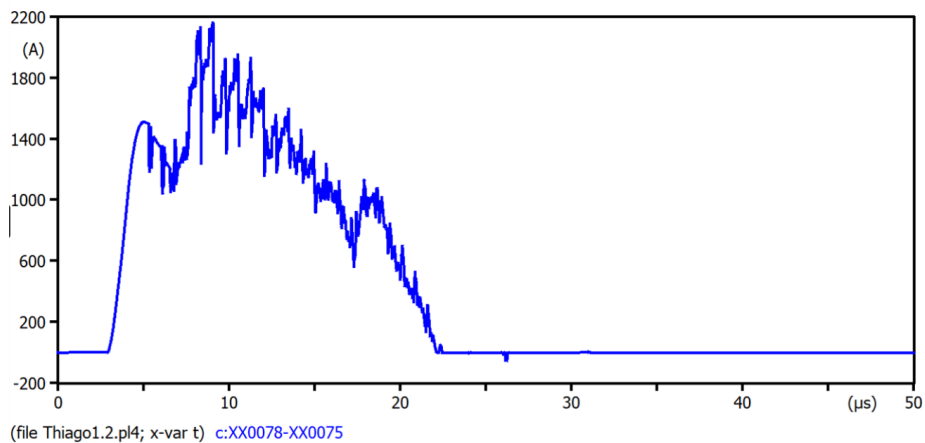
Para avaliar a eficácia dos para-raios, é fundamental analisar dois aspectos essenciais: a tensão aplicada sobre os para-raios e a corrente que circula pelo componente. Espera-se que os varistores não lineares atuem de forma a permitir a passagem da corrente em resposta à queda de tensão sobre o para-raio, conforme a curva de  $V \times I$  parametrizada nos dados de sua modelagem. As Figuras 62 e 63 a seguir apresentam a diferença de tensão sobre o para-raio e a corrente que flui pelo componente no poste P10, permitindo uma análise mais detalhada do seu desempenho.

Figura 62 - Tensão sobre os para-raios da estrutura N°P10.



Fonte: De autoria própria.

Figura 63 - Corrente que flui pelo para-raios, da estrutura N°P10.



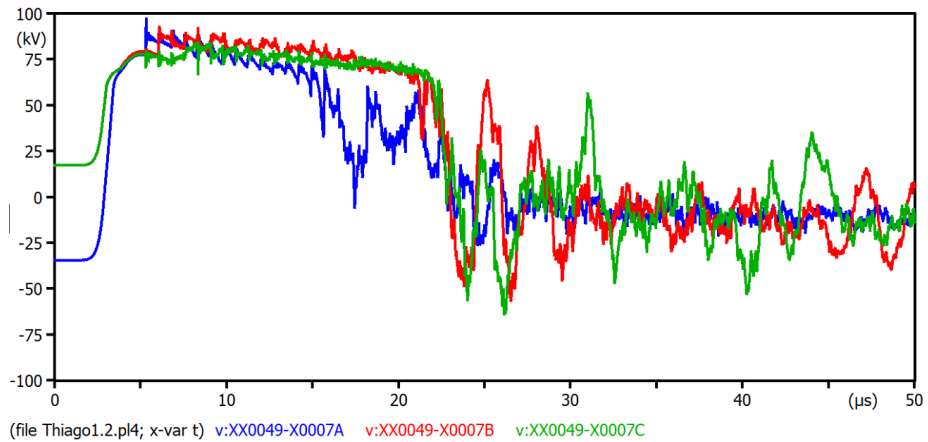
Fonte: De autoria própria.

Na Figura 62 a curva azul, o ponto XX0075 representa a tensão de saída do para-raio e a curva vermelha, o ponto XX0078 a tensão de entrada. Calculando a diferença dos valores do ponto máximo de ambas as curvas, obtém-se a tensão resultante, em cima dos para-raio. Estes valores, respectivamente, são 1.150.330 V e 1.061.050 V, sendo a diferença igual a 89.280 V. Ao avaliar a Tabela 4 apresentada no capítulo 4, observa-se que para a tensão encontrada o valor da corrente que flui pelo dispositivo precisa ser algo entre 1500 A e 3000A, sendo confirmado através da Figura 63, na qual o resultado de 2.200 A encontra-se na faixa de corrente apresentada.

Posteriormente, de forma a confirmar a proteção dos para-raios, foram verificadas as tensões e correntes sobre os isoladores das estruturas, simulando e avaliando se foram danificados com a ocorrência da descarga na rede. De forma respectiva, os postes e os pontos

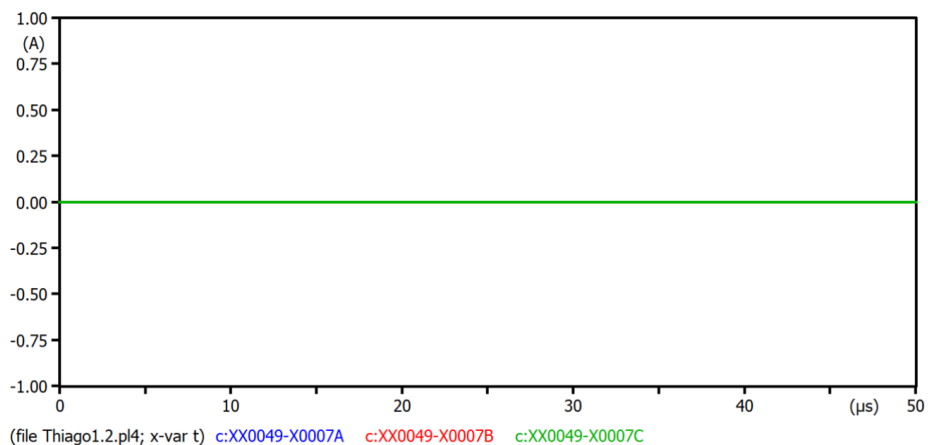
de medição dos isoladores avaliados são os seguintes: n° 10 (Ponto XX0049) e n° 11 (Ponto XX0048). Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

Figura 64 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



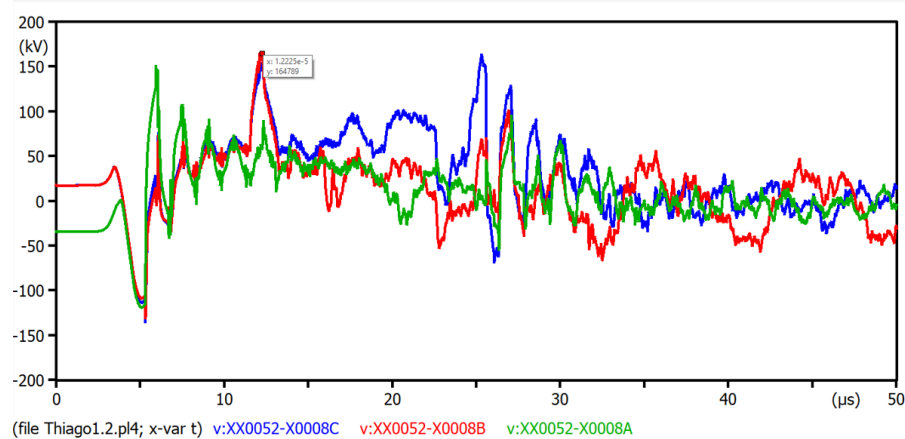
Fonte: De autoria própria.

Figura 65 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



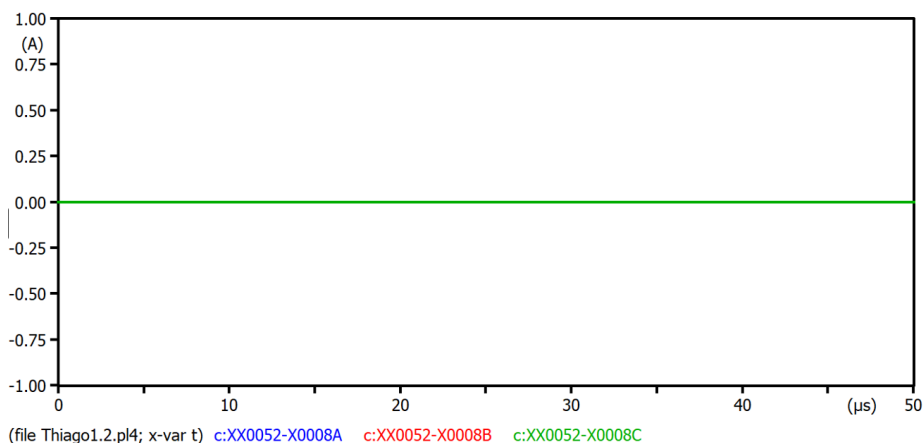
Fonte: De autoria própria.

Figura 66 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



Fonte: De autoria própria.

Figura 67 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



Fonte: De autoria própria.

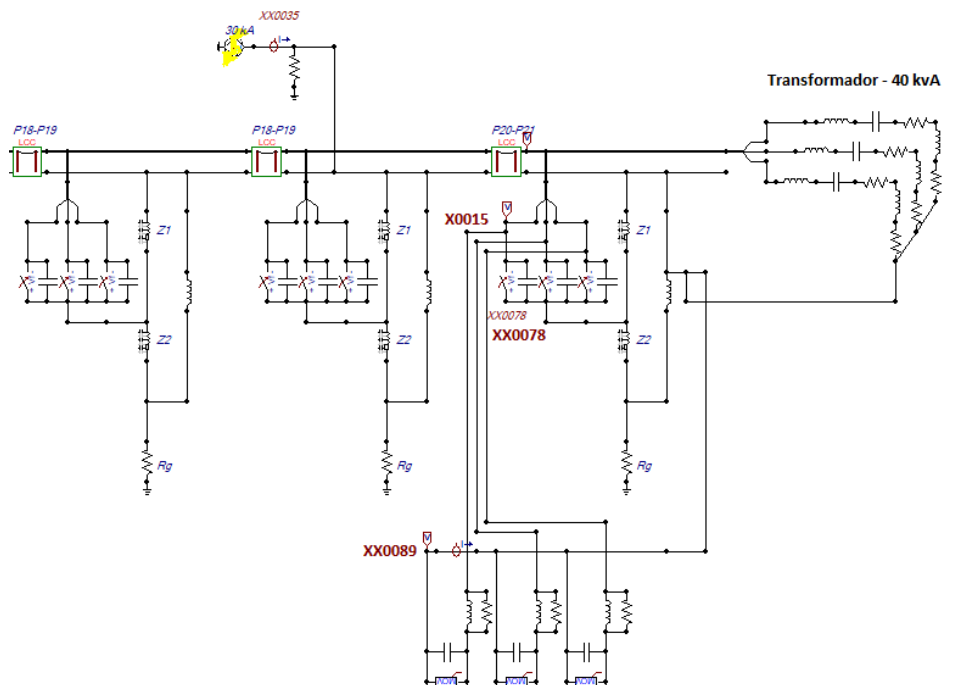
A análise dos resultados apresentados nas Figuras 64 e 66 revela que os isoladores das estruturas P10 e P11 apresentam uma diferença de potencial entre o topo e a base, sem evidência de condução de corrente, conforme demonstrado nas Figuras 65 e 67. Esses dados confirmam que não houve ruptura do isolamento em nenhum dos componentes. Em contraste com a simulação realizada sem a presença de para-raios, onde todos os isoladores conduziram corrente para a terra, os resultados obtidos com a proteção instalada demonstram a eficácia do sistema. Conclui-se, portanto, que a rede se mantém adequadamente protegida contra sobretensões geradas por descargas diretas nas proximidades do para-raios, mesmo em situações de descarga de até 30 kA.

Ao analisar a incidência direta de uma descarga atmosférica no cabo guarda, com um nível de corrente de 30 kA, verifica-se que a instalação de para-raios no ponto de descarga, localizado no meio da rede, foi eficaz na proteção do sistema e de seus componentes contra os efeitos do surto elétrico gerado pela descarga atmosférica. Essa medida não apenas assegura a integridade dos equipamentos, mas também pode contribuir para a melhoria da qualidade da energia fornecida, minimizando desligamentos e interrupções na produção.

## 5.2.2 Descarga de Retorno de 30 kA ao Final da Rede de Distribuição

Uma outra análise foi realizada simulando a descarga atmosférica modelada anteriormente, mantendo todos os seus parâmetros e incidindo em um ponto estratégico localizado ao final da rede de distribuição, próximo ao transformador acoplado à mesma. Ao contrário do caso anterior, em que o ponto de descarga estava situado próximo à estrutura que contém o para-raios, neste cenário, a incidência ocorre em uma estrutura anterior àquela que possui o dispositivo de proteção. A Figura 68 ilustra o detalhamento do ponto de incidência da descarga, destacando os principais locais de coleta de dados para análise, bem como os componentes da rede modelados no ATPdraw, ao representando o final da rede de distribuição.

Figura 68 - Detalhamento dos componentes e pontos de medição da rede modelada no ATPdraw.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Ao analisar as formas de onda das sobretensões nas 3 (três) fases do poste N° P20, que foi o ponto de incidência da descarga, e no poste P21, onde se encontra o para-raio instalado, foram obtidos valores de sobretensões próximos a 2 MV, sendo próximo para ambos devidos o a proximidade do vão. Esses valores são significativamente superior aos encontrados no meio da rede, que se situaram abaixo de 1,1 MV. Essa amplificação pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo a reflexão causada pela impedância da rede, observada a partir do final da mesma, bem como a diminuição das vias de aterramento disponíveis, que poderiam dissipar a sobretensão.

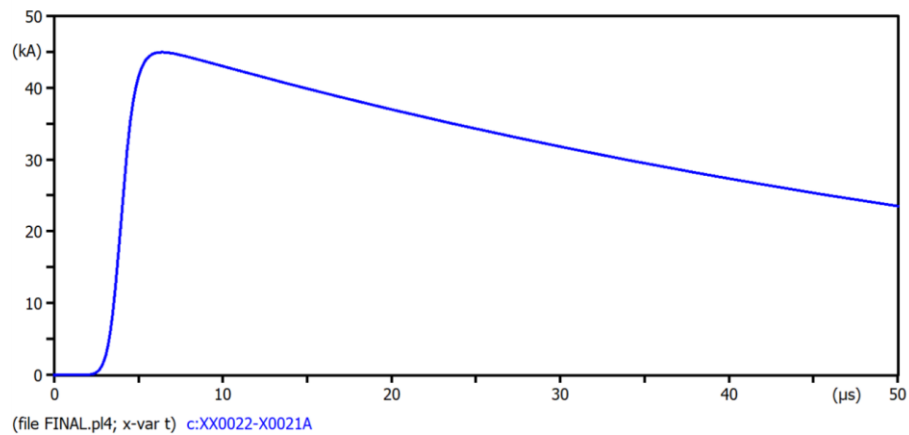
De maneira análoga à análise da simulação anterior, a avaliação da atuação dos para-raios foi realizada por meio da medição da tensão no dispositivo, obtida pela diferença de potencial entre os pontos X0015 e XX0089 da Figura 68 durante o surto. Além disso, foi registrada a corrente que circulou nesse momento no ponto de medição de corrente XX0089. Os resultados mostraram que a tensão sobre o para-raio atingiu 74.340 V, enquanto a corrente registrou um pico de 1.700 A. Esse valor está em consonância com o comportamento esperado dos varistores não lineares, conforme ilustrado na curva de  $V \times I$  apresentada na Figura 28 e na Tabela 4.

Em sequência, foram avaliadas as tensões e correntes nos conjuntos de isoladores dos postes P20 (ponto de descarga) e P21 (para-raio). Durante a análise, constatou-se que a diferença de potencial entre o topo e a base dos isoladores se manteve, sem que houvesse circulação de corrente através dos isoladores de cada fase. No entanto, ao analisar os dados referentes ao conjunto de isoladores da estrutura P19, observou-se a ruptura dos isoladores. Assim, conclui-se, nessa análise, que a rede de distribuição equipada com para-raios, permanece protegida e eficiente até um determinado ponto. Além desse ponto, a eficácia da proteção pode ser comprometida, e os efeitos das descargas atmosféricas na rede tornam-se comparáveis aos observados em uma rede desprovida de para-raios

### **5.2.3 Descarga de Retorno de 45 kA ao Meio da Rede de Distribuição**

Mantendo as características da corrente de descarga simulada no ATPDraw, incluindo o tempo de frente de onda, a duração e a taxa de subida, e aumentando a amplitude da descarga para 45 kA, obtive-se a forma de onda ilustrada na Figura 69 a seguir.

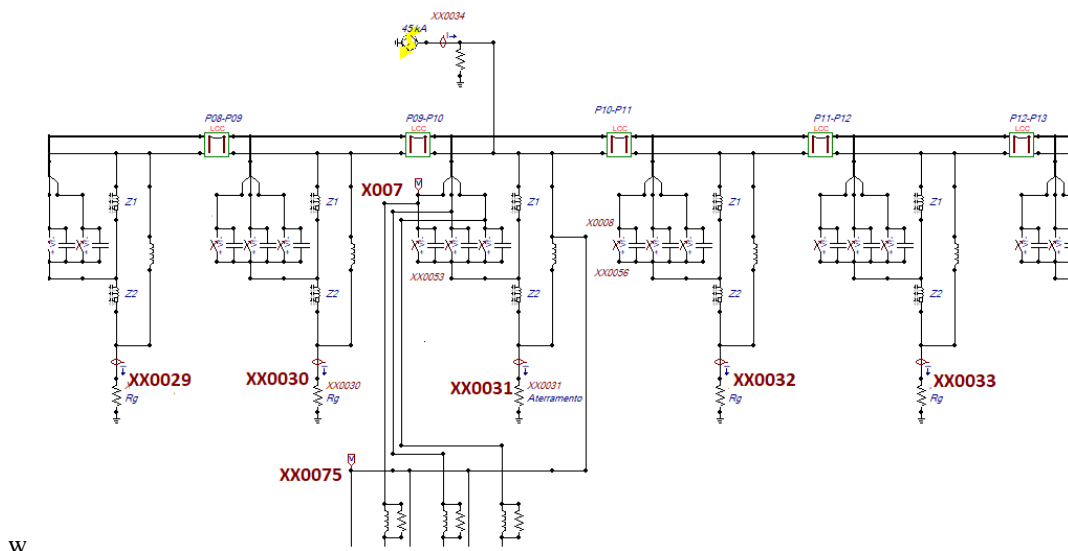
Figura 69 - Forma de onda da descarga de 45 kA aplicada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os pontos de incidência da descarga e a coleta de dados estão apresentados na Figura 70 abaixo:

Figura 70 - Detalhamento dos componentes e pontos de medição da rede modelada no ATPdraw.

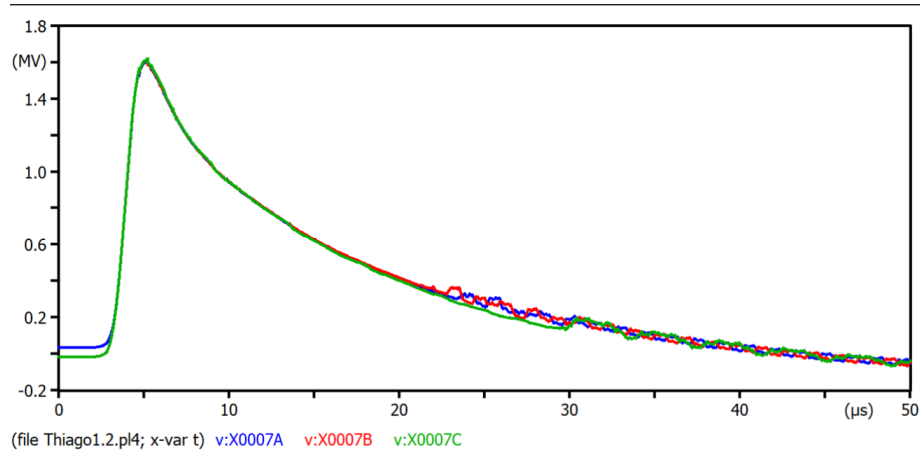


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O aumento na corrente de descarga resultou em sobretensões significativas nas fases, provocadas pela incidência direta da descarga no cabo guarda. Para a estrutura P10, que representa o ponto de incidência da descarga, observou-se que este se tornou o ponto de maior sobretensão medida, ultrapassando 1,6 MV, conforme esperado a partir das análises anteriores. Nos postes adjacentes, foi identificada uma atenuação das sobretensões, uma vez que a corrente de surto flui em direção ao aterramento. Assim, nos pontos P11 e P12, foram registrados valores próximos a 1,2 MV e 1 MV, respectivamente.

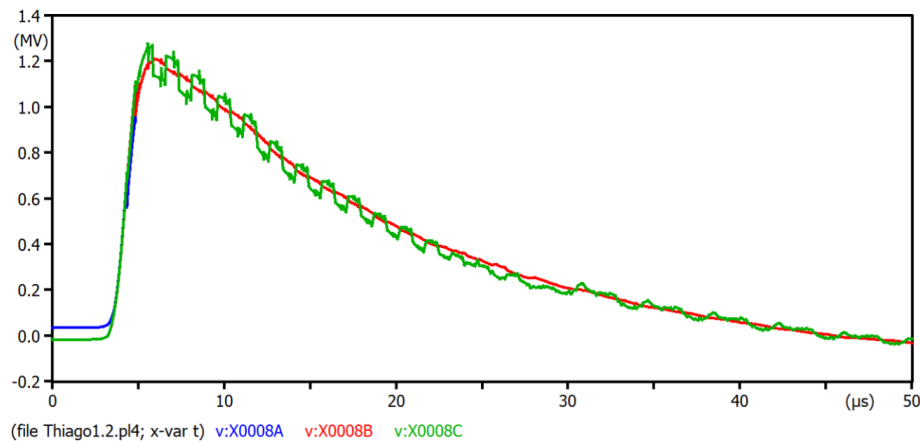
As Figuras 71 e 72 apresentam, nesta sequência, as ondas de sobretensão dos postes P10 e P11.

Figura 71 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura de N°P10, no ponto de descarga.



Fonte: (Fonte Própria).

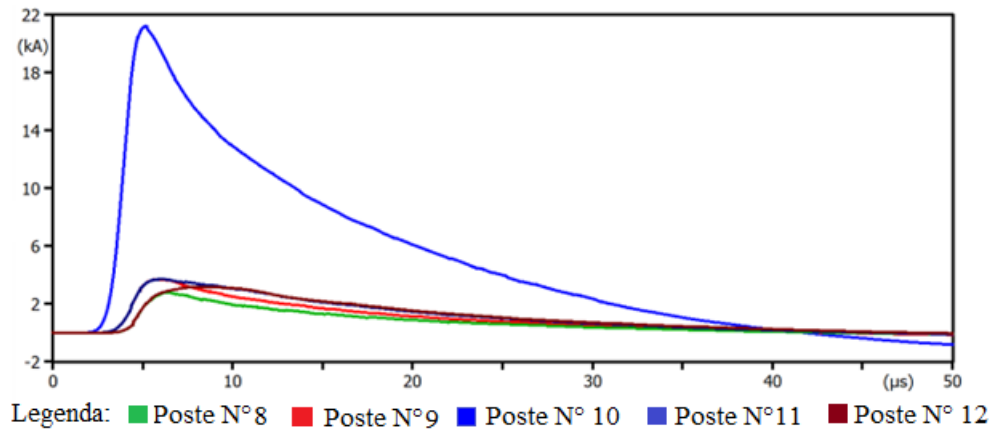
Figura 72 - Sobretensão nas fases A, B, C na estrutura N°P11 adjacente ao ponto de descarga.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Em seguida, ao analisar as correntes que fluem através dos resistores de aterramento dos postes ( $R_g$ ), bem como no aterramento do poste P10, que possui a instalação do para-raio, verifica-se que o para-raio conduz a maior parte da corrente de surto para o solo, cumprindo assim a função para a qual foi projetado. As curvas resultantes dessa avaliação estão apresentadas na Figura 73.

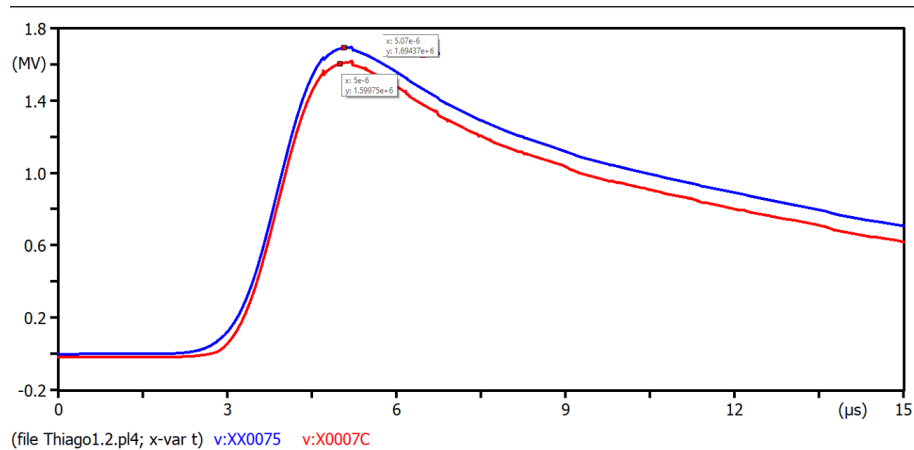
Figura 73 - Curva da corrente no sistema de aterramento Rg e Aterramento do para-raio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

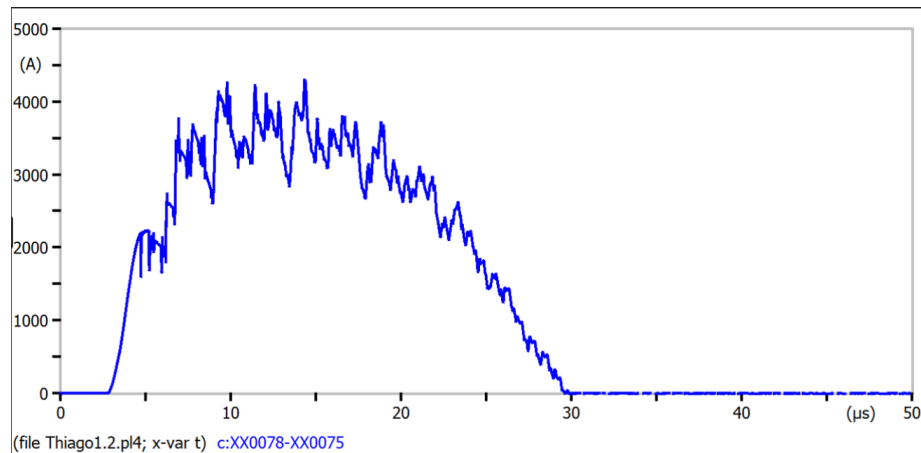
De forma a validar o funcionamento dos para-raios e a sua modelagem, foi analisada a sobretensão sobre o para-raio e a corrente que flui por ele está coerente com a curva  $VxI$  apresentada na Figura 28 e parametrizada no ATPdraw. As Figuras 74 e 75 a seguir apresentam a diferença de tensão sobre o para-raio e a corrente que flui pelo componente no poste P10, permitindo uma análise mais detalhada do seu desempenho.

Figura 74 - Tensão sobre os para-raios da estrutura N°P10.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 75 - Corrente que flui pelo para-raios, da estrutura N°P10.

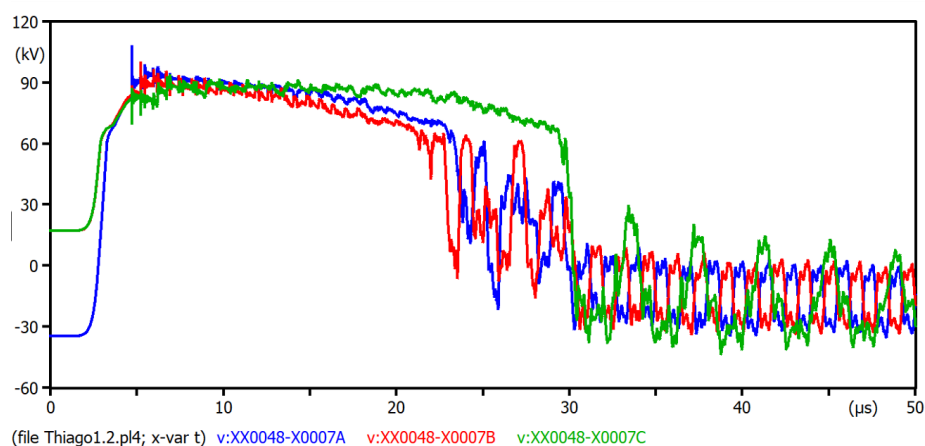


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na entrada do para-raio, foi medida uma tensão de 1.694.370 V, correspondente à curva em vermelho obtida no ponto X0007. Na saída do para-raio, foi registrado um valor máximo de 1.599.750 V, conforme a curva em azul medida no ponto XX0078. Ao calcular a diferença entre os dois valores, obtém-se uma tensão sobre o para-raio de 94.620 V. De acordo com a Figura 81, foi registrada uma corrente de aproximadamente 4.300 A fluindo pelo para-raio. Assim, consultando a Tabela 4 para confirmação dos resultados, observa-se que, para este nível de tensão, o para-raio permitem a passagem de uma corrente entre 3.000 A e 5.000 A, o que está dentro do esperado.

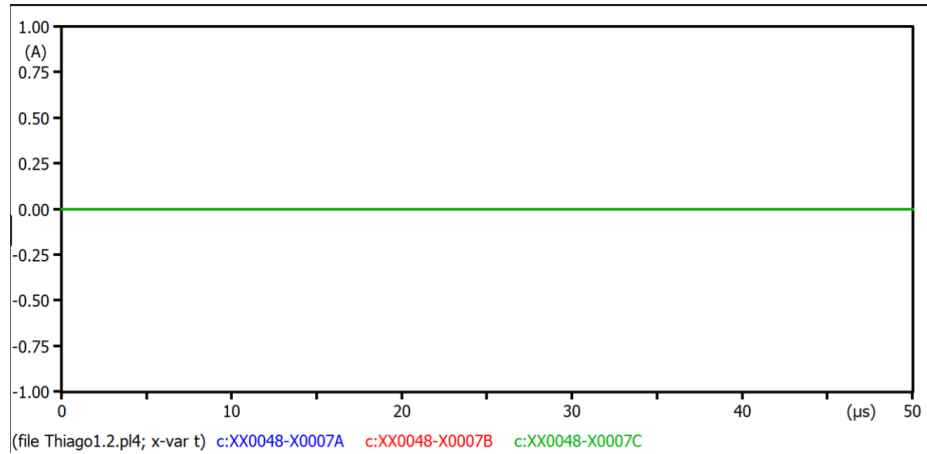
Adicionalmente, foram avaliadas as informações obtidas sobre os conjuntos de para-raios dos postes P10, P11 e P12, medidos nos respectivos pontos XX0048, XX0051 e XX0054. Os resultados obtidos a seguir são apresentados de forma detalhada nas Figuras 76 a 81:

Figura 76 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



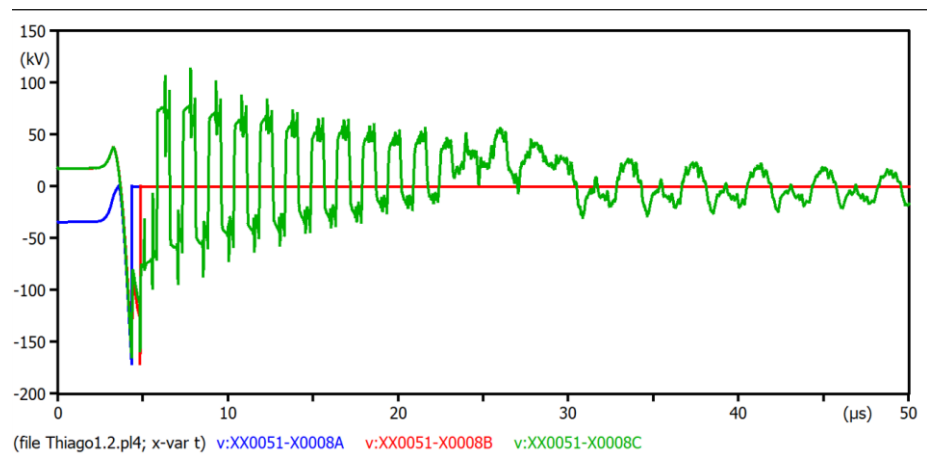
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 77 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P10.



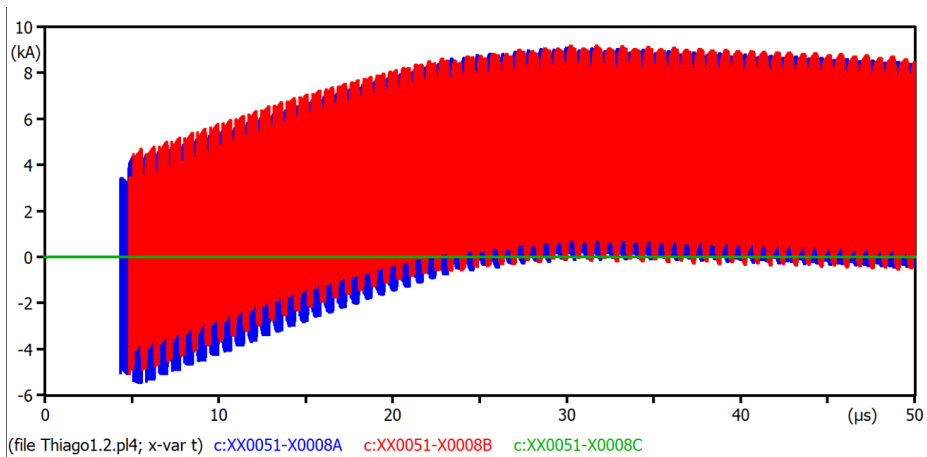
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 78 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



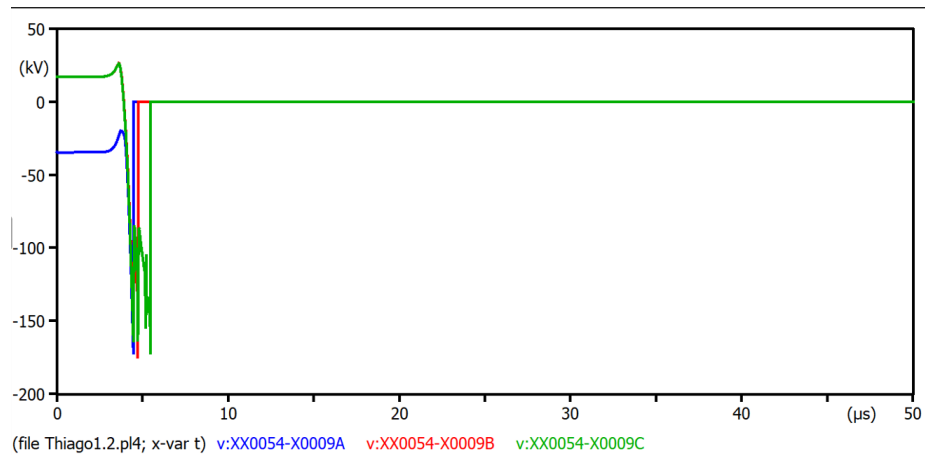
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 79 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P11.



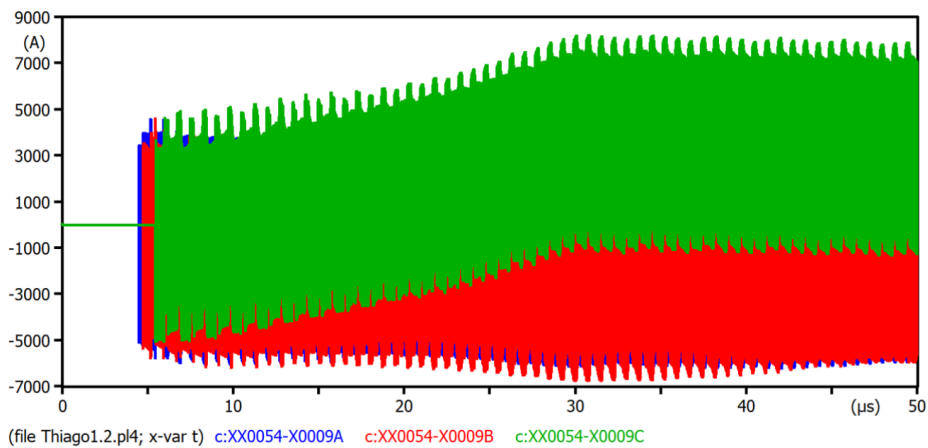
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 80 - Tensão nos isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 81 - Corrente sobre os isoladores das fases A, B, C da estrutura N°P12.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A análise dos resultados, baseada nas formas de onda da tensão e corrente nos isoladores, revela informações significativas sobre o desempenho da rede de distribuição contra descargas atmosféricas. Conforme ilustrado nas Figuras 82 e 83, referentes ao poste P10, observa-se que a tensão sobre o para-raio não ultrapassou 170 kV (Nível de Isolamento Básico - NBI do isolador). Além disso, foi registrada uma corrente de zero amperes fluindo por ele, o que confirma a integridade dos isoladores do poste na rede elétrica.

Por outro lado, se avaliar as tensões apresentadas nas Figuras 84, nota-se que, para os isoladores do poste P11, as fases A e B atingiram o limite de tensão de 170 kV e, em seguida, zeraram. Essa condição indica que o isolamento dos isoladores dessas fases foi comprometido, resultando na eliminação da diferença de potencial entre a base e o topo. Tal fenômeno é

corroborado pela detecção de corrente nos isoladores das respectivas fases, conforme demonstrado na Figura 85, evidenciando a falha no sistema de isolamento.

A mesma análise foi aplicada aos isoladores do poste P12. Através das curvas de tensão e corrente nas Figuras 86 e 87, constatou-se que todos os isoladores deste poste ultrapassaram seu nível de NBI, permitindo a condução de corrente para a estrutura. Essa situação ressalta a vulnerabilidade da rede de distribuição frente a descargas elétricas de alta intensidade.

Diante de uma descarga elétrica de grande magnitude, incidida diretamente no cabo guarda da rede, concluí-se que o sistema de para-raio demonstrou ser ineficiente, uma vez que ao proteger, exclusivamente, a estrutura a que estava acoplado, não protegeu a rede de distribuição. Apesar disso, a descarga causou danos significativos a várias estruturas adjacentes, tais danos não apenas impactam a eficiência operacional da planta, mas também podem acarretar custos financeiros elevados e atrasos na produção.

#### **5.2.4 Descarga de Retorno de 45 kA ao Final da Rede De distribuição.**

Semelhante ao simulado no item 4.2.2 deste trabalho, foi simulada a incidência de uma descarga atmosférica ao final da rede, incidindo diretamente no cabo guarda da estrutura P20, adjacente a estrutura P21 que possui um para-raio e um transformador acoplados.

Ao analisar os resultados obtidos, de forma sucinta e objetiva, observou-se, semelhante às simulações realizadas com corrente de 30 kA, uma amplificação da amplitude da sobretensão nas fases dos postes P20 e P21. Essa amplificação pode ser atribuída a fatores como a reflexão das ondas de tensão, a diminuição da quantidade de aterramentos e a menor dissipação de energia. As fases de ambas as estruturas alcançaram um valor medido de 3 MV.

Os dados referentes aos sistemas de aterramento indicam que aproximadamente 25 kA foram dissipados no solo através do poste P21 (para-raios), enquanto o restante da corrente foi dispersada pelas estruturas adjacentes. A atenuação observada refere-se apenas à corrente elétrica, resultante da diferença nos sistemas de aterramento das estruturas. Em contrapartida, as formas de onda da sobretensão não apresentaram variações significativas em suas amplitudes, uma vez que a distância entre o ponto de descarga e o ponto de medição da estrutura analisada é bastante reduzida, cerca de 20 metros.

De maneira análoga à análise da simulação anterior, verificou-se a atuação do conjunto de para-raios. Durante o surto, a tensão sobre o para-raio foi medida em 89.640 V, e a corrente que por ele circulou foi de 2.000 A, valores que estão em conformidade com as expectativas apresentadas na Tabela 4.

Ao avaliar as tensões e correntes nos conjuntos de isoladores dos postes P20 (ponto de descarga) e P21 (para-raio), observou-se que, no poste P20, ocorreu a ruptura do isolamento dos isoladores. No entanto, devido à atuação dos para-raios, o surto não se propagou para a estrutura do poste P21, protegendo componentes críticos como os isoladores e o transformador. Entretanto, esses efeitos são suficientemente danosos para comprometer a rede e interromper a produção.

Dessa forma, é possível concluir que a rede apresenta fragilidade frente a descargas de alta intensidade, como a de 45 kA. Mesmo quando próxima a uma estrutura com para-raio, observou-se que os isoladores sofreram danos em seus isolamentos e conduziram a tensão para a estrutura. Contudo, o para-raio na estrutura adjacente foi eficaz em proteger a rede.

## 6 CONCLUSÃO

A análise do desempenho da rede de distribuição frente a descargas atmosféricas realizada nesse trabalho permitiu um melhor entendimento sobre a eficácia da instalação de para-raios. Nas simulações realizadas, utilizando o EMTP-ATP, observou-se que a incidência de descargas atmosféricas de 10 kA e 30 kA no cabo guarda da rede, na ausência de para-raios, resultou em danos significativos aos componentes dos postes impactados e, em alguns casos, até mesmo os postes adjacentes. Tais danos, presumidos de suas ocorrências mediante aos elevados níveis de sobretensões estabelecidos e a ocorrência da ruptura do isolamento da rede, comprometem não apenas a integridade da rede, mas também podem interromper o fornecimento de energia a instalações críticas, como a subestação de britagem I/II.

Por outro lado, a instalação de para-raios demonstrou eficácia em proteger a rede frente a descargas de 30 kA, assegurando a integridade dos equipamentos e contribuindo para a melhoria da qualidade da energia fornecida. Contudo, ao se considerar descargas de maior magnitude, como 45 kA, a proteção se mostrou insuficiente. Nesses casos, mesmo com a presença de para-raios, a rede apresentou fragilidades, resultando em danos aos isoladores, que sofreram fenômenos de "*black flashover*". Apesar de não terem ocorrido descargas diretas às estruturas adjacentes, a alta corrente da descarga contribuiu para a ocorrência desse fenômeno tanto na estrutura de impacto quanto nos conjuntos de isoladores das estruturas adjacentes, comprometendo a alimentação da subestação de britagem I/II e as cargas interligadas ao trecho. Ademais, os danos em estruturas adjacentes podem não apenas agravar a situação, mas também resultar em consequências mais severas e prolongadas para a recuperação operacional, impactando de maneira significativa a produção de minério na mina.

Portanto, conclui-se que, embora a instalação de para-raios seja uma medida eficaz para descargas de intensidade moderada, a proteção da rede de distribuição contra descargas atmosféricas de alta intensidade exige uma análise mais aprofundada. É fundamental considerar soluções adicionais, como, implementar componentes e estruturas mais robustas com um NBI mais elevado, melhorias nos aterramentos buscando menor resistência de aterramento com o solo, isso para garantir a resiliência do sistema frente a eventos extremos, assegurando assim a continuidade do fornecimento de energia a instalações críticas.

Como propostas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de simulações focadas na melhoria do sistema de aterramento, com o objetivo de minimizar as sobretensões nas

estruturas durante eventos de descargas atmosféricas. Além disso, a investigação da implementação de dispositivos de proteção, como para-raios, em pontos estratégicos da rede pode ser uma estratégia eficaz para aumentar a segurança dos equipamentos.

Outra sugestão relevante é a análise de diferentes componentes que possam elevar o Nível Básico de Isolamento (NBI) da rede, buscando otimizar a eficiência do sistema em situações de alta intensidade de corrente. Por fim, é fundamental conduzir estudos que integrem a modelagem de descargas indiretas para avaliar o desempenho da rede diante desse cenário, proporcionando uma compreensão mais abrangente das vulnerabilidades e potenciais melhorias.

Essas abordagens poderão contribuir significativamente para o aprimoramento do sistema elétrico da Mina de Capanema, assegurando uma operação mais segura e resiliente frente a eventos atmosféricos adversos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, Ralph B. **Lightning parameters for engineering application**. Electra, v. 69, p. 65-102, 1980.
- BRITO, Priscila Thais de Sousa et al. **Redução do tempo de paradas não programadas: estudo de caso em uma empresa de mineração**. 2024.
- CABRAL, Roberto José. **Modelos matemáticos para otimização do sistema de proteção contra descargas atmosféricas em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2018.
- CABRAL, Roberto J. et al. Improved distribution feeder topology against lightning. In: 2013 **International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)**. IEEE, 2013. p. 267-272.
- CEMIG, C. E. **Instalações Básicas de Redes de Distribuição Aéreas Rurais**. Belo Horizonte, 2016.
- CANDEMIL, Lucas Ligocki et al. **Análise e simulação de descargas atmosféricas em linhas de distribuição de energia elétrica**. 2018.
- Romagnole Produtos Elétricos S.A. **Catálogo artefatos de concreto**. Mandaguari: Romagnole, 2021. 24 p. <https://www.romagnole.com.br/produto/artefatos-de-concreto/poste-de-concreto-duplo-t-tipo-bbt>
- CIGRÉ, W. G. **Procedures for estimating the lightning performance of transmission lines—new aspects (C4. 23)**. Technical Brochure, v. 839, 2021.
- COELHO, V. L. **Análise do Desempenho de Redes Aéreas de Distribuição de Média Tensão Frente à Ação das Descargas Atmosféricas**. 2010. 169 f. 2010. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- COORAY, Vernon. **An introduction to lightning**. Heidelberg: Springer, 2015.
- DE CASTRO ASSIS, Sandro. **Cálculo de tensão induzida por descarga atmosférica em linhas aéreas polifásicas e multiterradas: implementação no PSCAD®/EMTDCtm**. 2006.
- SALARI FILHO, J. C., **Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- Oliveira, T. A. S., **Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica em Linhas Aéreas de Energia e Cabos Telefônicos: Uma Abordagem pela Teoria de Circuitos**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001;
- DE OLIVEIRA PEDROSA, R. de. **Estudo da Absorção de Energia de Para-Raios de Zno Instalados em Linhas de Transmissão de 138 kV**. Belo Horizonte, 2013. Dissertação.

DE CONTI, Alberto Resende. **Modelos para definição de ondas de corrente e tensão representativas das solicitações de sistemas de distribuição por descargas atmosféricas.** 2006.

DWIGHT, H. B. Calculation of the Resistances to Ground. **AIEE Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, [S. l.: s. n.], v. 55, p. 1319-1328, Dec. 1936.

GUIMARÃES, M. F. **Sobretensões devidas a descargas atmosféricas diretas em redes de distribuição com neutro multi-aterrado.** Belo Horizonte, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais

HEIDLER, F. **Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP - Berenchnung, In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION - ICLP, 1985, Munich, Proceedings...** [S. l.: s. n.], Munich, Sept. 1985. p. 63-66 (in german).

HEIDLER, F.; CVETIC, M.; STANIC, B. V. **Calculation of Lightning Current Parameters. IEEE Transaction on Power Delivery, Piscataway, N. J.; v. 14, n. 2, p. 399-404, April 1999**

IEEE, P. E. S. **Modeling of metal oxide surge arrestors. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, 1992.** Citado na página.

LIMA, Larissa Lorrany Pacífico et al. **Tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição compactas trifásicas.** 2023.

MESQUITA, Natália Sales. **Desligamento automático de linhas de alta tensão provocado por descargas atmosféricas: um estudo da Silves-Lechuga.** 2017.

MOTA, Paulo César Álvares et al. **Um estudo sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão.** 2011.

SNC.LAVALIN, **Projeto detalhado distribuição de energia rede aérea – redes de distribuição de 34,5 kV diagrama unifilar.** Documento de Uso Interno. 2022.

SNC.LAVALIN, **Projeto detalhado distribuição de energia redes de distribuição de 34,5 kV – Redes aéreas 34,5 kV detalhe de montagem – FL-02 (Estruturas Convencionais).** Documento de Uso Interno. 2022.

SNC.LAVALIN, **Projeto básico geral condições locais.** Documento de Uso Interno. 2018.

RODRIGUES, Pedro Mateus Pimenta. **Avaliação do impacto de descargas atmosféricas em aerogeradores utilizando o ATP.** 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SALARI FILHO, João Clavio. **Efeito das descargas atmosféricas no desempenho de linhas de transmissão–modelagens nos domínios do tempo e da frequência.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese, 2006.

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, Márcio Severino da. **Análise de desempenho de redes de distribuição monofilares com retorno pela terra (mrt) frente a descargas atmosféricas**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVÉRIO VISACRO F. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. Artliber, 2005.

SIMENS AG; Catálogo: **Medium-voltage surge arresters**. USA, 2021, 94 páginas.

SANGUANINI, Juliana. **Efeitos de descargas atmosféricas indiretas em redes de distribuição com topologia complexa**. 2022.

SOARES, Dywles de Souza et al. **Gerenciamento de risco: estudo de caso em edificações para verificar a necessidade de aplicação de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)**. 2023.

SOUSA, Rafael Oliveira de et al. **Uma nova técnica de lavagem de isoladores da rede elétrica de distribuição**. 2010.

THOMAZELLA, Rogério. **Implementação computacional para avaliar os níveis de sobretensões atmosféricas induzidas em linhas de distribuição**. 2004.

VISACRO, S.; SOARES Jr., A. **HEM: A Model for Simulation of Lighting Related Engineering Problems**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, nº 2, 2005.