

TAIANE PEREIRA DOS REIS

**Análise das Sobretensões Máximas de Origem Atmosférica  
Conduzidas nas Redes de Distribuição de Baixa Tensão**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Raizer  
Coorientador: Prof. Dr. Vilson Luiz Coelho

Florianópolis  
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

DOS REIS, TAIANE PEREIRA

Análise das Sobretensões Máximas de Origem Atmosférica Conduzidas nas Redes de Distribuição de Baixa Tensão / TAIANE PEREIRA DOS REIS ; orientador, Adroaldo Raizer, coorientador, Vilson Luiz Coelho, 2019.

113 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

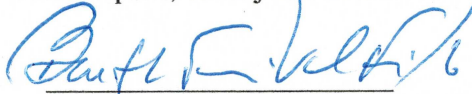
1. Engenharia Elétrica. 2. Descargas Atmosféricas. 3. Redes de Distribuição. 4. Sobretensões. 5. Proteção. I. Raizer, Adroaldo. II. Coelho, Vilson Luiz. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

TAIANE PEREIRA DOS REIS

**Análise das Sobretensões Máximas de Origem Atmosférica  
Conduzidas nas Redes de Distribuição de Baixa Tensão**

Esta Dissertação/Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 05 de julho de 2019.



Prof. Bartolomeu Ferreira Uchoa-Filho, Dr.

Coordenador do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

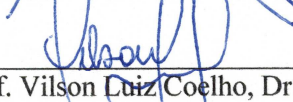


---

Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



---

Prof. Vilson Luiz Coelho, Dr.

Coorientador

Faculdade SATC

**Banca Examinadora:**

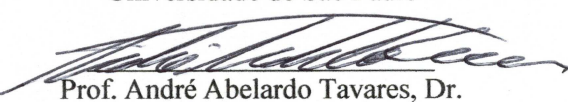


---

Prof. Alexandre Piantini Dr.

Instituto de Energia e Ambiente

Universidade de São Paulo



---

Prof. André Abelardo Tavares, Dr.

Faculdade SATC



---

Prof. Miguel Moreto, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



À minha família, que sempre me incentivou e acreditou em mim quando nem eu mesma acreditava.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus e aos meus pais, Itamar dos Reis e Olindina Pereira dos Reis, pela vida, confiança e por sempre me incentivar e acreditar em mim, mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos meus irmãos, Tamara Pereira dos Reis, Tairine Pereira dos Reis e Itamar dos Reis Júnior, pelo companheirismo de vida.

Ao meu namorado, Aurélio Paranhos Padilha, por sua compreensão e companheirismo durante essa trajetória.

Ao pessoal do MagLab/GEMCO, por todo suporte e auxílio para superar as adversidades, em especial as amigas que construí durante o período do mestrado, Joana Ventura da Silva, Kassia Toccolini e Larissa Rosa Ávila.

Ao meu orientador, Prof. Adroaldo Raizer, pela oportunidade, conhecimento e auxílio.

Ao meu coorientador, Prof. Vilson Luiz Coelho, que não mediu esforços para obtermos êxito neste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela presteza e atenção no exercício de suas funções.





A persistência é o caminho do êxito.  
(Charles Chaplin)



## RESUMO

Estudos apontam que, aproximadamente, 100 milhões de descargas atmosféricas atingem o solo brasileiro por ano, acarretando prejuízos tanto para as concessionárias de energia quanto para os consumidores. Em períodos críticos, com grande atividade atmosférica, ocorre aumento significativo das reclamações de consumidores, em função dos elevados índices de interrupção e das frequentes avarias em equipamentos e instalações elétricas e conseqüentemente pedidos de indenização que nem sempre são avaliados adequadamente. Este trabalho tem como principal objetivo mostrar os reais níveis de sobretensão, provenientes de descargas atmosféricas, que podem ocorrer nas instalações elétricas de baixa tensão, de forma a subsidiar a tomada de decisão quanto às reais causas de avarias de equipamentos. Para isso, foram utilizados dados de pesquisas anteriores, fontes bibliográficas recentes e normas brasileiras e de concessionárias, de forma a desenvolver modelos que sejam o mais representativos possível em simulações no programa computacional *ATPDraw*. Foram realizadas mais de 1000 simulações formando um acervo de dados que permitiu o desenvolvimento de um método analítico para cálculo das máximas sobretensões que podem ocorrer nas instalações elétricas de baixa tensão. Estes resultados permitiram a elaboração de gráficos de probabilidade acumulada de ocorrência de sobretensões máximas nas instalações de baixa tensão, provenientes de descargas diretas na rede de média tensão e descargas diretas na rede de baixa tensão em diversos tipos de redes e condições de resistividade do solo. Os resultados indicam, que na grande maioria dos casos, avarias de equipamentos podem ser evitadas pelo uso adequado de dispositivos supressores de surto.

**Palavras-chave:** Descargas Atmosféricas. Redes de Distribuição. Sobretensões. Proteção.



## ABSTRACT

Studies indicate that approximately 100 million lightning flashes reach Brazilian soil per year, causing damages to both energy utilities and consumers. In critical periods, with great atmospheric activity, there is a significant increase in consumer complaints, due to high interruption rates and frequent fails in electrical equipment and installations and consequently claims for damages that are not always properly evaluated. This work has as main objective to show the actual levels of lightning overvoltage, which can occur in the low voltage electrical installations, in order to subsidize the decision making regarding the real causes of equipment malfunctions. Therefore, data from previous researches, recent bibliographic sources and Brazilian and concessionaire standards were used, in order to develop models that are as representative as possible in simulations in the ATPDraw computer program. More than 1000 simulations were run out, forming a data collection that allowed the development of an analytical method to calculate the maximum overvoltages that can occur in low voltage electrical installations. These results allowed the elaboration of graphs of occurrence cumulative probability of maximum overvoltages in the low voltage installations, from direct strokes in the medium and low voltage lines in several types of lines and soil resistivity conditions. The results indicate that, in the vast majority of cases, equipment malfunctions can be avoided by the proper use of surge protector devices.

**Keywords:** Lightning. Distribution Lines. Overvoltage. Protection.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de descargas mais comuns. ....	34
Figura 2 – Mapa de densidade de descargas. ....	35
Figura 3 – Forma de onda típica de descarga de retorno.....	36
Figura 4 – Esquema de rede a dois condutores e respectiva imagem no solo. ....	43
Figura 5 – Modelo eletro-geométrico.....	44
Figura 6 – Instalação típica de para-raios ZnO. ....	50
Figura 7 – Isoladores tipo pilar. ....	51
Figura 8 – Isolador tipo roldana de porcelana. ....	52
Figura 9 – Dispositivo de proteção Contra Surtos.....	54
Figura 10 – Haste de aterramento aço-cobre.....	55
Figura 11 – Instalação típica aterramento com hastes alinhadas. ....	55
Figura 12 – Modelo de rede de média tensão.....	59
Figura 13 – Modelo de rede de baixa tensão.....	60
Figura 14 – Visão geral da rede MT e BT (simétrica). ....	61
Figura 15 – Modelo de transformador para análise de transferência de surto.....	61
Figura 16 – Simbologia do resistor variável dependente da corrente....	62
Figura 17 – Janela de entrada de dados: curva de $IxV$ .....	63
Figura 18 – Curva de $IxV$ do para-raios. ....	64
Figura 19 – Curva de $IxV$ do DPS. ....	64
Figura 20 – Entrada de dados dos cabos (Parte I). ....	65
Figura 21 – Entrada de dados dos cabos (Parte II). ....	66
Figura 22 – Representação do circuito equivalente do poste de concreto para uma rede de média tensão: (a) sem neutro e (b) com neutro ou rede mista. ....	68
Figura 23 – Blocos representativos do conjunto: cabos condutores, isoladores, aterramento e circuito elétrico equivalente dos postes: (a) Instalação de rede MT e BT com neutro. (b) Instalação de rede MT e BT com neutro aterrado. (c) Instalação de rede MT sem neutro. ....	72
Figura 24 – Circuito equivalente à carga.....	72
Figura 25 – Localização das fontes de corrente rede MT.....	75
Figura 26 – Localização das fontes de corrente rede BT. ....	76
Figura 27 – Componente de injeção de surto. ....	76
Figura 28 – Entrada de dados da fonte Heidler. ....	77
Figura 29 – Forma de onda do impulso atmosférico direto.....	78
Figura 30 – Tensão nos isoladores: Resistividade: 1000 $\Omega$ .m; MT/SN.82	
Figura 31 – Tensão nos isoladores: Resistividade: 1000 $\Omega$ .m; MT/CN.82	

Figura 32 – Tensão nos isoladores: Resistividade: 1000 $\Omega$ .m; MT/CNc. .....	83
Figura 33 – Tensão nos isoladores: Corrente 40 kA; MT/SN.....	84
Figura 34 – Tensão nos isoladores: Corrente 40 kA; MT/CN. ....	85
Figura 35 – Tensão nos isoladores: Corrente 40 kA; MT/CNc.....	85
Figura 36 – Corrente na rede: Resistividade: 1000 $\Omega$ .m; MT/SN.....	87
Figura 37 – Corrente na rede: Resistividade: 1000 $\Omega$ .m; MT/CN. ....	87
Figura 38 – Corrente na rede: Resistividade: 1000 $\Omega$ .m; MT/CNc.....	88
Figura 39 – Corrente na rede: Corrente 40 kA; MT/SN.....	88
Figura 40 – Corrente na rede: Corrente 40 kA; MT/CN. ....	89
Figura 41 – Corrente na rede: Corrente 40 kA; MT/CNc. ....	89
Figura 42 – Tensão máxima na instalação consumidora: DA Direta na rede BT. ....	91
Figura 43 – Tensão máxima: Secundário do TD.....	91
Figura 44 – Formas de onda de tensão em função do tempo nos consumidores. ....	92
Figura 45 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT SN – 100 $\Omega$ .m.....	93
Figura 46 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT SN – 500 $\Omega$ .m.....	94
Figura 47 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT SN – 1000 $\Omega$ .m.....	94
Figura 48 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CN – 100 $\Omega$ .m. ....	95
Figura 49 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CN – 500 $\Omega$ .m. ....	95
Figura 50 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CN – 1000 $\Omega$ .m. ....	96
Figura 51 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CNc – 500 $\Omega$ .m. ....	96
Figura 52 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CNc – 1000 $\Omega$ .m. ....	97
Figura 53 – Comparação de Tensões simuladas e calculadas – Rede MT/SN; 500 $\Omega$ .m; Distância do TD: 525 m.....	99
Figura 54 – Comparação de Tensões simuladas e calculadas – Rede MT/CN; 500 $\Omega$ .m; Distância do TD: 525 m.. ....	99
Figura 55 – Comparação de Tensões simuladas e calculadas – Rede BT. .....	101
Figura 56 – Área de atração do circuito BT.....	102
Figura 57 – Área de atração do circuito MT.....	102



Figura 58 – Probabilidade Acumulada (%): Sobretensões Máximas Instalações BT – Rede MT <sub>SN</sub> .....	103
Figura 59 – Probabilidade Acumulada (%): Sobretensões Máximas Instalações BT – Rede MT <sub>CN</sub> .....	104
Figura 60 – Probabilidade Acumulada (%): Sobretensões Máximas Instalações BT – Rede BT .....	104



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características da corrente: Primeira descarga negativa, Monte San Salvatore. ....	39
Tabela 2 – Características da corrente: primeira descarga negativa, Morro do Cachimbo. ....	39
Tabela 3 – Níveis de isolamento para as redes de distribuição. ....	48
Tabela 4 – Distâncias mínimas em pontos fixos. ....	48
Tabela 5 – Distância vertical mínima. ....	49
Tabela 6 – Distância entre condutores e o solo. ....	49
Tabela 7 – Níveis de Isolamento dos Transformadores. ....	50
Tabela 8 – Características dos para-raios. ....	50
Tabela 9 – Características dos isoladores de rede de média tensão. ....	51
Tabela 10 – Características dos isoladores tipo roldana. ....	52
Tabela 11 – Características dos condutores de alumínio CA. ....	53
Tabela 12 – Características dos condutores de alumínio CAA (I). ....	53
Tabela 13 – Características dos condutores de alumínio CAA (II). ....	54
Tabela 14 – Parâmetros do transformador modelo. ....	62
Tabela 15 – Valores da curva de $I \times V$ do para-raios. ....	63
Tabela 16 – Valores da curva de $I \times V$ do DPS. ....	64
Tabela 17 – Valores de impedância do poste. ....	69
Tabela 18 – Valores de resistência de aterramento do poste. ....	69
Tabela 19 – Parâmetros adequados para obter as curvas de tensão-tempo de cinco formas de onda de impulso para classe de isolamento e polaridade. ....	71
Tabela 20 – Valores de tensão disruptiva (kV). ....	71
Tabela 21 – Parâmetros do modelo de carga consumidora. ....	73
Tabela 22 – Resistência de aterramento da haste vertical dos consumidores. ....	73
Tabela 23 – Informações dos aterramentos da rede de distribuição. ....	74
Tabela 24 – Forma de onda do impulso de corrente para cada valor de pico. ....	78
Tabela 25 – Valores de tensão no vão do transformador. ....	86
Tabela 26 – Valores de tensão e corrente no vão do transformador. ....	90
Tabela 27 – Valores de $\beta$ para rede MT/SN. ....	98
Tabela 28 – Valores de $\beta$ para rede MT/CN e MT/CNc. ....	98
Tabela 29 – Erros percentuais e Correlação cálculos. ....	100
Tabela 30 – Erros percentuais e Correlação BT. ....	100
Tabela 31 – Faixas mínimas de tensão suportável de impulso. ....	105



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	- Baixa Tensão
CAA	- Cabo de alumínio com alma de aço
CA	- Cabo de alumínio
CN	- Com neutro
c	- Índice de compensação de número de aterramentos na rede MT ou BT.
DA	- Descarga Atmosférica
EGM	- Modelo Eletrogeométrico
MT	- Média Tensão
SN	- Sem neutro
TD	- Transformador de Distribuição



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	27
1.2	JUSTIFICATIVA.....	28
1.3	OBJETIVOS .....	30
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>30</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>30</b>
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	30
<b>2</b>	<b>DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....</b>	<b>33</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	33
2.2	TIPOS DE DESCARGAS.....	33
2.3	PARÂMETROS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS ...	34
<b>2.3.1</b>	<b>Densidade de Descargas.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Forma de Onda.....</b>	<b>36</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Características da Primeira Descarga de Retorno Negativa</b>	<b>38</b>
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
<b>3</b>	<b>INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</b>	
<b>EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO .....</b>		<b>41</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	41
3.2	DESCARGAS DIRETAS .....	41
<b>3.2.1</b>	<b>Cálculo da Tensão .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Cálculo da Impedância de Surto.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Distância de Atração.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Blindagem Devido a Edificações e Florestas.....</b>	<b>44</b>
3.3	DESCARGAS INDIRETAS .....	45
3.4	CÁLCULO DA TENSÃO DISRUPTIVA NO ISOLADOR	45
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
<b>4</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE</b>	
<b>DISTRIBUIÇÃO .....</b>		<b>47</b>

4.1	INTRODUÇÃO .....	47
4.2	CARACTERÍSTICAS DAS REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO .....	47
4.2.1	Nível de Isolamento.....	47
4.2.2	Afastamentos Mínimos .....	48
4.3	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS .....	49
4.3.1	Transformador de Distribuição.....	49
4.3.2	Para-raios .....	50
4.3.3	Isoladores.....	51
4.3.4	Postes.....	52
4.3.5	Condutores .....	53
4.3.6	Dispositivo de Proteção contra Surtos .....	54
4.3.7	Sistemas de Aterramento .....	55
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	56
5	MODELAGEM E SIMULAÇÃO .....	57
5.1	INTRODUÇÃO .....	57
5.2	FERRAMENTAS DE CÁLCULO E SIMULAÇÃO .....	57
5.2.1	<i>ATPDraw</i> .....	57
5.2.2	<b>MATLAB</b> .....	58
5.2.3	<b>Excel</b> .....	58
5.3	MODELAGEM .....	58
5.3.1	<b>Características das Redes e Estruturas</b> .....	58
5.3.1.1	Rede de Média Tensão.....	58
5.3.1.2	Rede de Baixa Tensão.....	59
5.3.1.3	Transformador de Distribuição .....	61
5.3.1.4	Para-raios e Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS) ..	62
5.3.1.5	Modelo <i>JMARTI</i> .....	65
5.3.1.6	Postes .....	66
5.3.1.7	Isoladores .....	70



5.3.1.8	Instalação Consumidora.....	72
5.3.1.9	Sistemas de Aterramento.....	73
<b>5.3.2</b>	<b>Condições de Simulação .....</b>	<b>75</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Corrente da Descarga de Retorno .....</b>	<b>76</b>
5.3.3.1	Forma de Onda das Descargas Diretas.....	77
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>81</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	81
6.2	DADOS COMPUTACIONAIS DAS SIMULAÇÕES.....	81
6.3	ATENUAÇÃO DA TENSÃO E CORRENTE AO LONGO DA REDE DE MÉDIA TENSÃO.....	81
<b>6.3.1</b>	<b>Comportamento da Tensão ao Longo da Rede MT .....</b>	<b>81</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Comportamento da Corrente ao Longo da Rede MT.....</b>	<b>86</b>
6.4	TENSÕES MÁXIMAS NAS INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS PROVENIENTES DE DESCARGAS DIRETAS NA BT	90
<b>6.4.1</b>	<b>Tensões Máximas nas Instalações Consumidoras .....</b>	<b>90</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Tensões Máximas no Secundário do TD .....</b>	<b>91</b>
6.5	TENSÕES MÁXIMAS NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS PROVENIENTES DE DESCARGAS NA MÉDIA TENSÃO.....	92
6.6	EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA ESTIMATIVA DOS VALORES DE SOBRETENSÕES MÁXIMAS EM INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS.....	97
6.7	CÁLCULOS DAS PROBABILIDADES ACUMULADAS DE OCORRÊNCIA DE SOBRETENSÕES.....	101
6.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	105
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES .....</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>109</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Com o passar dos anos, a energia elétrica tornou-se indispensável à população. Atualmente é sinônimo de conforto, segurança e qualidade de vida. O que faz com que os consumidores tenham mais exigências quanto à sua qualidade [1].

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) a qualidade de energia é composta da qualidade do produto, da qualidade do serviço e da qualidade do atendimento.

A qualidade do atendimento está relacionada à satisfação dos consumidores quanto ao atendimento e nível de cumprimento das obrigações das concessionárias de energia. A qualidade do produto refere-se a desvios que possam ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica. A qualidade do serviço que está diretamente associada à continuidade de fornecimento da energia, é hoje a principal causa de reclamações de consumidores, sejam eles: residenciais, comerciais ou industriais [2] [3].

As interrupções de fornecimento que ocorrem nos sistemas elétricos podem ser classificadas como programadas ou acidentais. As interrupções acidentais, por sua vez, podem ser temporárias ou permanentes, no caso de o tempo de desligamento superar 3 minutos.

Eventos não programados podem ser originados por diferentes agentes: intempéries da natureza (tempestades, ventos, descargas atmosféricas), acidentes de modo geral (automobilísticos, aéreos, entre outros) ou falhas operacionais e de funcionamento dos equipamentos. Entretanto, quaisquer destas possibilidades podem resultar em surtos na distribuição de energia que alteram os níveis padronizados de tensão e corrente, por serem caracterizados como uma onda transitória de tensão e/ou corrente. Considerando que os surtos apresentam uma elevada variação de valores em um curto espaço de tempo, os equipamentos tornam-se vulneráveis a este fenômeno, seja ele conduzido ou radiado. As ocorrências mais severas estão relacionadas a descargas atmosféricas, que podem ocasionar danos aos equipamentos, como a redução da sua vida útil, ou ainda a sua total avaria [4].

Os custos decorrentes de interrupções de fornecimento atingem tanto consumidores quanto as concessionárias de energia. As concessionárias têm perda de faturamento, avarias de equipamentos e as despesas relativas aos atendimentos de emergência. Os consumidores são fortemente atingidos pelas faltas de energia, ficam impedidos de

trabalhar, podem ter perda de produção, produtos e equipamentos. Os custos provenientes destas faltas, conhecidos como custo social, podem ser elevados. Segundo estudo realizado em concessionária brasileira, o custo social está em torno de 10 vezes o custo da perda do faturamento da concessionária [5].

As grandes concessionárias do Sul do Brasil têm apresentado dificuldade de manter os índices de continuidade de fornecimento dentro dos patamares estabelecidos pela ANEEL. Assim, estudos para recomendar melhorias nos sistemas elétricos devem ser realizados com frequência em concessionárias, tais como medidas preventivas contra surtos que possam ocorrer nas redes de distribuição e serem transmitidos às instalações elétricas de BT (Baixa Tensão). Isto porque, a ANEEL determina que todo prejuízo proveniente de surtos conduzidos, deve ser ressarcido aos consumidores [2] [4].

Considerando o exposto, entende-se ser de grande importância e urgência, a realização de estudos que identifiquem os reais níveis de sobretensão que podem ocorrer nas redes elétricas de baixa tensão, e comparar aos níveis de suportabilidade definidos nas normas brasileiras.

Para fins de estimativa das máximas sobretensões conduzidas em sistemas de baixa tensão utilizou-se o programa computacional *ATPDraw* [6], para a realização de simulações de diferentes configurações e situações passíveis de ocorrer. Para a confiabilidade dos resultados das simulações, procurou-se modelar os componentes da forma mais próxima possível da condição real de operação do material ou equipamento.

Este trabalho tem como principal contribuição a definição dos níveis máximos de tensão que podem ocorrer nas instalações consumidoras de BT. Para subsidiar estudos futuros procurou-se apresentar os resultados em forma de gráficos de probabilidade acumulada de ocorrência de sobretensões máximas oriundas de descargas diretas nas redes MT (Média Tensão) e BT.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil é um país extenso que apresenta regiões distintas em aspectos climáticos, embora possua um clima, predominante, tropical. Em meses de verão, em determinadas regiões, ou em períodos próximos as mudanças de estações, em outras, o número de tempestades se eleva, o que proporciona o aumento do número de descargas que atingem as regiões. Considerando que a grande maioria das redes de distribuição são aéreas, estas ficam vulneráveis a ação das descargas atmosféricas

que podem ser diretas nas redes ou que atingem pontos próximos as mesmas [4] [7].

A regulamentação das concessionárias se dá com a assinatura do contrato de concessão com a ANEEL. Por meio de resoluções são definidos os padrões mínimos de qualidade que devem ser adotados por estas concessionárias. Dentre estas resoluções [2], está determinado que qualquer dano em uma instalação elétrica, com tensão nominal inferior a 2,3 kV, gerado por uma instabilidade proveniente da rede elétrica da concessionária, deve ser ressarcido ao consumidor pela concessionária, o que gera a responsabilidade da concessionária de prevenção aos impactos que podem ser proporcionados por descargas atmosféricas.

Em períodos críticos, com grande atividade atmosférica, ocorre o aumento significativo das reclamações de consumidores, em função dos elevados índices de interrupção e das frequentes avarias em equipamentos e instalações elétricas [5]. Atualmente existem muitos questionamentos a respeito da origem da avaria dos equipamentos, pois em muitas situações elas podem ocorrer devido a descargas diretas nas próprias edificações ou por tensões induzidas por descargas próximas, que podem não ter sido conduzidas pelas redes de distribuição [4].

A vulnerabilidade das redes de distribuição frente às perturbações ocasionadas por descargas atmosféricas é tema de pesquisas ao longo dos anos. Os surtos provocados por descargas atmosféricas podem ser conduzidos às instalações elétricas de BT, contribuindo significativamente para o aumento dos pedidos de ressarcimento de danos por parte de consumidores provocados pela variação dos padrões de tensões nominais das redes de distribuição. Além disso, o crescente aumento de equipamentos mais sensíveis às sobretensões exige um aumento constante da eficiência das proteções [8].

A necessidade de proteger os equipamentos eletrônicos mais sensíveis a interferências, fez com que novos padrões de qualidade de energia fossem adotados. Desta forma, os estudos pertinentes aos distúrbios ocasionados por descargas atmosféricas, em redes de distribuição aumentaram junto com a evolução da tecnologia [9].

Conhecer o comportamento das sobretensões, em geral, tem grande importância para a melhoria da proteção das redes de distribuição de média e baixa tensão e, conseqüentemente, da qualidade de energia, visto que os surtos podem alcançar elevadas amplitudes e contribuir para números elevados de ocorrências [7] [10]. O conhecimento dos níveis máximos de sobretensões pode contribuir, também, para a tomada de decisão em processos de ressarcimento de

danos. Tal condição é do interesse tanto do consumidor quanto da concessionária.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo geral

Analisar as sobretensões máximas de origem atmosférica conduzidas nas redes de baixa tensão dos sistemas de distribuição.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Levantar características dos sistemas de distribuição de média e baixa tensão.

Modelar adequadamente os materiais e equipamentos dos sistemas de distribuição para fins de simulações em *ATPDraw*.

Determinar através de simulações e cálculos analíticos as sobretensões máximas passíveis de ocorrer nos sistemas de baixa tensão.

Desenvolver metodologia de cálculo simplificada para estimar sobretensões máximas em função das características dos sistemas BT.

Apresentar estudo de probabilidade de ocorrências de sobretensões em instalações consumidoras de BT.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Para maior clareza na apresentação deste estudo estruturou-se o texto da seguinte forma:

O primeiro capítulo apresenta uma introdução e contextualização do cenário brasileiro frente às descargas atmosféricas, além da justificativa da execução deste trabalho e seus objetivos.

O segundo capítulo é resultado do estudo do estado da arte e fundamentação teórica, apresentando uma breve descrição do fenômeno descarga atmosférica.

O terceiro capítulo mostra a influência das descargas atmosféricas nas redes de distribuição, conforme os resultados das pesquisas bibliográficas realizadas.

O capítulo 4 retrata o detalhamento das redes de distribuição utilizadas na região sul do Brasil de acordo com as normas técnicas e manuais de concessionárias.

No capítulo 5, são apresentadas as definições dos parâmetros de simulação, a modelagem das descargas atmosféricas, dos equipamentos e das redes de distribuição, e, ainda, são expostos os cenários de simulação considerados para esta pesquisa.

O capítulo 6 apresenta os resultados com suas respectivas análises, de forma a subsidiar conclusões e recomendações que estão descritas no capítulo 7.





## 2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

### 2.1 INTRODUÇÃO

A extensão territorial, a localização geográfica e algumas outras considerações físicas e climatológicas fazem do Brasil, um dos países com maior incidência de descargas atmosféricas. Recentemente, pesquisas revelaram que cerca de 100 milhões de descargas atingem o solo brasileiro por ano. Ocasionalmente transtornos ambientais, prejuízos para o sistema de telecomunicações, colapsos em sistemas elétricos e, ainda, risco de vida aos seres humanos e animais [11].

A descarga atmosférica é um evento provocado pela natureza, o qual não é possível prever ou controlar. O fenômeno de ocorrência de uma descarga atmosférica pode ser descrito pelo surgimento de uma corrente muito elevada, a partir do rompimento da isolação do ar entre duas superfícies eletricamente carregadas com polaridades opostas. É um fenômeno de curta duração e o percurso é de alguns quilômetros, partindo de uma nuvem e, eventualmente, atingindo a superfície terrestre [1] [12].

As descargas geralmente ocorrem durante tempestades e dentre os tipos mais comuns, as descargas nuvem-solo são as que mais interferem no desempenho de redes e linhas elétricas. Entretanto, durante uma tempestade as interrupções podem também ser ocasionadas por ventos, árvores e falhas de equipamentos [13].

### 2.2 TIPOS DE DESCARGAS

Os tipos mais comuns de descargas são as descargas nuvem-solo, entre nuvens, nuvem ar e a intra-nuvem, conforme exemplificado na Figura 1.

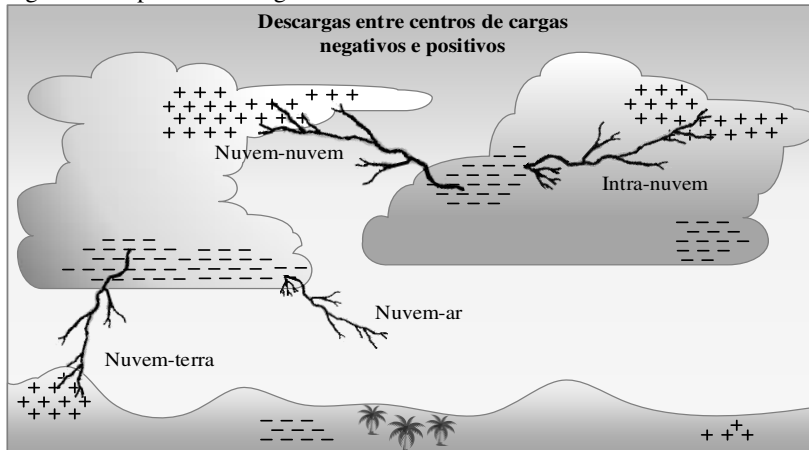
As nuvens possuem centros de cargas com polaridades diferentes e é desta forma que ocorrem as descargas intra-nuvem. As descargas inter-nuvens, ocorrem entre centros de cargas de nuvens diferentes. Estes fenômenos juntos somam 70% das ocorrências de descargas atmosféricas. As tempestades podem apresentar números relacionados de descargas intra-nuvem e nuvem-solo com variações significativas e os motivos de ocorrência não são completamente compreendidos [4] [13].

As descargas que atingem o solo são, em sua maioria, de polaridade negativa. Descargas de polaridade positiva ocorrem, geralmente, no final das tempestades ou em meses de inverno. Em termos de sentido de propagação as descargas podem ser descendentes

ou ascendentes. Descargas ascendentes ocorrem em estruturas muito altas, normalmente em topos de montanhas e envolvem baixos níveis de corrente [4] [14].

Em relação à descarga nuvem-ar, classificam-se as descargas que se originam na nuvem e terminam no ar que circunda a tempestade [15].

Figura 1 – Tipos de descargas mais comuns.



Fonte: Adaptado de [4].

### 2.3 PARÂMETROS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Conhecer os parâmetros e a frequência de ocorrência das descargas atmosféricas tem grande importância para a melhoria da proteção das redes de média e baixa tensão e, conseqüentemente, da qualidade de energia, visto que, os surtos podem alcançar elevadas amplitudes [4] [5].

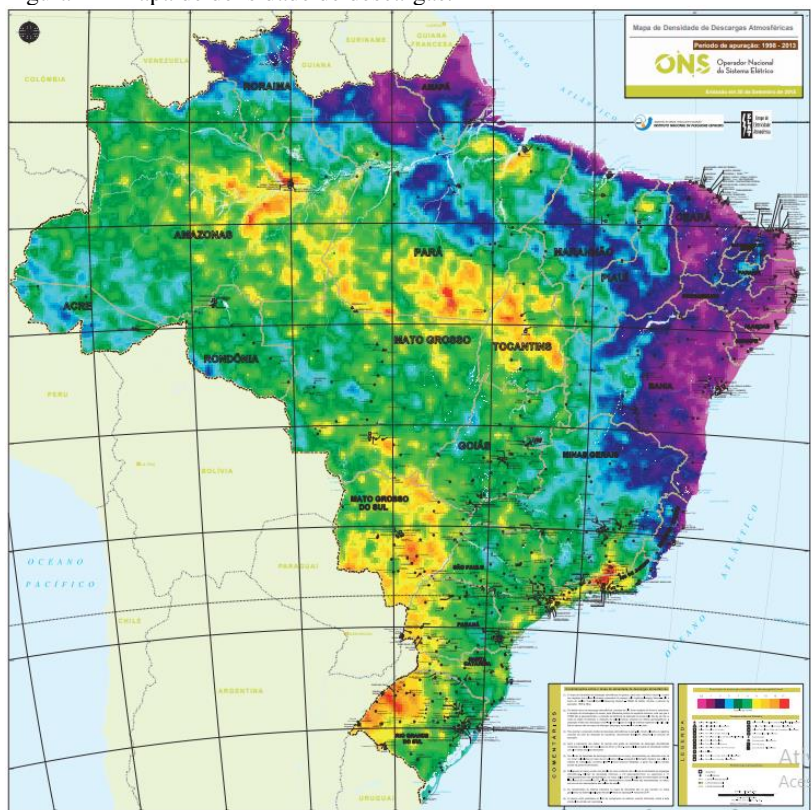
Os principais parâmetros para o dimensionamento de equipamentos de redes de distribuição são: a energia específica e a corrente da descarga de retorno. A corrente de retorno é caracterizada pela forma de onda e valor de pico da corrente. O tempo de frente ( $t_f$ ) e o tempo que a corrente leva para atingir 50% do seu valor de pico, tempo de cauda ( $t_h$ ), definem a forma de onda. A partir desses parâmetros é possível determinar as máximas tensões que podem ocorrer em um equipamento ou rede, definindo a suportabilidade destes frente aos surtos. A energia específica de uma descarga atmosférica representa a energia transferida à rede ou equipamento e é essencial para dimensionar a proteção das redes, principalmente de para-raios [4].

Para o cálculo das tensões induzidas por descargas que caem próximas as redes de distribuição, a velocidade de propagação da corrente de retorno também é um parâmetro importante [4] [13].

### 2.3.1 Densidade de Descargas

Na Figura 2 apresenta-se o mapa de densidade de descargas adotado pelo setor elétrico para o território brasileiro.

Figura 2 – Mapa de densidade de descargas.



Fonte: [16].

A confiabilidade de uma rede de distribuição depende da sua exposição a descargas atmosféricas, pois o número de desligamentos não programados está relacionado com a frequência de ocorrência das descargas em uma região. Um fator importante para os cálculos de severidade de ações das descargas atmosféricas em sistemas elétricos é a densidade de descargas. Identificado por,  $N_g$  ou  $GFD$ , do inglês *Ground*

*Flash Density*, este índice representa o número de descargas nuvem-solo por  $\text{km}^2$  por ano [4] [13].

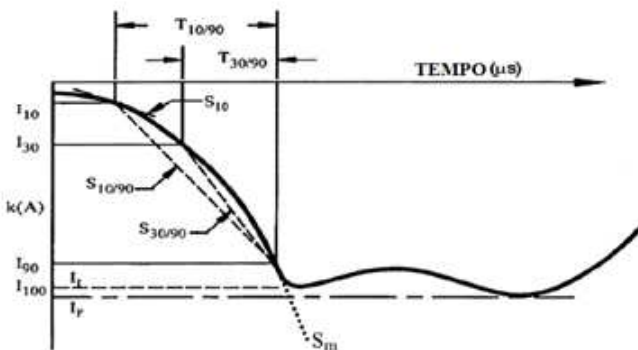
De um ano para outro a variação da densidade de descargas em uma região é significativa. Desta forma, para obter dados confiáveis, os índices de densidade de descargas utilizados em estudos são valores médios coletados por vários anos. Nos últimos anos tem sido realizado o mapeamento das descargas em diversas regiões do mundo utilizando sistemas de detecção em tempo real. Alguns países já contam com a cobertura territorial completa por tais sistemas. No caso do Brasil a cobertura é parcial, mas estima-se que ocorra a queda de cerca de 100 milhões de descargas nuvem-solo por ano. As regiões Sudeste, Centro-Oeste e Sul do Brasil, possuem centros de monitoramento e pesquisas [4].

### 2.3.2 Forma de Onda

Estudos comprovam que 90% das descargas possuem polaridade negativa [13] e a forma de onda típica da primeira descarga de retorno pode ser observada na Figura 3.

As correntes de surtos que atingem as redes de distribuição são como fontes de corrente e as quedas de descargas diretas em cabos condutores possuem a mesma forma de onda da corrente de retorno [13] [14].

Figura 3 – Forma de onda típica de descarga de retorno.



Fonte: [13].

onde:

- $I_1$  é o valor inicial da corrente de pico que determina o tempo de frente de onda;

- $I_F$  é o valor do final do pico da corrente que determina a amplitude da onda;
- $I_{10}$ ,  $I_{30}$  e  $I_{90}$  são valores referentes a 10, 30 e 90% de  $I_F$ ;
- $T_{10/90}$  é o tempo entre os valores de corrente  $I_{10}$  e  $I_{90}$ ;
- $T_{30/90}$  é o tempo entre os valores de corrente  $I_{30}$  e  $I_{90}$ ;
- $S_{10}$  é a taxa de subida instantânea de corrente em  $I_{10}$ ;
- $S_{10/90}$  é a taxa de crescimento médio da corrente entre os valores  $I_{10}$  e  $I_{90}$ ;
- $S_{30/90}$  é a taxa de crescimento médio da corrente entre os valores de  $I_{30}$  e  $I_{90}$ ; e
- $S_m$  é a taxa máxima de subida da corrente ao longo da frente de onda, tipicamente em  $I_{90}$ .

A magnitude do pico de uma sobretensão está relacionada com a máxima inclinação de  $S_m$  e a sua duração está relacionada a  $T_{10-90}$  [4] [13] [14].

Com os dados estudados ao longo dos anos foi possível verificar que a variação estatística dos parâmetros de descargas atmosféricas tem distribuição log-normal e a equação geral de definição está apresentada abaixo [13] [14].

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} e^{\left(-\frac{z}{2}\right)} \quad (2.1)$$

onde, tem-se  $z = \left(\frac{\ln(x/M)}{\beta}\right)^2$ ,  $M$  como a mediana do parâmetro  $x$  e  $\beta$  é o desvio padrão logarítmico (base  $e$ ).

Assim, ao substituir  $x$  por  $i$ , a probabilidade de uma corrente de descarga exceder um valor determinado  $I_0$ ,  $P(I_0)$  pode ser calculado integrando  $p(i)$  com  $i$  variando de  $I_0$  a  $\infty$  ou a um valor máximo [4].

A necessidade de simplificações, principalmente para fins de simulações, faz com que diversas publicações proponham equações empíricas com intuito de representar a forma de onda da corrente de retorno da descarga. A equação de Heidler é a que tem obtido maior aceitação e está descrita abaixo [17]:

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{k_s^n}{1 + k_s^n} e^{-t/T_2} \quad (2.2)$$

onde,  $I_p$  é a corrente de pico,  $\eta$  o fator de correção da corrente de pico,  $k_s = t/T_1$ ,  $T_1$  e  $T_2$  são constantes que definem o tempo de subida e descida da corrente e  $n$  o fator de crescimento da corrente [17] [18].

A queda de uma descarga pode estar sujeita a descargas subsequentes, já que frequentemente descargas nuvem-solo são compostas por múltiplas descargas. Estudos mostram que as descargas subsequentes não possuem relação com o valor de pico da corrente da primeira descarga. Na literatura é possível obter valores e parâmetros que caracterizam as descargas de retorno, obtidos por meio de análises e coleta de dados por um longo período [4].

### **2.3.3 Características da Primeira Descarga de Retorno Negativa**

Os efeitos do impacto de uma descarga atmosférica são dependentes dos parâmetros de tempo da onda: tempo de frente de onda, tempo de meia onda e tempo de duração de uma descarga. Conforme mostra a Figura 3.

O tempo de frente de onda corresponde ao tempo que decorre entre o início da descarga até o momento que ela atinge o primeiro pico da onda. No entanto, o tempo de frente utilizado para parametrizar a forma de onda é chamado de tempo de frente efetivo que é calculado conforme a equação 2.4. Este tempo exerce influência sensível na amplitude da tensão induzida por descargas próximas e consequentemente no isolamento de sistemas elétricos e eletrônicos.

O tempo de meia onda corresponde ao tempo decorrido entre o momento inicial da onda e o instante em que a corrente, após ultrapassar o valor de pico, tem sua intensidade reduzida em 50% do seu valor máximo. O tempo total de uma descarga corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o momento inicial de uma descarga e momento que ela se anula [12].

O tempo total e o tempo de meia onda têm relação com a energia transferida ao equipamento ou instalação elétrica.

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros das descargas, importantes aos estudos de engenharia, obtidos a partir dos dados medidos no monte San Salvatore [17]. E na sequência os valores obtidos no Brasil (Morro do Cachimbo – MG), [19], apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Características da corrente: Primeira descarga negativa, Monte San Salvatore.

<b>Parâmetro</b>	<b>Número de Amostras</b>	<b>M</b>	<b><math>\beta</math></b>
$I_p$ [kA]	80	31,1	0,48
$T_{10}$ [ $\mu$ s]	80	4,5	0,58
$T_{30}$ [ $\mu$ s]	80	2,3	0,55
$t_{fe}$ [ $\mu$ s]	80	3,83	0,55
$t_h$ [ $\mu$ s]	90	77,5	0,58
$S_{10}$ [kA/ $\mu$ s]	75	5	0,64
$S_{30}$ [kA/ $\mu$ s]	73	7,2	0,62
$S_m$ [kA/ $\mu$ s]	75	24,3	0,6
$\rho_c(I_p, t_f)$	80	0,47	0,47

Fonte: [17].

O tempo de frente  $t_f$  equivale a  $T_{30/90}/0,6$ ,  $t_h$  representa o tempo de cauda,  $S_m$  é a máxima taxa de crescimento da corrente e  $\rho_c(I_p, t_f)$  é a correlação entre a corrente de pico e o tempo de frente de onda.

Tabela 2 – Características da corrente: primeira descarga negativa, Morro do Cachimbo.

<b>Parâmetro</b>	<b>M</b>
$I_p$ [kA]	45,3
$T_{10}$ [ $\mu$ s]	5,6
$T_{30}$ [ $\mu$ s]	2,9
$t_{fe}$ [ $\mu$ s]	4,8
$t_h$ [ $\mu$ s]	53,5
$S_{10}$ [kA/ $\mu$ s]	5,8
$S_{30}$ [kA/ $\mu$ s]	8,4
$S_m$ [kA/ $\mu$ s]	19,4

Fonte: [19].

Os valores apresentados na Tabela 1 permitiram que em [13] uma equação simplificada para o cálculo da probabilidade acumulada fosse apresentada:

$$P(I_0 \geq I_p) = \frac{1}{1 + (I_p/31)^{2,6}} \quad (2.3)$$

Esta equação apresenta a probabilidade de uma corrente de pico  $I_0$  ser igual ou maior a um determinado valor de  $I_p$  em kA e é aplicável a valores inferiores a 200 kA.

A seguinte equação permite efetuar o cálculo do tempo de frente efetivo da descarga:

$$t_{fe} = T_{30/90} / 0,6 \quad (2.4)$$

onde,  $T_{30}$  equivale ao tempo entre os valores de corrente  $I_{30}$  e  $I_{90}$ .

O tratamento estatístico de dados provenientes de medições diretas tem mostrado como resultado fortes correlações entre alguns parâmetros. Para os fins deste trabalho será considerada a correlação da taxa de crescimento da corrente ( $S_{30}$ ) com valores de pico da corrente de retorno, conforme equação 2.5.

$$S_{30} = 3,2I_p^{0,25} \quad (2.5)$$

onde:  $S_{30} = 0,6 I_p / T_{30/90}$ .

Desta forma, tem-se então a equação 2.6 para o cálculo do tempo de frente efetivo, quando considerada a taxa de crescimento da corrente ( $S_{30}$ ).

$$t_{fe} = 0,3125I_p^{0,25} \quad (2.6)$$

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo procurou-se apresentar a descrição do fenômeno descarga atmosférica, abordando a sua definição, uma breve descrição da sua formação, classificação e parâmetros principais. Estes parâmetros são utilizados como base para os desenvolvimentos matemáticos que permitem avaliar e conhecer o comportamento de uma descarga quando ocorre o impacto em uma rede de distribuição ou instalação elétrica. Assim, no capítulo 3, serão apresentadas de que forma as descargas atmosféricas influenciam e interferem no desempenho dos sistemas de distribuição.



### **3 INFLUÊNCIA DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Elevados níveis de sobretensões podem ocorrer quando descargas atmosféricas atingem diretamente a rede de distribuição ou pontos próximos a esta. Mesmo nos casos em que a sobretensão não é suficientemente elevada a ponto de provocar um desligamento, problemas podem ocorrer nas instalações de baixa tensão de consumidores em decorrência de sobretensões conduzidas através da rede de distribuição MT ou BT.

A seguir estão apresentadas metodologias de cálculo que permitem estimar valores de sobretensões em sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica, provocados por descargas atmosféricas diretas.

As tensões induzidas por descargas próximas as redes ocorrem com maior frequência, porém os valores apresentam-se inferiores aqueles provocados pelas descargas diretas, e por este motivo não serão analisadas neste estudo.

#### **3.2 DESCARGAS DIRETAS**

As descargas diretas em cabos condutores de redes de distribuição representam uma forma de interferência e geração de distúrbios ao sistema de potência, pois ao incidir em um cabo condutor os surtos atingem elevados níveis de tensão.

Estudos comprovam que o contato direto das descargas atmosféricas com cabos condutores desprotegidos de redes de distribuição é a maior causa de rompimento da isolação das estruturas e de interrupção de fornecimento, com desligamentos permanentes em grande parte das ocasiões. Eventos como estes contribuem para elevados valores de descontinuidade de fornecimento, devido às inúmeras dificuldades encontradas durante a restauração do fornecimento, acarretando custos e prejuízos [4] [20].

##### **3.2.1 Cálculo da Tensão**

Em condições de descargas diretas, a corrente se divide em duas direções, sendo possível obter o valor da tensão resultante por meio de um modelo matemático simples, conforme mostrado abaixo, apenas com os valores da impedância de surto ou impedância característica da rede e a corrente de pico da descarga atmosférica [13].

$$U = \frac{Z_0 \times I}{2} [kV] \quad (3.1)$$

onde, a impedância de surto da rede é  $Z_0$  em  $\Omega$  e a corrente de pico é  $I$  em kA.

### 3.2.2 Cálculo da Impedância de Surto

Na ocorrência de casos de altas frequências ou distúrbios ocasionados por descargas atmosféricas, a impedância de surto da rede é definida pela equação 3.2, visto que os parâmetros de resistência série e condutância paralela podem ser desprezados [4].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (3.2)$$

onde,  $L$  é a indutância e  $C$  é a capacitância externa da rede.

A indutância e a capacitância da rede dependem das características do cabo e da topologia da estrutura. Para um único condutor instalado paralelamente ao solo, considerando que a permeabilidade e a permissividade relativas do meio (ar) são iguais a 1 (um), o cálculo da indutância e da capacitância podem ser efetuados pelas equações 3.3 e 3.4 [4] [10] [13].

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) [H/m] \quad (3.3)$$

$$C = \frac{10^{-7}}{18 \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} [F/m] \quad (3.4)$$

onde,  $h$  é a altura do condutor em relação ao nível do solo e  $r$  é o raio do condutor, ambos em metros.

É possível obter uma simplificação da equação 3.2, quando 3.3 e 3.4 são substituídos e assim obtém-se a equação 3.5, para uma rede com um condutor paralelo ao solo.

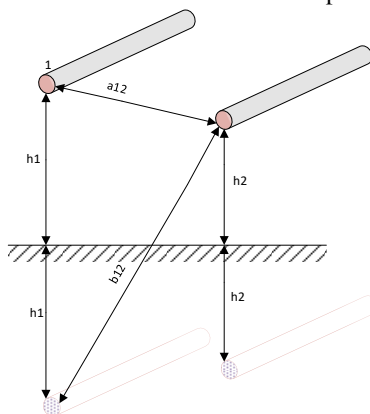
$$Z_0 = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) [\Omega] \quad (3.5)$$

onde  $h$  é a altura do condutor em relação ao nível do solo e  $r$  é o raio do condutor, ambos em metros.

Para redes compostas por mais de um condutor, uma impedância de surto equivalente deve ser calculada. Para uma rede a

dois condutores, representada pela Figura 4, pode-se obter o valor da impedância equivalente por meio da equação 3.6.

Figura 4 – Esquema de rede a dois condutores e respectiva imagem no solo.



Fonte: Adaptado de [4].

$$Z_{0(2)} = \frac{1}{4} (Z_{11} + Z_{22} + 2Z_{12}) \text{ } [\Omega] \quad (3.6)$$

onde  $Z_{11}$  e  $Z_{22}$  são as impedâncias próprias e calculadas pela equação 3.5 e a impedância  $Z_{12}$  é a impedância mútua entre dois condutores, que é obtida por meio da equação 3.7.

$$Z_{12} = Z_{21} = 60 \ln \left( \frac{b_{12}}{a_{12}} \right) \text{ } [\Omega] \quad (3.7)$$

onde  $a_{12}$  é a distância entre os condutores 1 e 2 e  $b_{12}$  é a distância entre o condutor 2 e a imagem do condutor 1 ou vice-versa.

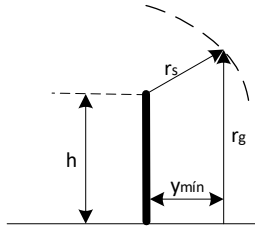
### 3.2.3 Distância de Atração

A característica construtiva das redes, com os cabos na posição horizontal, acima e paralelamente ao solo, permite que descargas que porventura atingiriam o solo sejam atraídas para os condutores. Desta forma, as metodologias de proteção de estruturas foram definidas a partir dos modelos de incidência, dentre os quais se destaca o *Modelo eletrogeométrico – EGM (Electric Geometric Model)*.

O EGM permite que seja calculada a distância de atração que este condutor exerce, fundamentado no conceito de raio de atração de um objeto que depende da sua altura e da amplitude da corrente de descarga, conforme apresentado na Figura 5. Admitindo que, caso tal

distância seja alcançada, a probabilidade de queda direta na estrutura é elevada [4] [12].

Figura 5 – Modelo eletro-geométrico.



Fonte: Adaptado de [4].

Por esta figura é possível observar que toda a descarga, que inicialmente atingiria um ponto localizado a uma distância menor ou igual a  $y_{min}$  irá atingir diretamente o condutor e quanto mais alta for a instalação dos cabos  $h$ , maior será a incidência de descargas diretas [4] [12].

As equações utilizadas para determinar  $y_{min}$ , distância mínima para qual uma descarga deixa de atingir o condutor, são:

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \text{ [m]} \quad (3.8)$$

$$r_s = \alpha I_0^\beta \text{ [m]} \quad (3.9)$$

$$r_g = K_g r_s \quad (3.10)$$

onde  $I_0$  é a amplitude da corrente da descarga (kA),  $r_s$  é o raio de atração do condutor e  $r_g$  é o raio de atração da terra.  $K_g$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são valores constantes. Em [13] são sugeridos 0,9, 10 e 0,65, respectivamente. Entretanto, no caso específico deste trabalho utilizou-se a equação 3.11 para o cálculo do  $K_g$ . [21].

$$K_g = 0,36 + 0,17 \ln(43 - h) \quad (3.11)$$

Esta equação é válida para estruturas com alturas iguais ou inferiores a 40 m [4].

### 3.2.4 Blindagem Devido a Edificações e Florestas

As redes localizadas em centros urbanos ou rurais possuem uma proteção natural. Árvores e edifícios de grande porte reduzem o número

de descargas diretas em redes de distribuição. O fator de blindagem é determinado pela altura e distância dos obstáculos utilizando-se o modelo eletro-geométrico.

Em redes rurais é incomum que se tenha influência de edificações. Por ser uma região destinada a plantações e criação de animais, edificações de grande porte não fazem parte deste cenário. Entretanto, é comum que se tenha um número elevado de árvores, muitas vezes de grande porte [4].

### 3.3 DESCARGAS INDIRETAS

A possibilidade de uma rede ser submetida a tensões induzidas críticas, provenientes de descargas que caem próximas a elas, é muito maior do que as chances de ocorrência de uma descarga direta, pois há uma ampla área que não possui cobertura do raio de atração. Assim, esta é a situação mais recorrente para origem de sobretensões em instalações elétricas [7] [9] [20].

Apesar de este tema ser objeto de estudo há algum tempo, o fenômeno apresenta dissidências que exigem a necessidade de estudos teóricos serem completados por estudos práticos, a fim de conhecer e analisar os seus efeitos. Entretanto, não há consenso quanto à forma mais adequada de obter analiticamente os valores de campos e tensões induzidas, porém a metodologia desenvolvida por Sune Rusck é amplamente utilizada desde a publicação da sua Tese de Doutorado em 1957 [7].

Visto a alta complexidade de aplicação de descargas induzidas em simulação e a necessidade de estudos complementares, optou-se por não desenvolver análises e simulações referentes às tensões induzidas.

### 3.4 CÁLCULO DA TENSÃO DISRUPTIVA NO ISOLADOR

Os elevados valores de corrente das descargas atmosféricas proporcionam nos isoladores elevados valores de tensão entre seus terminais. Fazendo com o que ocorra ruptura de seu isolamento. Para determinar o valor da tensão que vai causar uma descarga disruptiva no isolador existem diversos métodos. Neste trabalho destacamos dois métodos. O primeiro, sugerido por [13] bastante simples é definido pela equação abaixo:

$$V_{m\acute{a}x} \geq 1,5 \times CFO \quad (3.12)$$

onde  $CFO$  é a Tensão Crítica de Impulso, ou *Critical Impulse Flashover Voltage*, que está relacionada ao nível de isolamento das estruturas.

O segundo método é conhecido por método do Efeito Disruptivo, do inglês *Disruptive Effect* (DE) [22]. Este método é baseado no conceito do método de integração e a sua aplicação envolve a estimação de alguns parâmetros. As equações deste método estão apresentadas a seguir:

$$DE = \int_{t_0}^{t_b} [V(t) - V_0]^K \cdot dt \quad (3.13)$$

onde  $DE$  é o efeito disruptivo constante para o intervalo em que  $V(t) > V_0$  para uma determinada forma de onda de tensão especificada,  $V(t)$  é a tensão instantânea sobre o isolamento,  $V_0$  é a tensão inicial ou tensão mínima a ser ultrapassada que possa iniciar o processo de *breakdown*,  $t_0$  é o tempo em que  $V_0$  é excedido e  $t_b$  é o tempo onde ocorre a disrupção [23] [24].

Os parâmetros  $V_0$  e  $K$  podem ser estimados utilizando-se diferentes procedimentos propostos por diversas literaturas. Para isoladores de redes de distribuição, estudos recentes [22] sugerem a utilização da equação abaixo:

$$K = \alpha \times \frac{v(t)}{V_0} \quad (3.14)$$

O melhor valor de  $\alpha$  é aquele que resulta no desvio quadrado mínimo de  $DE$ , sendo cada valor calculado pela média de valores de  $DE$  correspondentes aos níveis de tensão obtidos a partir de testes [22].

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os equacionamentos que permitem estimar a amplitude das sobretensões em redes de distribuição originadas por descargas diretas e ainda um breve comentário sobre as tensões induzidas. No capítulo 4, serão apresentadas as características de uma rede de distribuição: topologia, materiais e equipamentos, que servirão de base para a modelagem de componentes no *ATPDraw*.

## 4 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

No Brasil a maior parte das redes de distribuição é aérea e suas características e as do meio no qual estão alocadas, contribuem para os seus índices de desempenho. Os sistemas de distribuição de energia compõem-se de redes MT ou circuitos primários, monofásicos ou trifásicos, responsáveis por transportar a energia entre as subestações e os transformadores de distribuição (TD), e as redes BT ou os circuitos secundários, que transportam a energia até o consumidor final. Os alimentadores, ou circuitos troncos, são os ramos com maior carga e a partir destes derivam circuitos que são denominados ramais [4].

### 4.2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO

#### 4.2.1 Nível de Isolamento

Entre os principais parâmetros de proteção contra sobretensões de uma rede de distribuição, está o nível de isolamento, que determina a suportabilidade das estruturas frente aos surtos ocasionados pelas descargas atmosféricas.

A incidência de descargas próximas às redes de distribuição pode ter seus distúrbios minimizados pelo nível de isolamento, NI, da estrutura. O nível de isolamento pode ser caracterizado por dois valores de tensão, ambos são expressos em kV: Tensão Suportável de Impulso, TSI, valor de pico da tensão suportável pelo isolamento em 90% das ocorrências, e a Tensão Crítica de Impulso (*CFO – Critical Impulse Flashover Voltage*) valor de pico da tensão que em 50% das aplicações provoca a interrupção do isolamento.

O CFO é determinado pela estrutura, considerando as distâncias de isolação no ar, o isolador e o material dos postes e cruzetas. Pode-se determinar o nível de isolamento de uma estrutura por meio de ensaios laboratoriais ou por métodos analíticos aproximados [4] [20] [25].

O nível de isolamento de uma rede de distribuição ou linha de transmissão é definido de acordo com a Norma ABNT 6939 [25], que avalia o nível de tensão de trabalho da rede e define os níveis padrão, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Níveis de isolamento para as redes de distribuição.

Tensão Máxima do Equipamento $U_{m\acute{a}x}$ (kV eficaz)	Tensão suportável normalizada de frequência fundamental de curta duração (kV eficaz)	Tensão Suportável normalizada de impulso atmosférico (kV crista)
0,6 <sup>(1)(2)</sup>	4 <sup>(1)</sup>	-
1,2 <sup>(1)</sup>	10	30 <sup>(1)</sup>
12	28	60
	28	75
	28	95
15 <sup>(1)</sup>	34 <sup>(1)</sup>	95
	34 <sup>(1)</sup>	110 <sup>(1)</sup>
36	70	145
	70	170
	70	200 <sup>(1)</sup>

NOTAS:

(1) Indica valores não constantes na IEC 60071-1.

(2) O nível de isolamento correspondente à  $U_{m\acute{a}x} = 0,6$  kV só é aplicável a secundário de transformador, cujo primário tem  $U_{m\acute{a}x}$  superior a 1 kV. 2 Se os valores entre parênteses forem considerados insuficientes para provar que as tensões suportáveis fase-fase especificadas são satisfeitas, ensaios adicionais de suportabilidade fase-fase são necessários.

Fonte: Adaptado de [25].

#### 4.2.2 Afastamentos Mínimos

Os afastamentos mínimos entre cabos condutores de energia, padronizados por normas brasileiras, estão apresentados na Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6.

Tabela 4 – Distâncias mínimas em pontos fixos.

Distância mínima de partes energizadas à fase ou à terra em pontos fixos		
Nível de isolamento (TSI) kV	Distância mínima (mm)	
	fase-fase	fase-terra
95	140	130
110	170	150
125	190	170
150	230	200
170	270	230

Fonte: [26].



Tabela 5 – Distância vertical mínima.

<b>Distância vertical mínima entre condutores de um mesmo circuito</b>	
<b>Tensão nominal E (V)</b>	<b>Distância vertical mínima na estrutura (mm)</b>
$E \leq 600$	200
$600 < E \leq 15000$	500
$15000 < E \leq 35000$	700

Fonte: [26].

Tabela 6 – Distância entre condutores e o solo.

<b>Distância entre os condutores e o solo (mm)</b> (E= Tensão nominal em V)				
<b>Local</b>	<b>Circuitos de comunicação e cabos aterrados</b>	<b>E ≤ 600</b>	<b>600 &lt; E ≤ 15000</b>	<b>15000 &lt; E ≤ 35000</b>
		Ferrovias	6000	6000
Rodovias	6000	6000	7000	7000
Ruas e Avenidas	5000	5500	6000	6000
Entrada de prédios e locais de uso restrito a veículos	4500	4500	6000	6000
Ruas e vias exclusivas a pedestres	3000	3500	5500	5500

Fonte: [26].

Em redes de distribuição aéreas, sugere-se para distância mínima entre condutor neutro e a fase da média tensão o valor de 1,40 m, em regiões onde são realizados serviços com redes energizadas por equipes de linha viva [4] [26].

### 4.3 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

#### 4.3.1 Transformador de Distribuição

Os transformadores de distribuição são geralmente do tipo estrela/triângulo aterrado e sua instalação é feita diretamente no poste. As potências padronizadas são 15, 30, 45, 75, 112,5 e 150 kVA para transformadores trifásicos e entre 5, 10, 15 e 25 kVA para os

monofásicos [4]. Os níveis de isolamento padronizados podem ser verificados na Tabela 7.

Tabela 7 – Níveis de Isolamento dos Transformadores.

Tensão Máxima de Operação (kVeficaz)	Tensão Suportável em Frequência Industrial Durante 1 min(kVeficaz)	Tensão Suportável de Impulso Atmosférico (kVcrista)
1	2	3
1,2	10	30
15	34	95
24,2	50	125
36,2	50	145

Fonte: [27].

### 4.3.2 Para-raios

Os para-raios são equipamentos de proteção utilizados nas redes de distribuição para proteger os equipamentos das sobretensões temporárias ocasionadas por quaisquer perturbações na rede.

Nos dias atuais, são amplamente utilizados os para-raios de óxido de zinco – ZnO, (vide Figura 6). As tensões padronizadas mais comuns,  $V_N$ , e respectivos níveis de proteção,  $V_P$ , são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Características dos para-raios.

$V_N$ (kV)	$V_P$ (kV)
12	40
21	70
30	100

Fonte: [4].

Figura 6 – Instalação típica de para-raios ZnO.



Fonte: [4].

### 4.3.3 Isoladores

Os isoladores, como o nome sugere, sustentam os cabos de energia mantendo-os afastados das partes condutoras da estrutura.

Atualmente os isoladores do tipo pilar são amplamente utilizados pelas suas características: imperfuráveis, elevado nível de isolamento (se comparado aos isoladores de pino) e elevada resistência mecânica, o que permite em algumas situações e eliminação da cruzeta [4] [25].

Na Figura 7 é possível observar o isolador do tipo pilar instalado e na Tabela 9 estão apresentadas as suas características de isolamento.

Figura 7 – Isoladores tipo pilar.



Fonte: [4].

Tabela 9 – Características dos isoladores de rede de média tensão.

<b>ISOLADOR PILAR</b>		
<b>Nível de Isolamento (kV)</b>	<b>CFO (kV)</b>	
	<b>Negativo</b>	<b>Positivo</b>
125	155	145
150	215	180
170	265	220

Fonte: [28].

Em redes de baixa tensão os isoladores utilizados são os isoladores tipo roldana de porcelana ou vidro. Neste caso a instalação é realizada diretamente no poste e a sustentação do cabo é feita no isolador conforme detalhe na Figura 8. Na existência de condutor neutro em redes MT, utiliza-se este mesmo tipo de isolador.

Figura 8 – Isolador tipo roldana de porcelana.



Fonte: Da autora (2019).

A Tabela 10 apresenta as características elétricas destes isoladores para ensaios sob impulso atmosférico (1,2/50  $\mu$ s) e frequência a 60 Hz.

Tabela 10 – Características dos isoladores tipo roldana.

<b>Condição do teste (impulso de 60 Hz)</b>	<b>Tensão (kV)</b>
Disruptiva assegurado a seco	23,7
Disruptiva assegurado sob chuva	13
Suportável a seco	15
Polaridade positiva	35,6
Polaridade negativa	41,4

Fonte: [29].

#### **4.3.4 Postes**

Os postes são utilizados para manter os condutores a distâncias seguras em relação ao solo. Em redes de distribuição são usados postes de concreto e madeira, porém a grande maioria é de postes de concreto.

O comprimento dos postes instalados depende do nível de tensão nominal da rede e do local de instalação, postes de redes de distribuição podem variar de 9 até 20 metros. Entretanto, os mais comuns são postes de 9, 10 e 11 metros nas redes BT, MT ou mistas, BT e MT na mesma estrutura. A resistência mecânica do poste varia de acordo com a aplicação, porém as mais comuns são os de 150, 300 e 600 daN. Para os postes de madeira a classificação em função da resistência mecânica é: leve (L), médio (M) e pesado (P) [4] [26] [30].

### 4.3.5 Condutores

Os condutores normalmente utilizados em redes de distribuição urbanas são condutores de alumínio (CA) e para redes de distribuição rural ou alimentadores sem carga, condutores de alumínio com alma de aço (CAA).

Outros materiais como cobre e aço são descartados, o cobre devido o seu elevado custo e o aço por seu baixo desempenho. A Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13 apresentam as características dos cabos mais utilizados [4] [31] [32].

Tabela 11 – Características dos condutores de alumínio CA.

Bitola (AWG/MCM)	Cód. Comercial	Formação				Massa (kg/km)	RMG (mm)	R ( $\Omega$ /km)	Capacidade de Corrente (A)
		Fios		Cabos					
		N.º	d (mm)	D (mm)	Seção (mm <sup>2</sup> )				
2	Iris	7	2,47	7,41	33,54	91,8	2,69	0,8535	152
1/0	Poppy	7	3,12	9,36	53,52	146,5	3,39	0,5349	203
2/0	Aster	7	3,5	10,5	67,35	184,4	3,81	0,4251	235
3/0	Phlox	7	3,93	11,79	84,91	232,5	4,28	0,3372	271
4/0	Oxlip	7	4,42	13,26	107,41	294	4,81	0,2665	314
336,4	Tulip	19	3,38	16,9	170,48	469,1	6,4	1,687	419

Fonte: [32].

Tabela 12 – Características dos condutores de alumínio CAA (I).

Bitola (AWG/MCM)	Cód. Comercial	Formação					
		Alumínio		Aço		Cabo completo	
		N.º Fios	d <sub>AL</sub> (mm)	N.º Fios	D <sub>aço</sub> (mm)	D (mm)	Seção Nominal (mm <sup>2</sup> )
4	Swan	6	2,12	1	2,12	6,36	24,71
2	Sparrow	6	2,67	1	2,67	8,01	39,19
1/0	Raven	6	3,37	1	3,37	10,11	62,44
2/0	Quail	6	3,78	1	3,78	11,34	78,55
4/0	Oxlip	7	4,77	1	4,77	14,31	125,09
336,4	Tulip	19	2,89	7	2,25	18,31	198,38

Fonte: [31].

Tabela 13 – Características dos condutores de alumínio CAA (II).

Bitola (AWG/MCM)	Cód. Comercial	Massa (kg/km)	RMG (mm)	R ( $\Omega$ /km)	Capacidade de Corrente (A)
4	Swan	85,6	1,33	1,35479	125
2	Sparrow	135,8	1,27	0,85413	160
1/0	Raven	216,3	1,36	0,53615	220
2/0	Quail	272,1	1,55	0,42615	250
4/0	Oxlip	433,2	2,48	0,26731	330
336,4	Tulip	688,4	7,44	0,16925	426

Fonte: [31].

### 4.3.6 Dispositivo de Proteção contra Surtos

Os dispositivos de proteção contra surtos, conhecidos por DPS, são dispositivos que tem o objetivo de limitar as sobretensões e desviar correntes de surtos. É constituído por pelo menos um componente com característica não linear. A instalação do DPS em uma instalação elétrica depende da classe de proteção do dispositivo, que estão relacionadas ao nível de proteção pretendida [18].

O DPS Classe I é elaborado para suportar a corrente de uma descarga atmosférica, de modo parcial ou em sua totalidade. É normalmente utilizado em entrada de edificações expostas a descargas diretas e deve ter a capacidade de conduzir uma corrente impulsiva com forma de onda 10/350  $\mu$ s. O DPS Classe II é desenvolvido para suportar apenas as correntes que podem ser induzidas pelas descargas atmosféricas. Geralmente é instalado na entrada de edificações que não estão expostas a descargas diretas. O DPS Classe III é instalado no interior das edificações, nos terminais do equipamento a ser protegido [33].

Figura 9 – Dispositivo de proteção Contra Surtos.



Fonte: [33].

### 4.3.7 Sistemas de Aterramento

Os sistemas de aterramento servem de escoamento para a corrente de um surto.

Em instalações elétricas de baixa tensão, o aterramento constitui-se apenas de uma haste vertical, vide Figura 10, para cada consumidor de acordo com [34]. O comprimento da haste pode variar de 1,5 a 2,4 metros, podendo ser do tipo cantoneira de aço ou cilíndrica tipo aço-cobre, porém problemas com corrosão fizeram com que algumas concessionárias optassem apenas por hastes tipo aço-cobre de 13 ou 16 mm de diâmetro e comprimento ( $l_H$ ) de 2 ou 2,4 metros.

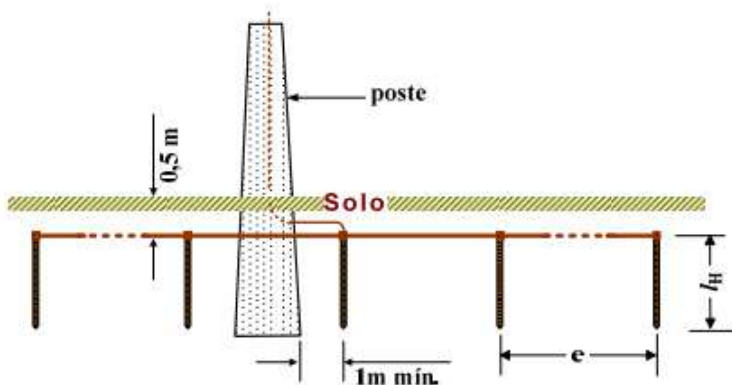
Figura 10 – Haste de aterramento aço-cobre.



Fonte: [4].

Em redes de distribuição os sistemas de aterramento utilizados são os de hastes alinhadas interligadas por condutores de cobre, vide Figura 11. A utilização de hastes interligadas é um procedimento realizado para reduzir o valor da resistência do aterramento, sendo amplamente utilizado em locais onde a resistividade do solo é elevada e o valor mínimo da resistência de aterramento não é atingido [35].

Figura 11 – Instalação típica aterramento com hastes alinhadas.



Fonte: [4].

Os condutores utilizados na interligação das hastes e na descida da estrutura são de cobre, variando entre 6AWG até cabos de 35 mm<sup>2</sup>, com conexões por conectores de parafuso, tipo cunha ou soldas exotérmicas [4].

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as principais características das redes aéreas de distribuição. Conhecer estas características se faz importante para a modelagem de cada equipamento e material utilizado na rede, a fim de obter resultados compatíveis à realidade. No capítulo 5, serão apresentados todos os procedimentos utilizados na modelagem de cada componente para fins de simulação no programa computacional *ATPDraw*.



## 5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

### 5.1 INTRODUÇÃO

A proposta deste capítulo é apresentar de que forma foram feitas as modelagens dos componentes das redes de média e baixa tensão e a caracterização das formas de onda para cada amplitude de corrente, tempo de frente e de cauda.

Para fins de modelagem e simulação serão consideradas redes de distribuição construídas de acordo com a NBR 15688 [26].

### 5.2 FERRAMENTAS DE CÁLCULO E SIMULAÇÃO

Considerando que as sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas ocorrem em períodos de tempo transitórios, a escolha do programa computacional adequado está relacionada com a sua capacidade de simular intervalos de tempo da ordem de nanossegundos (*ns*) e, ainda, permitir a variação dos parâmetros das linhas de acordo com a variação da frequência [36].

Sendo assim, o programa computacional utilizado para efetuar as simulações foi o *The Graphical Processor to ATP – ATPDraw*. Para a manipulação e análise dos resultados, utilizou-se como ferramenta o Excel [37], devido a sua ampla capacidade para tratamento de dados. A transferência dos dados do *ATPDraw* para o Excel foi feita com auxílio do *MATLAB* [38].

#### 5.2.1 *ATPDraw*

O *Alternative Transient Program* (ATP) é um programa amplamente utilizado para simulação de transitórios de origem eletromagnética e eletromecânica em sistemas de potência. O *ATPDraw* é uma interface gráfica que permite a construção de um modelo do circuito com interface digital, facilitando a visualização dos dados de entrada dos modelos [36].

O processamento matemático do *ATPDraw* utiliza o método de Bergeron, ou método das características para os elementos com parâmetros distribuídos, e os conceitos da regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados. As soluções são calculadas em intervalos de tempo discretos [39].

A versatilidade do programa permite montar sistemas com máquinas rotativas, linhas de transmissão, transformadores, para-raios, elementos com característica não linear e, ainda, distúrbios simétricos e assimétricos, como: faltas no sistema, distúrbios por descargas

atmosféricas e qualquer transitório oriundo de manutenção e operação, como a análise de harmônicas no domínio do tempo [39] [40].

### **5.2.2 MATLAB**

O MATLAB (*MATrix LABoratory*) é um programa computacional interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. Desempenhando inúmeras funções e cálculos, permitindo a construção de gráficos em ambiente fácil [38].

### **5.2.3 Excel**

O Excel é uma ferramenta que permite analisar dados em planilhas, organizar, formatar e organizar resultados. As funções básicas permitem a construção de gráficos que demonstram o comportamento dos dados e assim estimar tendências, podendo obter respostas de determinadas funções de acordo com os dados relevantes das simulações [37].

## **5.3 MODELAGEM**

Os modelos são desenvolvidos para representação matemática ou física de determinados eventos, com o intuito de descrever o comportamento de sistemas [41]. Para analisar o comportamento de redes de média e baixa tensão frente às descargas atmosféricas, foram construídos modelos baseados em redes de distribuição típicas utilizadas no sul do Brasil.

Com relação à forma de onda e valores de pico das descargas foram utilizados os dados apresentados nos capítulos 2 e 3.

Nos itens apresentados a seguir estão detalhadas as modelagens de elementos das redes e condições de simulação.

### **5.3.1 Características das Redes e Estruturas**

#### **5.3.1.1 Rede de Média Tensão**

A rede de média tensão simulada é uma rede rural monofásica, com comprimento total de 1.120 metros, que correspondem a 16 vãos de 70 metros, com postes posicionados em linha [26].

As simulações das redes MT foram consideradas duas situações: redes com e sem neutro, visando à análise da contribuição do neutro aterrado nas sobretensões na BT.

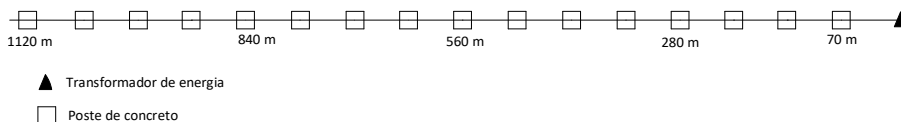
Para condição de rede MT com neutro, o aterramento do condutor foi executado conforme estabelecido nas normas de concessionárias, que

priorizam baixos valores de resistência de aterramento independentemente do valor da resistividade do solo.

O cabo condutor escolhido para a rede MT foi o cabo tipo CAA, tendo em vista as recomendações para redes não urbanas com vãos longos. Por ser um cabo comumente utilizado em redes de distribuição, utilizou-se os dados do cabo 2 AWG (CAA), informados na Tabela 12 e na Tabela 13. A altura de posicionamento dos cabos definiu-se como: 8,4 metros para o condutor fase, 7,5 metros para o condutor neutro, baseada na norma de estruturas de redes de distribuição [26]. A altura do condutor no meio do vão é estimada a partir dos valores de flecha máxima apresentados por tabelas de concessionárias, neste caso igual a 0,33 metros [42].

Na Figura 12 é possível visualizar o modelo de rede utilizado para a rede MT.

Figura 12 – Modelo de rede de média tensão.



Fonte: Da autora (2019).

### 5.3.1.2 Rede de Baixa Tensão

Assim como as redes MT, as redes BT não possuem uma topologia fixa, pois são dependentes da distribuição dos consumidores no circuito e das características topográficas do local. Desta forma, considerou-se para as simulações o modelo apresentado no relatório final do projeto RGE 0397-025-2005 [43], no qual se obteve um circuito médio, monofásico, para redes BT em regiões de periferia de grandes cidades ou bairros. Neste estudo foi obtido, ainda, o valor de 35 metros, como o valor médio, para o espaçamento dos vãos de redes BT.

A rede BT modelada contempla condutor neutro e o aterramento realizou-se de acordo com as recomendações estabelecidas nas normas de concessionárias.

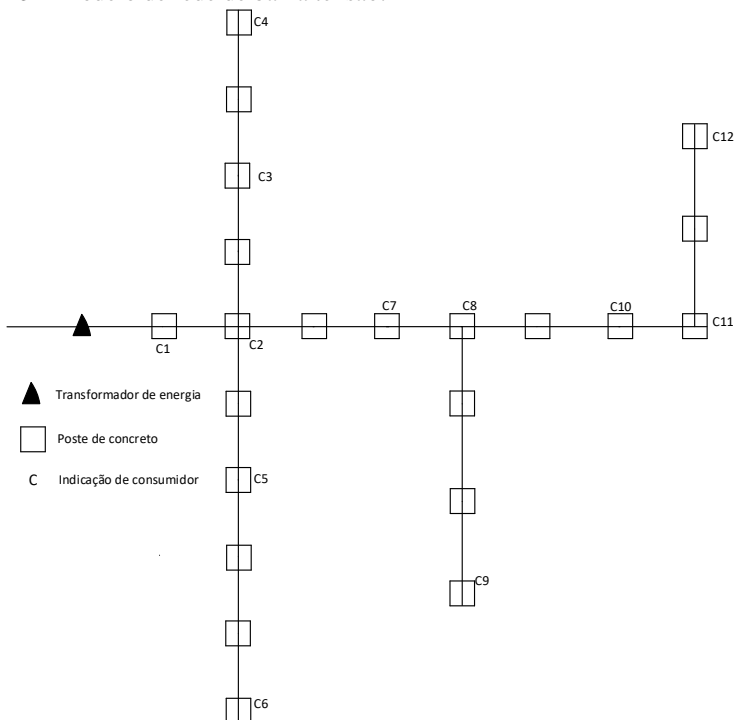
O cabo condutor escolhido para a rede BT foi o cabo tipo CA, por se tratar de vãos menores. Nas redes BT são instalados, habitualmente, os cabos 2 AWG, cujos dados estão informados na Tabela 11. A altura de posicionamento dos cabos definiu-se da mesma forma que para a rede MT, com o cabo da fase ficando a: 7,3 metros do solo e o condutor neutro a 7,5 metros. As flechas no meio do vão foram definidas da

mesma forma que para os cabos da rede MT, resultando em 0,412 metros.

Para o condutor neutro na rede MT e BT, utilizaram-se as mesmas características dos condutores fase da rede BT.

Na Figura 13 é possível verificar a disposição da rede BT. Para fins de simulação considerou-se a rede BT simétrica nos dois lados do transformador. Neste modelo (metade do circuito) definiu-se 12 pontos de instalações consumidoras nos quais serão verificados os níveis de sobretensão máximos.

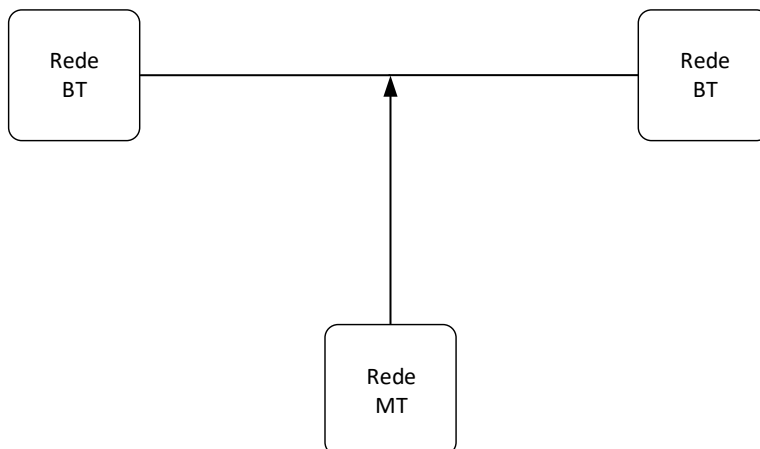
Figura 13 – Modelo de rede de baixa tensão.



Fonte: Da autora (2019).

Na Figura 14 verifica-se a rede de BT simétrica conectada a rede de MT pelo transformador.

Figura 14 – Visão geral da rede MT e BT (simétrica).



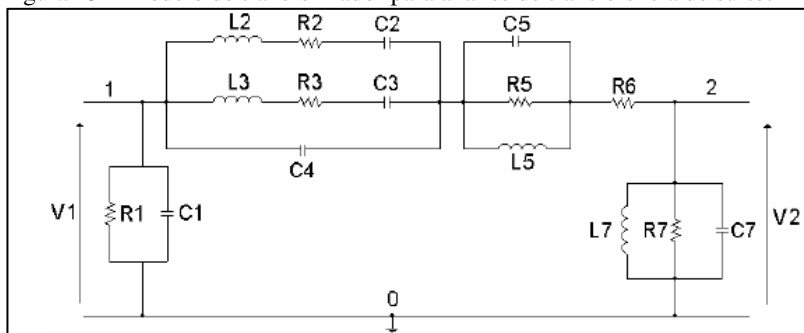
Fonte: Da autora (2019).

### 5.3.1.3 Transformador de Distribuição

O modelo de transformador utilizado foi desenvolvido em [44] para análise de surtos transferidos ao secundário quando da ocorrência de descargas atmosféricas próximas à rede primária. O modelo se refere a um transformador de 45 kVA com conexão delta-estrela, sendo composto por três circuitos RLC (um para cada fase).

O circuito modelo de transformador de transferência de surto pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Modelo de transformador para análise de transferência de surto.



Fonte: [44].

Na Tabela 14 estão apresentados os parâmetros do circuito do transformador para a potência de 45 kVA.

Tabela 14 – Parâmetros do transformador modelo.

Parâmetros Transformador de Distribuição 45 kVA					
Resistências		Capacitâncias		Indutâncias	
R1 (kΩ)	-	C1 (pF)	380	L2 (mH)	35
R2 (kΩ)	7	C2 (pF)	885	L3 (mH)	10
R3 (kΩ)	3	C3 (pF)	152,79	L5 (mH)	-
R5 (kΩ)	-	C4 (pF)	370	L7 (mH)	0,02
R6 (kΩ)	0,4	C5 (pF)	250		
R7 (kΩ)	2,8	C7 (pF)	800		

Fonte: [44].

#### 5.3.1.4 Para-raios e Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS)

O para-raios e o DPS são dispositivos que possuem o mesmo princípio de funcionamento e a diferença entre ambos se dá pelo nível de operação de trabalho. Sendo assim, a representação deles em um circuito é feita pelo mesmo componente, que para este trabalho será por um resistor variável.

As curvas de  $I \times V$  são disponibilizadas nos *datasheets* pelos fabricantes. A Figura 16 mostra o resistor variável inserido no circuito para representar o para-raios e o DPS e na Figura 17 a janela de entrada de dados, onde deve ser inserida a curva de  $I \times V$  e a Tabela 16 e Tabela 15, mostram os valores da curva  $I \times V$  do para-raios e do DPS.

A curva de  $I \times V$  para o DPS é baseada nas curvas apresentadas em [45]. Para a curva  $I \times V$  dos para-raios utilizou-se como base o *datasheet* [46]. Ressalta-se que os valores indicados na Tabela 16 e na Tabela 15, com asterisco (\*), são valores interpolados ou extrapolados baseados nas linhas de tendência das curvas dos fabricantes. Na Figura 19 e na Figura 18 estão apresentadas as curvas do para-raios e do DPS.

Figura 16 – Simbologia do resistor variável dependente da corrente.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 17 – Janela de entrada de dados: curva de  $I \times V$ .

Component: NLINRES

Attributes Characteristic

R(i)

I [A]	U [V]
0.001	275
0.1	434
10	651
50	750
100	797
200	858
300	891
400	913
...	...

Add  
Delete  
Sort  
Move  
↑  
↓

External characteristic

Data source:  Edit...  Include characteristic

Save... Copy Paste View

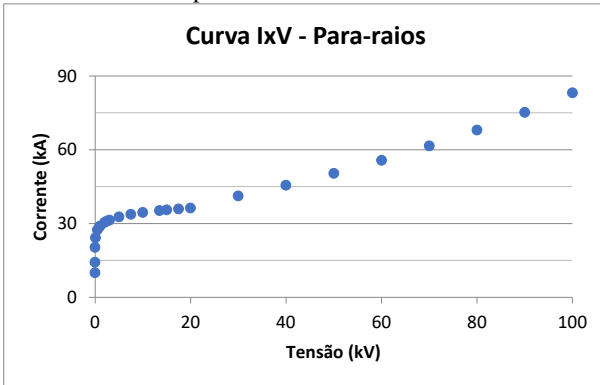
Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Da autora (2019).

Tabela 15 – Valores da curva de  $I \times V$  do para-raios.

Corrente (A)	Tensão(V)	Corrente (A)	Tensão(V)
0,001	10000	13500	35249*
0,1	14244*	15000	35535*
10	20279*	17500	35957*
100	24196*	20000	36328
500	27375*	30000	41267*
900	28638*	40000	45607*
1000	28870	50000	50403*
2000	30447*	60000	55704*
2500	30972	70000	61562*
3000	31408*	80000	68037*
5000	32663	90000	75193*
7500	33695*	100000	83101*
10000	34447	150000	137010*

Fonte: Da autora (2019).

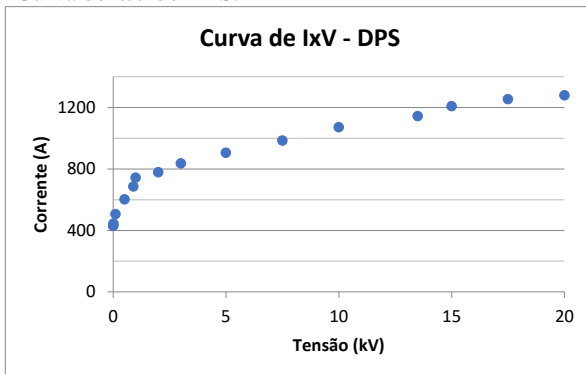
Figura 18 – Curva de  $I \times V$  do para-raios.

Fonte: Da autora (2019).

Tabela 16 – Valores da curva de  $I \times V$  do DPS.

Corrente (A)	Tensão (V)	Corrente (A)	Tensão (V)
0,001	430	3000	935*
0,1	453*	5000	972
10	611*	7500	1016*
100	732*	10000	1052
500	801*	13500	1078*
900	849*	15000	1055*
1000	887	17500	1084*
2000	909,33333	20000	1076

Fonte: Da autora (2019).

Figura 19 – Curva de  $I \times V$  do DPS.

Fonte: Da autora (2019).



### 5.3.1.5 Modelo *JMARTI*

O modelo escolhido no *ATPDraw* para representar os cabos condutores das redes de distribuição foi o *JMARTI*. Este modelo foi escolhido por considerar a variação da frequência sobre os parâmetros distribuídos ao longo da linha e, desta forma, representar com maior precisão os fenômenos eletromagnéticos na propagação da onda [47].

Os dados de entrada solicitados pelo programa para simulação estão apresentados na Figura 20 e Figura 21, com a respectiva descrição de cada item.

Figura 20 – Entrada de dados dos cabos (Parte I).

The screenshot shows the 'Line/Cable Data: mt-b1' dialog box. It has two tabs: 'Model' and 'Data'.  
 In the 'Model' tab:  
 - 'System type' section: 'Name: mt-b1', 'Template' checkbox is unchecked, 'Overhead Line' is selected in the dropdown, '#Ph: 2' is in a spin box. 'Transposed' is unchecked, 'Auto bundling' is checked, 'Skin effect' is checked, 'Segmented ground' is unchecked, 'Real transf. matrix' is checked. 'Units' are set to 'Metric'.  
 - 'Standard data' section: 'Rho [ohm\*m]' is 100, 'Freq. init [Hz]' is 0.005, 'Length [km]' is 0.035. 'Set length in icon' checkbox is unchecked.  
 In the 'Data' tab:  
 - 'Model Type' section: 'Bergeron', 'PI', 'JMarti' (selected), 'Semlyen', 'Noda' are radio buttons.  
 - 'Data' section: 'Decades' is 8, 'Points/Dec' is 10, 'Freq. matrix [Hz]' is 500000, 'Freq. SS [Hz]' is 60. 'Use default fitting' checkbox is checked.  
 At the bottom, 'Comment' is '35 m do trafo - poste com 1 consumidor', 'Order' is 0, 'Label' is 'PosteBt1', and 'Hide' checkbox is unchecked. Buttons for 'OK', 'Cancel', 'Import', 'Export', 'Run ATP', 'View', 'Verify', 'Edit defin.', and 'Help' are at the bottom.

Fonte: Da autora (2019).

Abaixo estão apresentadas as definições dos dados de entrada da Figura 20:

- *System Type*: Tipo de instalação dos cabos (linha aérea);
- *Model Type*: Modelo de simulação (JMarti);
- *Rho*: Resistividade do solo ( $\Omega \cdot m$ ); e
- *Length*: Comprimento do vão (km).

É necessária a apresentação de outras informações, como: a frequência característica repartida, em 8 décadas com 10 pontos/décadas, a frequência fundamental igual a frequência industrial e

o valor da frequência característica para representar fenômenos referidos a surtos atmosféricos, que varia de acordo com os parâmetros das descargas atmosféricas [48].

Na parte II de entrada de dados, as características de cada cabo são inseridas junto com suas respectivas alturas do solo.

Figura 21 – Entrada de dados dos cabos (Parte II).

#	Ph.no.	Rin	Rout	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
	[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]		
1	0	0.37	1.044	0	7.5	7.088	0	0	0	0
2	2	0.37	1.044	0	7.3	6.888	0	0	0	0

Fonte: Da autora (2019).

Para cada alteração pertinente aos cenários simulados, os parâmetros foram ajustados.

### 5.3.1.6 Postes

Optou-se pelo poste de concreto tipo Duplo T para realizar a modelagem do circuito, amplamente utilizado em redes de distribuição não urbanas na região Sul do Brasil.

As alturas dos postes foram definidas em 11, 10 e 9 m, poste para instalação do transformador, postes de rede MT e poste de rede BT, respectivamente.

Para análise da influência dos postes de concreto no escoamento do surto, aspectos construtivos são levados em consideração. De acordo com as referências [49] e [50], verifica-se que o poste pode ser

representado por dois componentes elétricos, divididos entre sua porção engastada e a que fica acima do solo.

Em [49] é realizado o estudo da influência dos campos eletromagnéticos gerados por uma descarga de retorno, proveniente da descarga atmosférica, nas estruturas dos postes de concreto. Que resultou na equação 5.1 da impedância de surto do poste, esta considera as características internas das ferragens e as propriedades elétricas do concreto.

$$Z_{A/B/C} = \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r - j\sigma/\varepsilon_0\omega}} \ln \left( \frac{h + \sqrt{h^2 + R_{avg}^2}}{R_{avg}} \right) [\Omega] \quad (5.1)$$

onde  $h$  é altura do poste,  $R_{avg}$  é o raio médio do poste,  $\omega$  frequência angular,  $\varepsilon_r$  e  $\varepsilon_0$  são a permissividade elétrica relativa do concreto e a permissividade elétrica do vácuo, respectivamente, e  $\sigma$  é a condutividade elétrica do concreto.

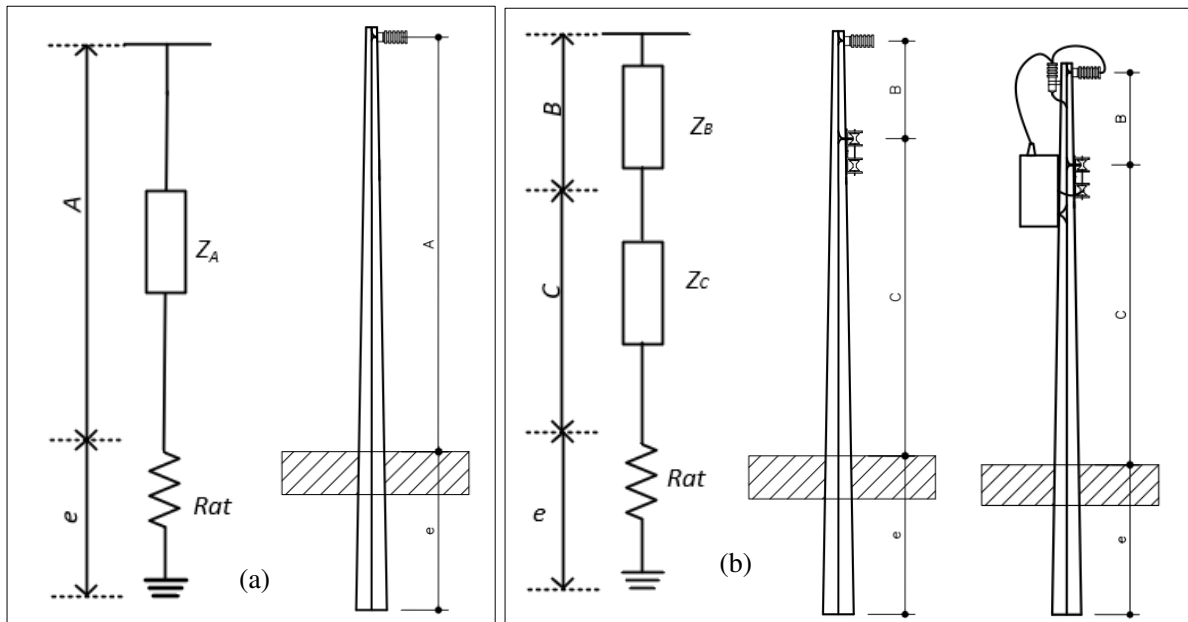
O estudo realizado em [50] teve por intuito a análise do comportamento das bases dos postes engastadas como topologia de aterramento. Como resultado o estudo sugere a equação 5.2 para estimar a resistência de aterramento de um poste que não possui neutro aterrado.

$$R_{at} = \frac{\rho_c}{2\pi e} \ln \left( \frac{r_c}{r_{fe}} \right) + \frac{\rho_s}{2\pi e} \ln \left( \frac{2e}{r_c} \right) [\Omega] \quad (5.2)$$

onde  $R_p$  é a resistência de aterramento do poste,  $\rho_c$  e  $\rho_s$  [ $\Omega.m$ ] são as resistividades elétricas do concreto e do solo, respectivamente,  $r_c$  e  $r_{fe}$  são os raios das seções transversais equivalentes do concreto e do condutor, respectivamente, e  $e$  [m] é a profundidade da base do concreto engastada.

Na Figura 22 é possível verificar o esquema de ligação dos postes como circuito equivalente. Exemplificando a instalação do poste de 10 m utilizado na rede MT em duas condições: com e sem neutro. A instalação e conexão dos isoladores serão abordadas em 5.3.1.7.

Figura 22 – Representação do circuito equivalente do poste de concreto para uma rede de média tensão: (a) sem neutro e (b) com neutro ou rede mista.



Fonte: Da autora (2019).

Na Figura 22:

–  $e$  é o engastamento do poste definido por  $e = L/10 + 0.6$ , onde  $L$  é a altura do poste (o  $e$  mínimo é de 1,5 m).

– A: Poste completo – considerada no caso de redes sem neutro.

– B: Topo do poste – equivale à distância de 1,4 m. Em normas, essa distância pode ser menor, porém em lugares com acesso a linha viva é recomendado este valor por segurança [4].

– C: Tronco do poste ou distância entre a altura de instalação do circuito BT até o ponto de engastamento do poste.

Para os cálculos realizados pelas equações 5.1 e 5.2, considerou-se o valor de 75  $\Omega$ .m para a resistividade do concreto [50], as áreas dos postes de concreto foram estimadas pelo método da conicidade, a permissividade elétrica relativa do concreto igual a 5 e o  $r_{je}$  igual a 5 mm.

Os resultados de impedância e resistência de aterramento dos postes podem ser verificados na Tabela 17 e Tabela 18.

Tabela 17 – Valores de impedância do poste.

Altura do poste (m)	$Z_A$ ( $\Omega$ )	$Z_B$ ( $\Omega$ )	$Z_C$ ( $\Omega$ )
9	15,1	13,68	-
10	15,1	13,67	12,89
11	15,23	13,71	-

Fonte: Da autora (2019).

Tabela 18 – Valores de resistência de aterramento do poste.

Resistividade do solo ( $\Omega$ .m)	L (m)	Rat poste ( $\Omega$ )
100	9	58,36
	10	55,19
	11	52,36
500	9	177,7
	10	166,9
	11	157,4
1000	9	326,9
	10	306,6
	11	288,8

Fonte: Da autora (2019).

Consideraram-se as resistências de aterramento dos postes mesmo nos casos de rede com neutro aterrado. Nos pontos de aterramento, considerou-se a resistência do poste em paralelo com a resistência do sistema de aterramento.

### 5.3.1.7 Isoladores

Para fins de modelagem e inserção deste componente no circuito modelo, os isoladores foram considerados como chaves controladas por tensão.

Para a média tensão os isoladores selecionados foram os do tipo Pilar de 125 kV, cujo CFO, polaridade positiva, é 145 kV. Para a baixa tensão, considerou-se os isoladores tipo roldana de porcelana com tensão máxima de operação de 1,2 kV e CFO 35 kV, polaridade positiva.

Os valores de tensão disruptiva para os isoladores de média tensão foram obtidos utilizando-se o método DE, conforme descrito em 3.3.2.

Para obtenção dos valores  $V(t)$ , considerou-se a corrente da descarga atingindo diretamente a rede com impedância de surto calculada em função do tipo de condutor e altura deste ao solo conforme equação 3.5. Os valores obtidos para estas impedâncias foram 500  $\Omega$  para a rede MT e 498  $\Omega$  para a rede BT

O fator  $DE$  está condicionado à forma de onda da descarga e, portanto, foram obtidos diferentes valores de tensão disruptiva a partir da minimização do Erro na equação 5.3, variando se o  $V(t)$  máximo.

$$Erro = DE_c - \int_{t_o}^{t_b} (V(t) - V_o)^{\alpha \frac{V(t)}{V_o}} dt \quad (5.3)$$

Para as constantes  $DE_c$  (kV.s),  $V_o$  (kV) e  $\alpha$ , foram utilizados os valores obtidos por [22] para o isolador classe 24 kV, tendo em vista a similaridade entre os valores de CFO dos isoladores. Vide Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros adequados para obter as curvas de tensão-tempo de cinco formas de onda de impulso para classe de isolamento e polaridade.

<b>Polaridade</b>	<b>Classe (kV)</b>	<b>DE<sub>C</sub></b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b>V<sub>0</sub>(kV)</b>	<b>CFO (kV)</b>
Negativo	15	0,0002	0,24	0,6·CFO	133,2
	24	0,00027	0,24	0,6·CFO	164,4
	36	0,00025	0,24	0,6·CFO	276,4
Positivo	15	0,00027	0,24	0,6·CFO	112,8
	24	0,00044	0,24	0,6·CFO	142,9
	36	0,00035	0,24	0,6·CFO	235,4

Fonte: Adaptado [22].

Os valores de tensão disruptiva resultantes para o isolador MT, podem ser verificados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de tensão disruptiva (kV).

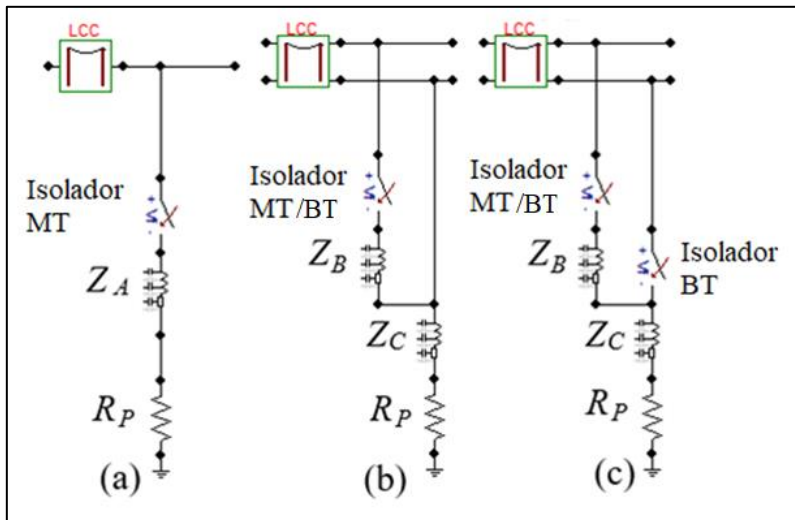
<b>I<sub>p</sub></b> <b>(kA)</b>	<b>Tensão</b> <b>Disruptiva (kV)</b>
10	220,38
20	179,06
40	178,63
80	144,4
100	144,75
150	124,35
200	123,85

Fonte: Da autora (2019).

Os valores de tensão disruptiva para o isolador BT, podem também ser obtidos pelo método DE utilizando-se para isto as constantes sugeridas por [29]. Os valores obtidos ficaram entre 35 e 33 kV, optando-se por utilizar um valor fixo de 35 kV.

Na Figura 23 é possível verificar as conexões elétricas dos diversos circuitos, onde estão presentes os isoladores, os postes e os blocos que representam os cabos condutores.

Figura 23 – Blocos representativos do conjunto: cabos condutores, isoladores, aterramento e circuito elétrico equivalente dos postes: (a) Instalação de rede MT e BT com neutro. (b) Instalação de rede MT e BT com neutro aterrado. (c) Instalação de rede MT sem neutro.

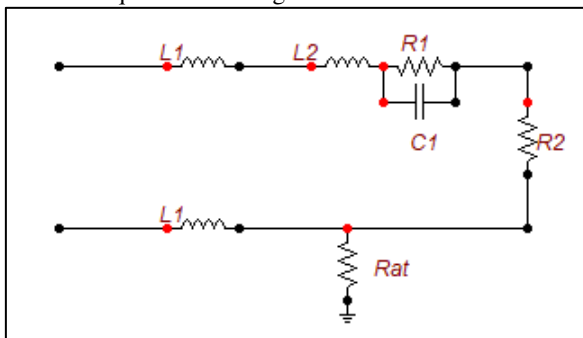


Fonte: Da autora (2019).

### 5.3.1.8 Instalação Consumidora

A carga de uma instalação elétrica é variável, dependendo dos equipamentos que estão conectados à rede. Entretanto, pode ser considerada como uma carga equivalente ao circuito apresentado na Figura 24, sugerido por [8].

Figura 24 – Circuito equivalente à carga.



Fonte: Adaptado de [8].



O componente L1 é relativo ao ramo de entrada da instalação elétrica. Na Tabela 21 estão apresentados os parâmetros com seus respectivos valores.

Tabela 21 – Parâmetros do modelo de carga consumidora.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
L1 (μH)	25
L2 (μH)	35
R1 (Ω)	16
R2 (Ω)	1
C1 (μF)	8
Rat (Ω)	*

\*Os valores de  $R_{at}$  variam de acordo com a resistividade do solo e serão explanados no item 5.3.1.9.

Fonte: Da autora (2019).

#### 5.3.1.9 Sistemas de Aterramento

Em instalações elétricas de baixa tensão o aterramento é efetuado por apenas uma haste vertical aterrada, ilustrada na Figura 24 por  $R_{at}$ . Os valores de aterramento destas hastes estão condicionados aos valores de resistividade do solo e foram calculados por meio da equação 5.4.

$$R_{at} = \frac{\rho}{2\pi L} \times \ln\left(\frac{4L}{d}\right) [\Omega] \quad (5.4)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do solo [ $\Omega \cdot m$ ],  $L$  é o comprimento da haste [m] e  $d$  é o diâmetro da seção transversal da haste [m]. Os valores de aterramento para os diferentes valores de resistividade do solo podem ser verificados na Tabela 22.

Tabela 22 – Resistência de aterramento da haste vertical dos consumidores.

<b>Resistividade do solo (Ω.m)</b>	<b>Rat haste (Ω)</b>
100	43,95
500	219,8
1000	439,5

Fonte: Da autora (2019).

Apesar das recentes mudanças nos padrões brasileiros, foram considerados os padrões de aterramento das redes existentes: a resistência máxima de aterramento admitida é de 25  $\Omega$  e nenhum ponto da linha pode estar a mais de 200 m de um ponto de aterramento [30]. Nos casos em que a instalação de apenas uma haste não for suficiente, é necessário que se faça a instalação de hastes interligadas adicionais até um limite de 7 (regra prática), ou ainda que seja efetuado tratamento químico do solo [34] para fins de obtenção do valor almejado.

No entanto, nos casos em que não é possível a obtenção do valor normatizado de resistência de aterramento, pode-se compensar com o aumento do número de aterramentos, utilizando-se para isto o fator  $q$ :

$$R_{at} \leq 8,33q \quad (5.5)$$

onde  $q$  = aterramentos/km, com  $R_{at} \leq 100$  ohms ( $\Omega$ ) [51].

A equação utilizada para determinar o valor de  $R_{at}$ , em redes de distribuição, é apresentada na equação 5.6, sugerida por [52]:

$$R_{at} = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left( \ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \ln \frac{1,781n}{2,718} \right) [\Omega] \quad (5.6)$$

onde  $n$  é o número de hastes verticais dispostas,  $\rho$  é a resistividade do solo [ $\Omega$ .m],  $L$  é o comprimento da haste [m],  $a$  é o raio da secção transversal da haste,  $d$  é a profundidade de instalação do sistema de aterramento e o espaçamento entre as hastes é o mesmo do seu comprimento 2,4 m [34].

A Tabela 23 apresenta os valores de  $R_{at}$  para os postes da rede MT, BT e TD, valores de  $q$ , as máximas distâncias entre os aterramentos e o número de hastes utilizadas no aterramento dos postes em suas respectivas resistividades do solo.

Tabela 23 – Informações dos aterramentos da rede de distribuição.

<b>Resistividade do Solo (<math>\Omega</math>.m)</b>	<b>Rat (MT/BT/TD)</b>	<b>q (ater./km)</b>	<b>Dist. Entre Ater. (m)</b>	<b>Nº de hastes</b>
100	23	3	300	2
500	39	5	200	7
1000	76	10	100	7

Fonte: Da autora (2019).

Com estas informações conclui-se que, em redes de MT, para atender a norma estas redes devem contar com um aterramento a cada 4, 3 e 2 postes, para solos de 100, 500 e 1000  $\Omega$ .m, respectivamente.

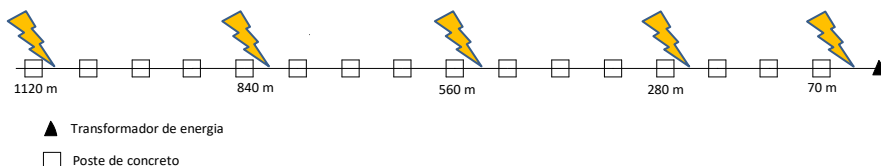
Para as redes de BT tem-se, por definição, que todo final de ramal derivado da rede tronco, ou no final da própria rede tronco, é necessário aterrar o neutro. Então, para estar de acordo com a norma e com a compensação definida por  $q$ , o número de aterramentos nas redes de BT fica em 4, 4 e 6 aterramentos, para solos de 100, 500 e 1000  $\Omega.m$ , respectivamente. Sendo necessário fazer compensação de aterramento apenas para o solo mais resistivo.

### 5.3.2 Condições de Simulação

As condições de simulações foram selecionadas de forma a obter-se o maior número de informações relacionadas ao comportamento das sobretensões.

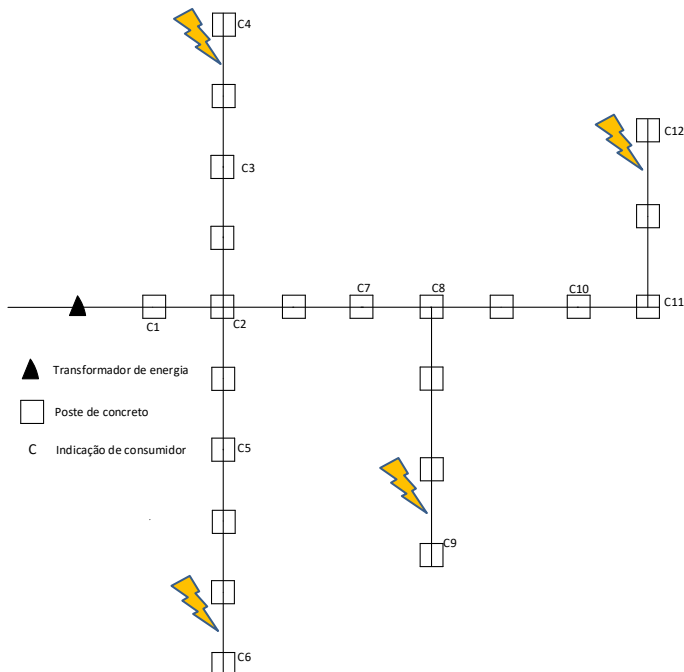
- rede MT com e sem neutro;
- diversos pontos de impacto direto das descargas, na rede BT (Figura 26) e rede MT (Figura 25);
- diferentes valores de pico de corrente de retorno (kA): 10, 20, 40, 80, 100, 150 e 200; e
- diferentes valores de resistividade do solo ( $\Omega.m$ ): 1000, 500 e 100.

Figura 25 – Localização das fontes de corrente rede MT.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 26 – Localização das fontes de corrente rede BT.



Fonte: Da autora (2019).

### 5.3.3 Corrente da Descarga de Retorno

Os principais parâmetros da corrente da descarga de retorno são: o valor de pico, o tempo de frente e o tempo de cauda da onda.

O programa *ATPDraw* disponibiliza algumas opções de fonte de corrente que podem injetar o surto no circuito. Porém, seguindo as recomendações do Guia IEEE 1410 [13] e a norma NBR 5419 [18], a função desenvolvida por Heidler é a indicada para descrever o comportamento da forma de onda da corrente da descarga de retorno.

O componente inserido no circuito para representar a fonte de corrente (para descargas diretas) e de tensão (para descargas indiretas), pode ser verificado na Figura 27 e a janela de entrada de dados dos parâmetros das descargas na Figura 28.

Figura 27 – Componente de injeção de surto.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 28 – Entrada de dados da fonte Heidler.

Component: HEIDLER

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Ampere	10000
T <sub>f</sub>	s	1.2E-5
tau	s	5E-5
n		2
Tstart	s	0
Tstop	s	1000

NODE	PHASE	NAME
HEI	1	

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source  Current  Voltage  Hide

Edit definitions OK Cancel Help

Fonte: Da autora (2019).

Na parte superior são inseridos os parâmetros de entrada do surto:

- *Amplitude*: valor de pico do surto;
- *T<sub>f</sub>*: é o tempo de frente total em segundos, na Tabela 24 *T<sub>f</sub>*;
- *tau*: é o tempo para a corrente atingir 37% do valor de pico, após já ter atingido o valor de pico;
- *n*: o fator de crescimento; e
- *Tstart* e *Tstop*: são o tempo de início e fim da fonte, respectivamente.

Na parte inferior da janela, é possível ajustar a fonte como uma fonte de corrente ou de tensão.

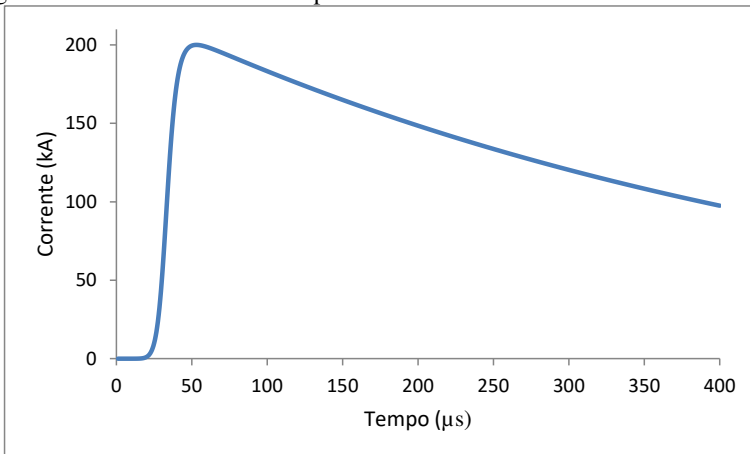
### 5.3.3.1 Forma de Onda das Descargas Diretas

Para iniciar a modelagem das descargas, definiu-se inicialmente a forma de onda para os diferentes valores de pico definidos no item 5.3.2. Os valores de tempo de frente efetivo,  $t_{fe}$  ( $T_f$ ), foram obtidos a partir das equações 2.5 e 2.6. Os tempos de cauda foram selecionados com base na NBR 5419-1 [14]. Os parâmetros utilizados para obtenção dessas formas de onda na fonte Heidler estão apresentados na Tabela 24.

O valor de  $n$  foi considerado constante e igual a 10 e  $t_h$  é o tempo de cauda.

Na Figura 29 é possível verificar o formato de onda típico do impulso atmosférico para a descarga de 200 kA.

Figura 29 – Forma de onda do impulso atmosférico direto.



Fonte: Da autora (2019).

Esta forma de onda é obtida por meio dos parâmetros apresentados na Tabela 24, quando são inseridos na janela de entrada de dados apresentados na Figura 28.

Tabela 24 – Forma de onda do impulso de corrente para cada valor de pico.

<b>Ip (kA)</b>	<b>Tfe (μs)</b>	<b>Tf (μs)</b>	<b>Th (μs)</b>	<b>T37% (μs)</b>	<b>n</b>
10	1,77	5,70	50,10	69,00	10,00
20	3,00	9,76	100,20	138,90	10,00
40	5,00	15,92	100,10	135,80	10,00
80	8,60	27,00	199,60	272,90	10,00
100	9,83	26,00	199,80	271,40	10,00
150	13,33	41,00	350,30	481,40	10,00
200	16,67	53,00	349,70	475,70	10,00

Fonte: Da autora (2019).

As descargas diretas possuem as mesmas características quando aplicadas em rede MT e BT.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados e definidos os parâmetros de simulação, dados referentes às ferramentas de simulação e modelagem dos equipamentos, corrente da descarga, redes de distribuição e, também, definição das condições de simulação. Finalizada esta etapa, o capítulo 6 refere-se à apresentação e análise dos resultados obtidos.





## **6 ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **6.1 INTRODUÇÃO**

O presente capítulo tem por objetivo apresentar os resultados obtidos a partir da análise de 1316 simulações, que levaram, aproximadamente, 110 horas de processamento, e tecer breves análises, que sustentarão o capítulo posterior.

### **6.2 DADOS COMPUTACIONAIS DAS SIMULAÇÕES**

As simulações desenvolvidas e executadas para obter os resultados deste trabalho, tiveram em média 300 segundos de duração, variando em função do arquivo montado. Tempo máximo definido para simulação de 0,5 ms e intervalo deltaT de 10 ns.

O computador utilizado para as simulações possui as seguintes características: processador Intel Core i7 – 7500U CPU @ 2,70 2,90 GHz memória RAM 8 GB e placa de vídeo Gráficos HD Intel ® 620 com 128 MG de memória.

### **6.3 ATENUAÇÃO DA TENSÃO E CORRENTE AO LONGO DA REDE DE MÉDIA TENSÃO**

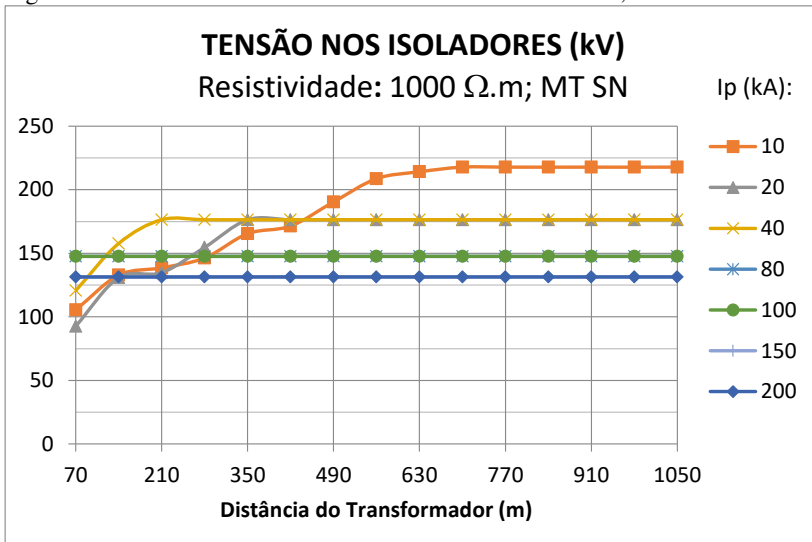
Para analisar o comportamento do surto ao longo da linha e verificar a atenuação da tensão e da corrente, realizou-se a instalação de medidores de tensão e corrente.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir das seguintes condições: fonte de corrente ligada diretamente no condutor de rede a 1085 metros do TD, conforme indicado na Figura 25, porém apenas para o caso onde o impacto da descarga ocorre no vão mais distante do transformador.

#### **6.3.1 Comportamento da Tensão ao Longo da Rede MT**

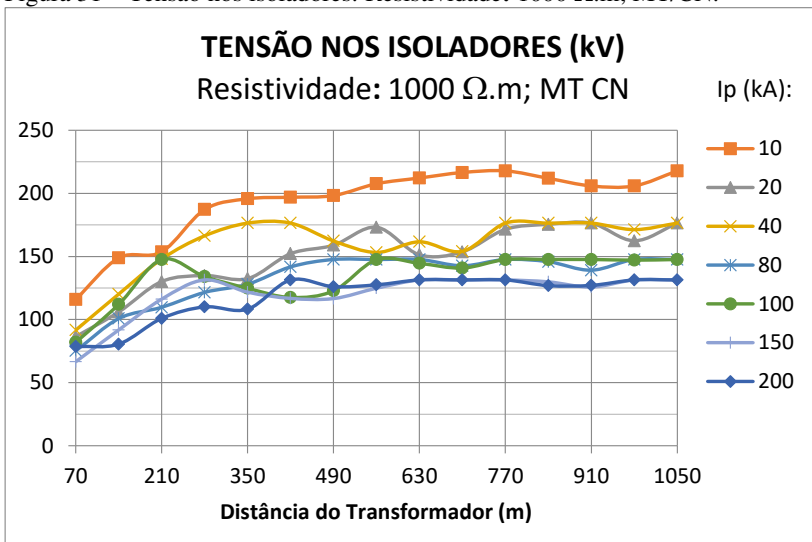
As Figuras 30 a 35 apresentam o comportamento dos picos de tensão nos terminais dos isoladores ao longo da rede de MT. As figuras estão divididas em: rede MT sem neutro (MT/SN), rede MT com neutro (MT/CN e rede MT com neutro e aterramento compensado (MT/CNc), conforme o item 5.3.1.9.

Figura 30 – Tensão nos isoladores: Resistividade: 1000 Ω.m; MT/SN.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 31 – Tensão nos isoladores: Resistividade: 1000 Ω.m; MT/CN.



Fonte: Da autora (2019).

Na Figura 30 pode-se analisar que, mesmo que a rede não tenha o condutor neutro instalado, ocorre atenuação da tensão nos terminais do

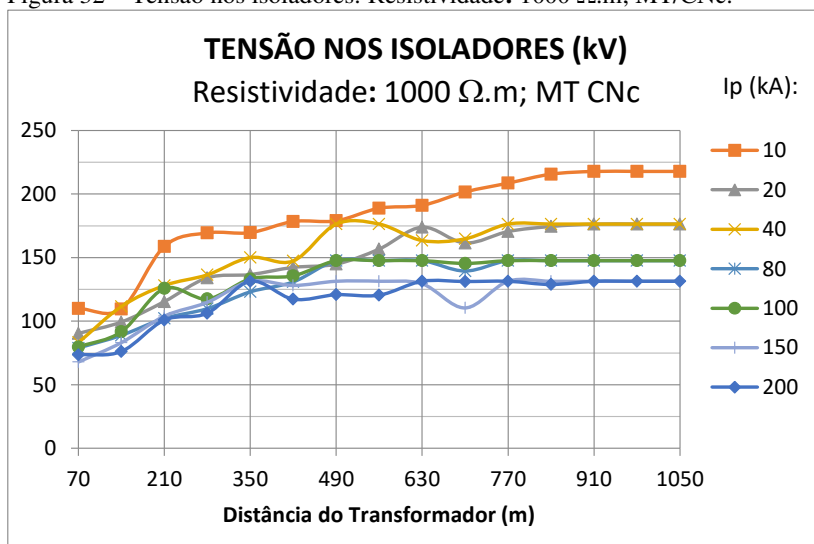
isolador para as descargas com valores de pico menos elevados. As tensões mantiveram-se constantes e iguais ao valor de tensão disruptiva do isolador nos casos de elevados valores de corrente.

A Figura 31 mostra que independentemente do valor do pico de corrente, ocorre atenuação no valor de tensão nos terminais dos isoladores, o que se atribui à instalação de aterramentos e do condutor neutro.

Além disso, como esperado, é possível verificar que todas as tensões máximas equivalem aos valores de descarga disruptiva do isolador, apresentados na Tabela 20, ou seja, em todos os isoladores com tensões iguais às descargas disruptivas está ocorrendo disrupção.

Na análise da Figura 30 nota-se que a partir do valor de 80 kA, ocorre a disrupção em todos os isoladores. Na Figura 31 percebe-se a atenuação das tensões, independente da amplitude da corrente da descarga. É possível ainda, verificar que os níveis de tensão nos terminais dos isoladores são menos elevados na rede com neutro.

Figura 32 – Tensão nos isoladores: Resistividade: 1000  $\Omega$ .m; MT/CnC.



Fonte: Da autora (2019).

Na Figura 32, apresenta-se o comportamento das tensões numa rede com condutor neutro e número de aterramentos compensados. Neste caso, todas as conclusões para o caso da Figura 31 são válidas. A divergência está no nível de tensão que chega ao TD. Para a corrente de 200 kA, na primeira tem-se que a 70 metros do transformador a tensão

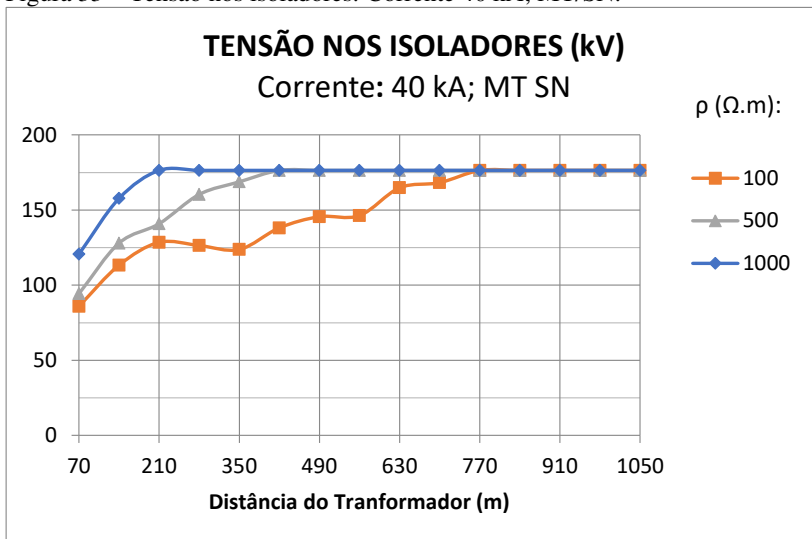
se aproxima de 80 kV e na segunda o valor é de, aproximadamente, 70 kV.

Do mesmo modo que nos casos anteriores, as Figuras 33, 34 e 35 apresentam o comportamento da tensão ao longo da rede MT sem neutro, rede MT com neutro e rede MT com compensação no número de aterramentos. Nestes casos, considera-se uma descarga com pico de corrente de 40 kA em redes com diferentes condições de resistividade do solo.

A Figura 33 permite que se verifique a eficiência dos solos com menor resistividade com o escoamento do surto. Todos eles iniciam com tensões disruptivas nos isoladores, mas com a propagação do surto pela rede ocorre atenuação. E como já se esperava, o solo com menor resistividade tem melhor desempenho no escoamento do surto. Ao comparar a Figura 33 com a Figura 34, percebe-se a influência do neutro aterrado no comportamento da sobretensão.

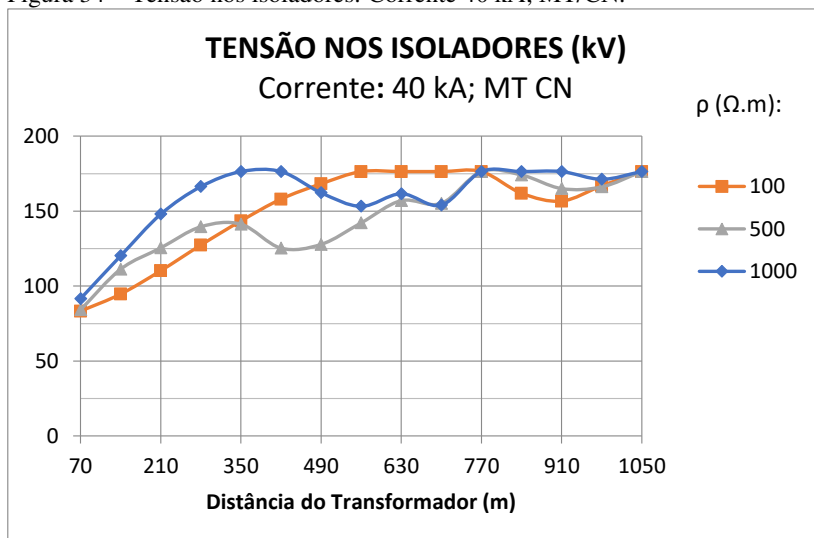
A Figura 35 apresenta os resultados obtidos para uma rede com número de aterramentos compensados quando a resistividade do solo é 1000  $\Omega.m$ . Percebe-se que o comportamento das sobretensões nos isoladores apresenta-se muito próximo, o que mostra a efetividade do método de compensação de elevados valores de resistência com o aumento do número de pontos de aterramento.

Figura 33 – Tensão nos isoladores: Corrente 40 kA; MT/SN.



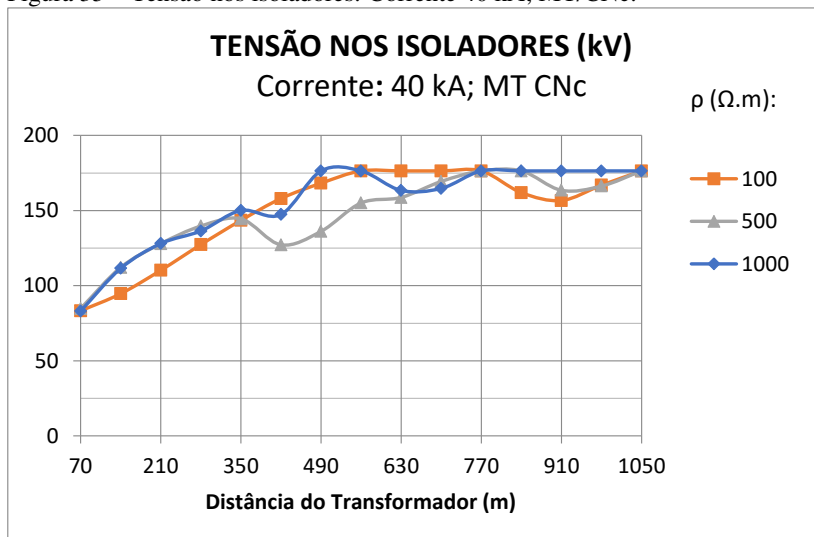
Fonte: Da autora (2019).

Figura 34 – Tensão nos isoladores: Corrente 40 kA; MT/CN.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 35 – Tensão nos isoladores: Corrente 40 kA; MT/CNc.



Fonte: Da autora (2019).

Na Tabela 25 têm-se apresentados os resultados de tensão no vão do transformador, para cada valor de pico de corrente, em kA, e para cada resistividade do solo

Tabela 25 – Valores de tensão no vão do transformador.

Resistividade do Solo ( $\Omega \cdot m$ )	Tensão (kV)								
	100			500			1000		
	SN	CN	CN - C	SN	CN	CN - C	SN	CN	CN - C
10,00	106,88	98,99	98,99	94,84	90,40	91,74	105,52	115,97	109,95
20,00	90,39	107,38	107,38	66,29	85,00	85,93	92,69	86,48	90,41
40,00	85,99	83,31	83,31	94,36	84,20	84,84	120,68	91,62	83,16
80,00	77,80	83,31	83,31	128,77	74,04	69,73	147,60	75,20	78,91
100,00	81,40	82,99	82,99	147,60	69,50	72,85	147,60	81,95	79,78
150,00	91,11	67,46	67,46	131,40	81,90	64,44	131,40	66,61	67,88
200,00	109,30	75,00	75,00	131,40	91,67	79,63	131,40	78,59	73,50

Fonte: Da autora (2019).

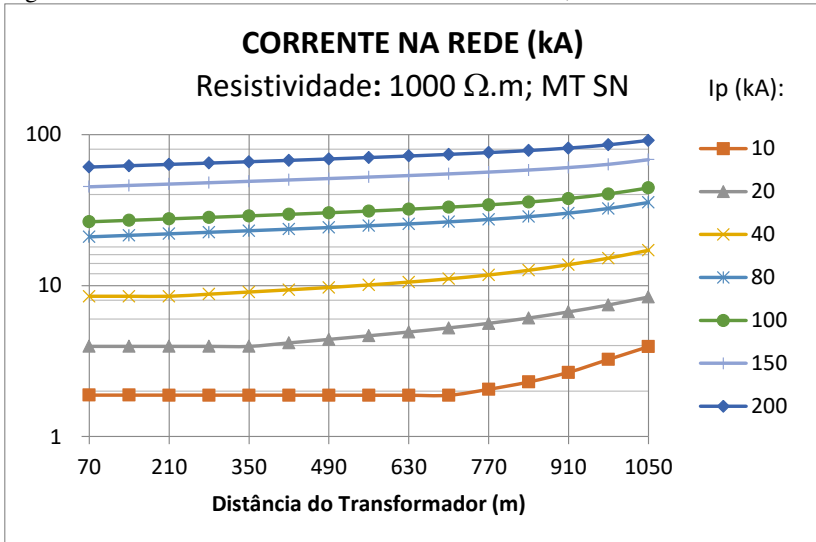
### 6.3.2 Comportamento da Corrente ao Longo da Rede MT

As Figuras 36 a 41 apresentam o comportamento da corrente que se propaga ao longo da rede, nas mesmas condições de análises do item 6.3.1.

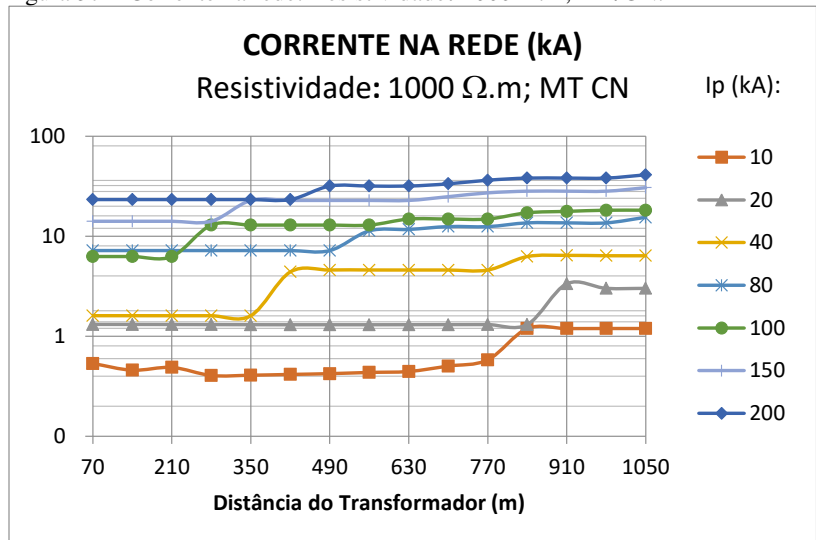
Percebe-se na Figura 36 que a partir de uma determinada distância os valores máximos de corrente permanecem constantes. Isto ocorre a partir do ponto em que a tensão no isolador se torna igual ou menor que a tensão de disrupção do mesmo. Neste caso, especificamente, isto está ocorrendo para as descargas de menor intensidade, haja vista a rede SN e solo de alta resistividade.

A Figura 37 mostra que a atenuação em redes CN se dá de modo imediato, fazendo com que as correntes se estabilizem mais rapidamente, independente do nível de intensidade da corrente de pico.

A Figura 38 mostra o comportamento da corrente quando é realizada a compensação do número de aterramentos. Ao se comparar a Figura 37 e a Figura 38, verifica-se que a atenuação na segunda ocorre mais rapidamente, independente do nível da corrente de pico. Sobre a estabilização do nível de corrente é importante destacar que: após a estabilização do valor da corrente, o seu valor não se reduz, independente de ter ou não mais aterramentos à montante e, além disso, que ambos os casos de rede MT com neutro estabilizam, praticamente, no mesmo valor de corrente.

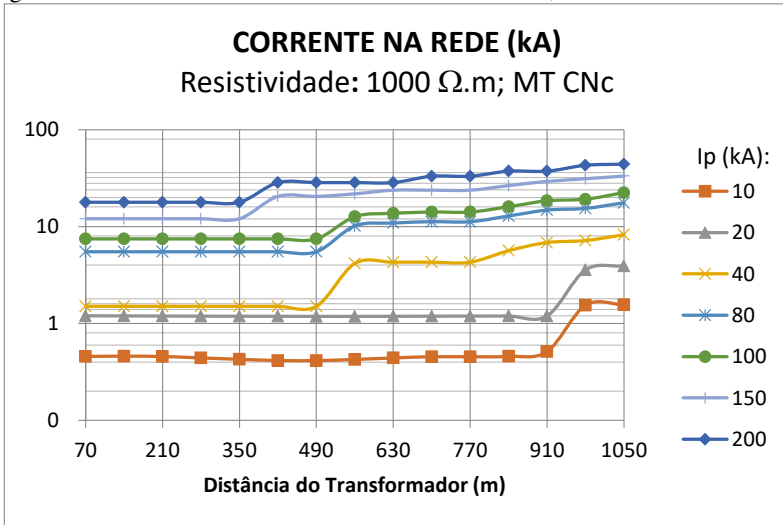
Figura 36 – Corrente na rede: Resistividade: 1000  $\Omega$ .m; MT/SN.

Fonte: Da autora (2019).

Figura 37 – Corrente na rede: Resistividade: 1000  $\Omega$ .m; MT/CN.

Fonte: Da autora (2019).

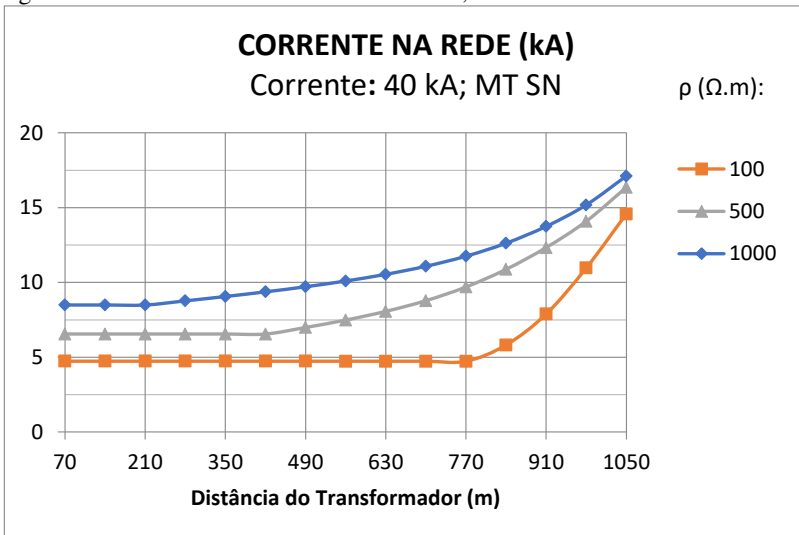
Figura 38 – Corrente na rede: Resistividade: 1000 Ω.m; MT/CNc.



Fonte: Da autora (2019).

De forma similar às análises com tensões as Figuras 39, 40 e 41 apresentam o comportamento da corrente ao longo da rede para uma corrente com 40 kA de pico.

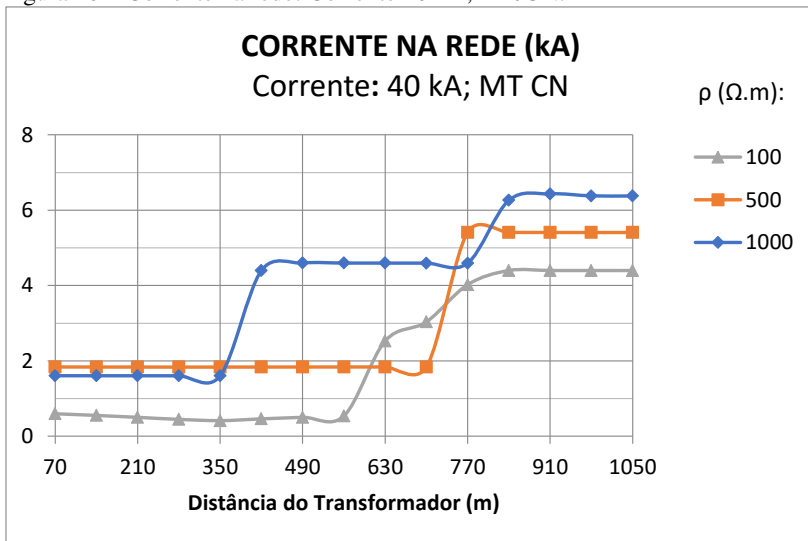
Figura 39 – Corrente na rede: Corrente 40 kA; MT/SN.



Fonte: Da autora (2019).

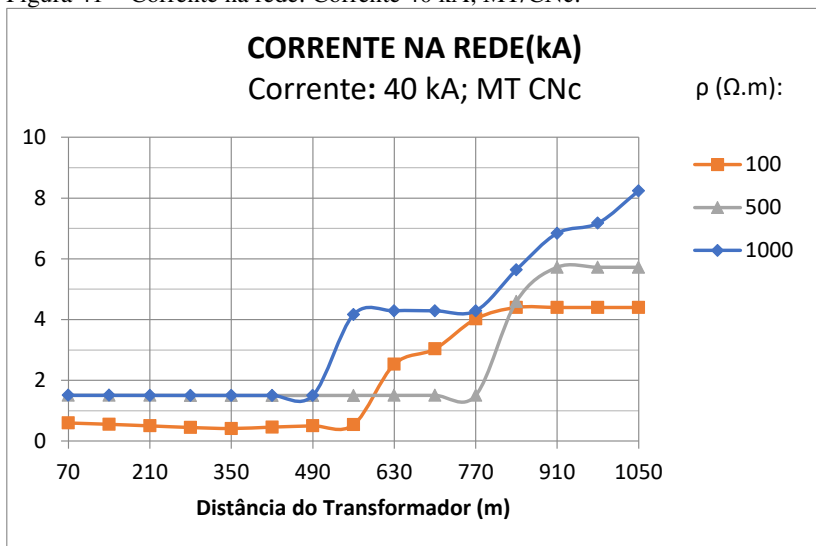


Figura 40 – Corrente na rede: Corrente 40 kA; MT/CN.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 41 – Corrente na rede: Corrente 40 kA; MT/CNc.



Fonte: Da autora (2019).

Os resultados apresentados nas Figura 39, Figura 40 e Figura 41 confirmam a efetividade do uso do condutor neutro e da compensação do número de aterramentos em solos com alta resistividade.

Na Tabela 26 têm-se apresentados os resultados de tensão e corrente no vão do transformador, para cada valor de pico de corrente, em kA, e para cada resistividade do solo.

Tabela 26 – Valores de tensão e corrente no vão do transformador.

Resistividade do Solo ( $\Omega \cdot m$ )	Corrente (kA)								
	100			500			1000		
	SN	CN	CN - C	SN	CN	CN - C	SN	CN	CN - C
10,00	1,18	0,24	0,24	1,63	0,38	0,37	1,88	0,46	0,46
20,00	1,47	0,64	0,65	1,79	1,12	0,60	3,96	1,31	1,20
40,00	4,74	0,55	0,60	6,56	1,84	1,51	8,49	1,61	1,51
80,00	9,59	2,16	2,16	16,74	4,76	3,72	21,01	7,19	5,50
100,00	11,85	3,34	3,34	20,81	5,37	4,79	26,43	6,27	7,46
150,00	23,12	7,40	7,40	37,54	14,17	8,27	45,07	14,10	12,06
200,00	31,69	13,04	13,04	50,99	19,39	15,80	60,88	23,24	17,81

Fonte: Da autora (2019).

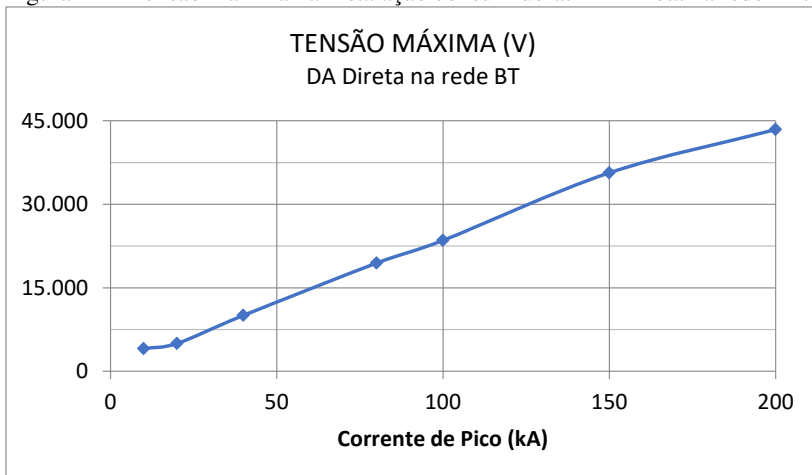
#### 6.4 TENSÕES MÁXIMAS NAS INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS PROVENIENTES DE DESCARGAS DIRETAS NA BT

Tendo em vista a influência de edificações e da própria rede MT na blindagem para rede BT, considerou-se a ocorrência de descargas diretas apenas nos fins de linha da rede BT, que representam pontos mais afastados, conforme apresentado na Figura 26.

##### 6.4.1 Tensões Máximas nas Instalações Consumidoras

A Figura 42 apresenta os resultados obtidos para as máximas tensões nas instalações consumidoras quando ocorrem descargas diretas na rede BT. Percebe-se neste caso que a tensão máxima se aproxima de 45 kV.

Figura 42 – Tensão máxima na instalação consumidora: DA Direta na rede BT.

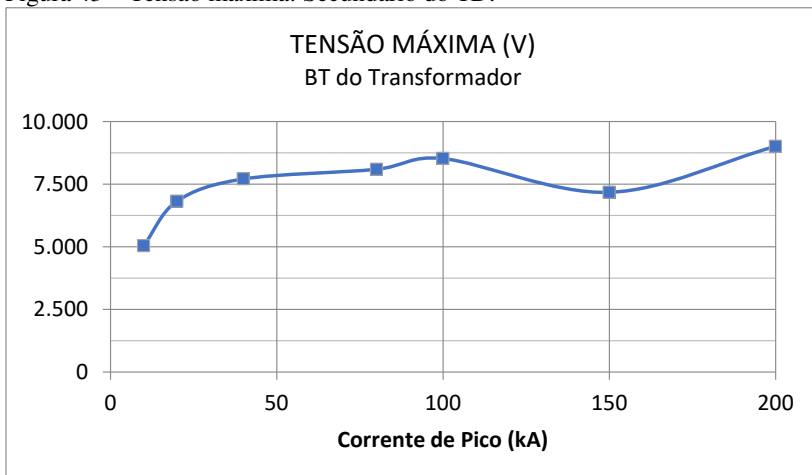


Fonte: Da autora (2019).

#### 6.4.2 Tensões Máximas no Secundário do TD

Para fins de verificação de possíveis avarias optou-se por verificar as máximas tensões conduzidas ao secundário do transformador de distribuição, conforme mostra a Figura 43. Apesar dos elevados valores de sobretensão, esses estão abaixo do nível de isolamento do equipamento.

Figura 43 – Tensão máxima: Secundário do TD.



Fonte: Da autora (2019).

## 6.5 TENSÕES MÁXIMAS NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS PROVENIENTES DE DESCARGAS NA MÉDIA TENSÃO

Este tópico tem por objetivo analisar as sobretensões oriundas de descargas conduzidas da MT para a BT, verificando seus níveis máximos e consequente probabilidade de falhas em equipamentos e instalações BT.

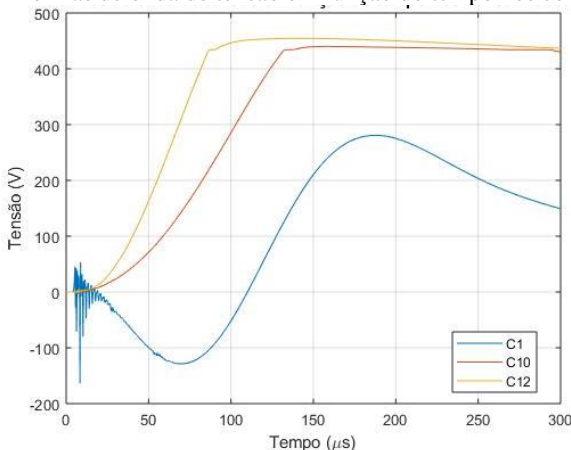
A instalação convencional das estruturas faz com que a queda das descargas diretas ocorra, em sua maior parte, na rede MT.

As Figuras 44 a 52 apresentadas têm como objetivo mostrar o comportamento das sobretensões nas instalações consumidoras em função do ponto de localização da fonte de corrente nos diversos tipos de aterramento, conforme apresentado na Figura 25, resistividade do solo e amplitude da corrente da descarga.

Constatou-se inicialmente que não há um comportamento padrão para a amplitude das sobretensões na BT provenientes da MT. Valores máximos podem ocorrer em diferentes pontos do circuito BT, independente de distância ou posicionamento no circuito (fim de linha, por exemplo). Dessa forma, optou-se por analisar apenas os valores máximos obtidos no circuito, independentemente de sua posição ou localização da fonte de corrente.

Na Figura 44 é possível observar as formas de onda de tensão em função do tempo nos consumidores C1 próximo ao transformador, C10, no meio da rede de BT e C12 consumidor de fim de linha, para uma descarga de 20 kA, 500  $\Omega$ .m de resistividade do solo e 525 m do TD.

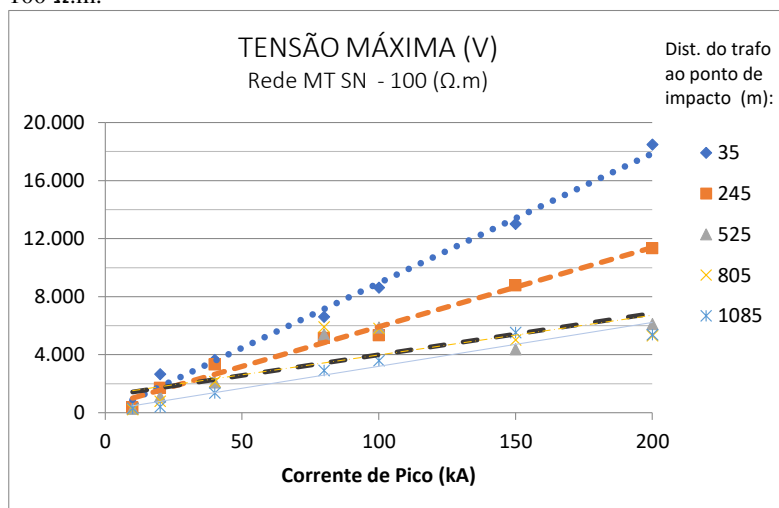
Figura 44 – Formas de onda de tensão em função do tempo nos consumidores.



Fonte: Da autora (2019).

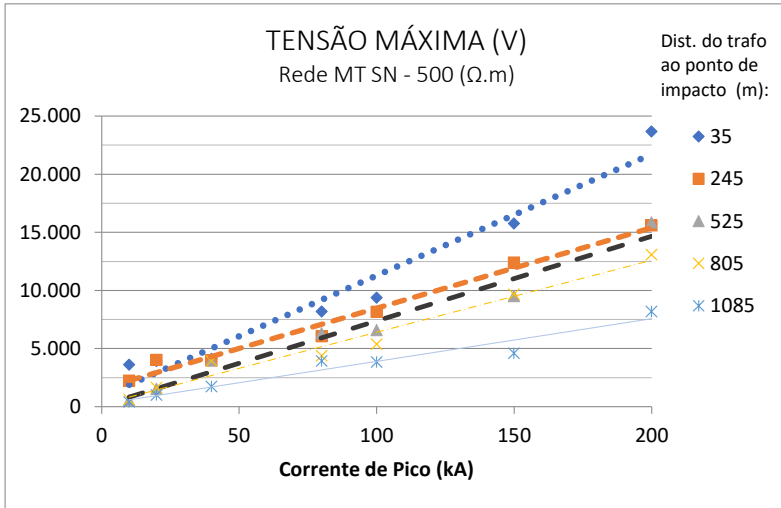
As Figuras 45 a 52 mostram as tensões máximas conduzidas às instalações consumidoras provenientes da rede MT/SN, rede MT/CN e rede MT/CNc (valor de resistência de aterramento compensado pelo aumento do número de aterramentos), para os respectivos valores de resistividade do solo. Os coeficientes de correlação médios ( $R^2$ ) obtidos foram: 93% para as redes sem neutro, 94% para as redes com neutro e 92% para as redes com neutro e compensação do número de aterramentos.

Figura 45 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT SN – 100  $\Omega$ .m.



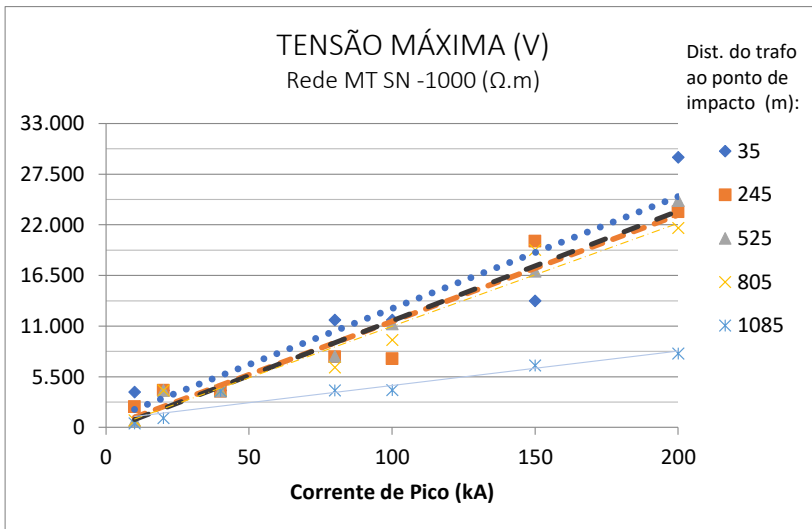
Fonte: Da autora (2019).

Figura 46 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT SN – 500 Ω.m.



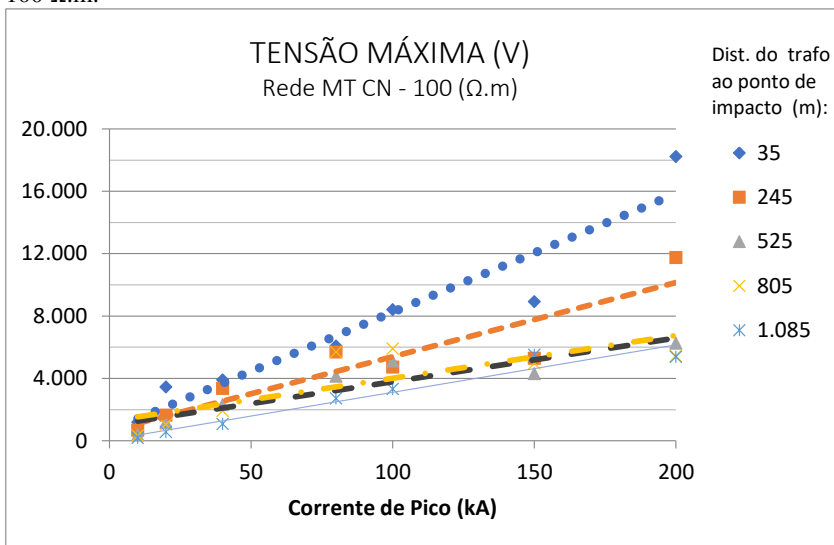
Fonte: Da autora (2019).

Figura 47 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT SN – 1000 Ω.m.



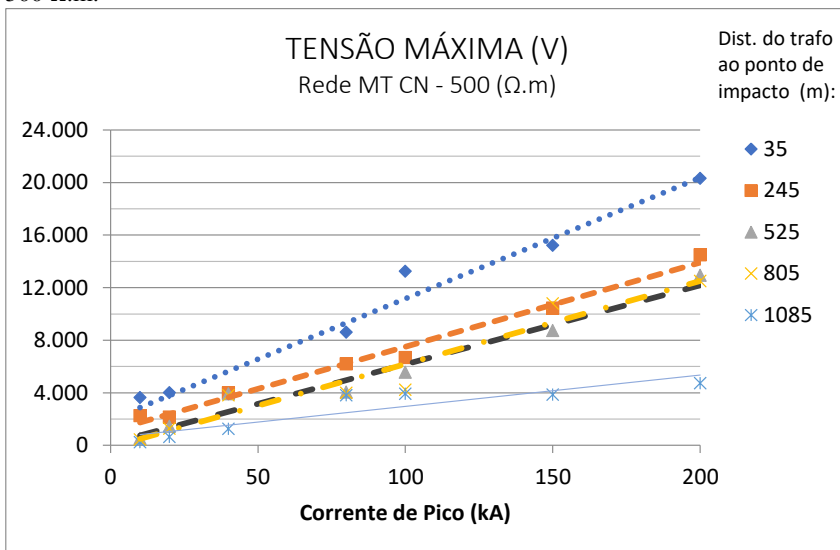
Fonte: Da autora (2019).

Figura 48 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CN – 100  $\Omega$ .m.



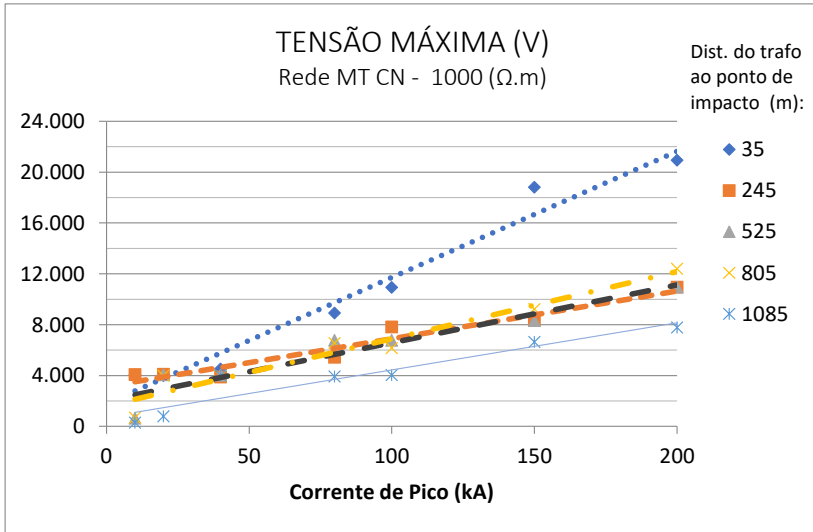
Fonte: Da autora (2019).

Figura 49 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CN – 500  $\Omega$ .m.



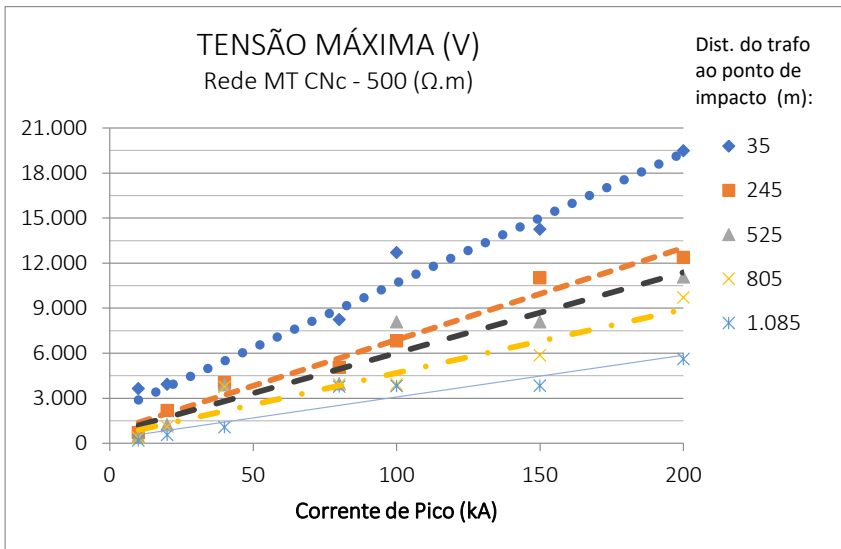
Fonte: Da autora (2019).

Figura 50 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CN – 1000 Ω.m.



Fonte: Da autora (2019).

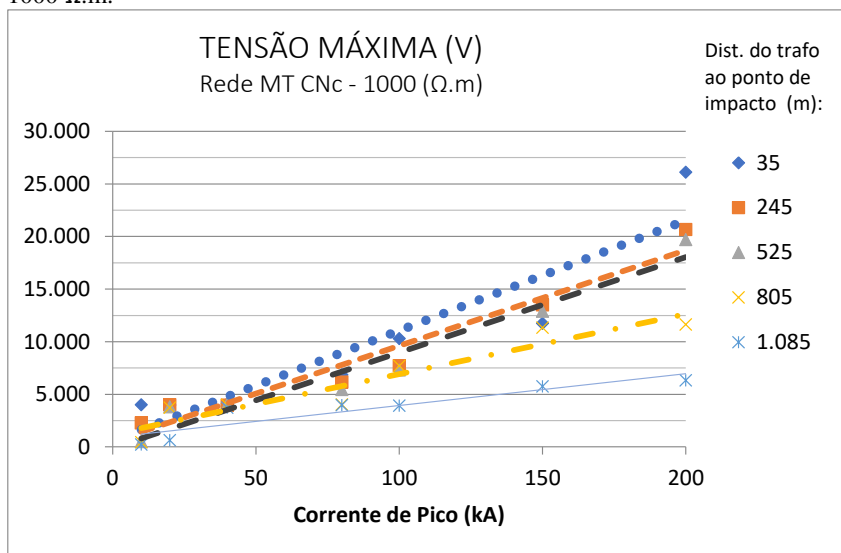
Figura 51 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CNC – 500 Ω.m.



Fonte: Da autora (2019).



Figura 52 – Tensões máximas nas instalações consumidoras: Rede MT CNc – 1000  $\Omega$ .m.



Fonte: Da autora (2019).

Em todos os gráficos, percebe-se um comportamento linear dos valores máximos em função da corrente da descarga, tanto para as diferentes distâncias ao TD, quanto para os diferentes valores de resistividade. Os valores máximos de sobretensão considerando a resistividade do solo 1000  $\Omega$ .m e para a localização da fonte de corrente no vão do transformador são: próximo de 30 kV para redes SN, 21 kV para redes CN e 26 kV para redes CNc.

Percebe-se que, quanto a transferência de potenciais do primário para o secundário, a compensação do número de aterramentos não contribui para a redução dos níveis.

## 6.6 EQUAÇÕES ANALÍTICAS PARA ESTIMATIVA DOS VALORES DE SOBRETENSÕES MÁXIMAS EM INSTALAÇÕES CONSUMIDORAS

Considerando o comportamento linear bem definido das tensões máximas nos consumidores em função da corrente máxima da descarga tanto para as diferentes distâncias da fonte de corrente ao TD, quanto para os diferentes valores de resistividade, optou-se pelo desenvolvimento de equações analíticas de forma a simplificar casos de interpolação ou extrapolação de valores.

Avaliando-se o comportamento das linhas de tendência nas diversas situações, optou-se pelo método de Regressão Linear sem o termo da interceptação, já que na condição de corrente igual a zero, a sobretensão também deverá ser zero.

$$y = \beta x \quad (6.1)$$

onde  $y$  é o valor da sobretensão calculada,  $x$  é o valor da corrente de pico da descarga e o  $\beta$  é obtido pela equação abaixo:

$$\beta = \frac{\overline{x \cdot y}}{\overline{x^2}} \quad (6.2)$$

onde  $y$  é o valor da sobretensão simulada.

Os valores de  $\beta$  obtidos para o caso de surtos originados na rede MT/SN, podem ser verificados na Tabela 27. Na Tabela 28 estão os valores de  $\beta$  obtidos para os casos de redes MT/CN e MT/CNc, para as diversas condições de resistividade do solo. A indicação de “c” refere-se à condição 1000  $\Omega$ .m e compensação do número de aterramentos por quilômetro.

Tabela 27 – Valores de  $\beta$  para rede MT/SN.

Ponto (m)	Resistividade do solo ( $\Omega$ .m)		
	100	500	1000
35	89,32	110,62	127,16
245	58,01	80,69	115,23
525	37,33	73,5	116,59
805	36,6	63,53	110,25
1085	31,58	38,42	43,33

Fonte: Da autora (2019).

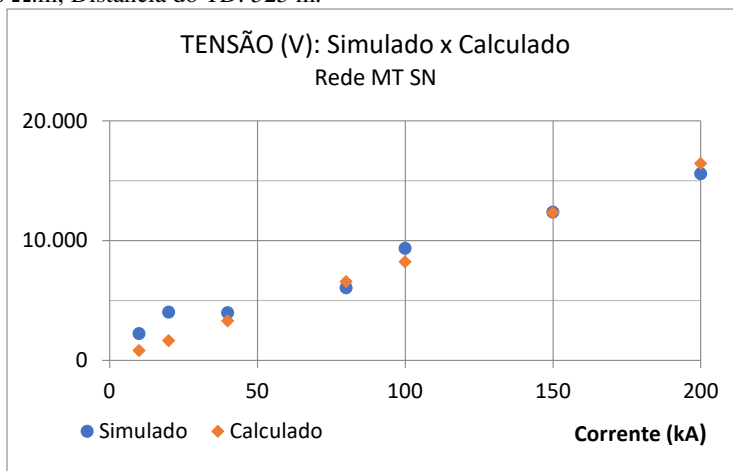
Tabela 28 – Valores de  $\beta$  para rede MT/CN e MT/CNc

Ponto (m)	Resistividade do solo ( $\Omega$ .m)				
	100	500	1000	500c	1000c
35	87,86	106,56	112,48	101,64	109,13
245	58,88	72,17	77,93	66,95	51,08
525	35,57	64,00	68,60	54,18	48,08
805	36,78	62,22	62,11	45,69	43,60
1085	30,97	28,19	42,51	30,09	37,02

Fonte: Da autora (2019).

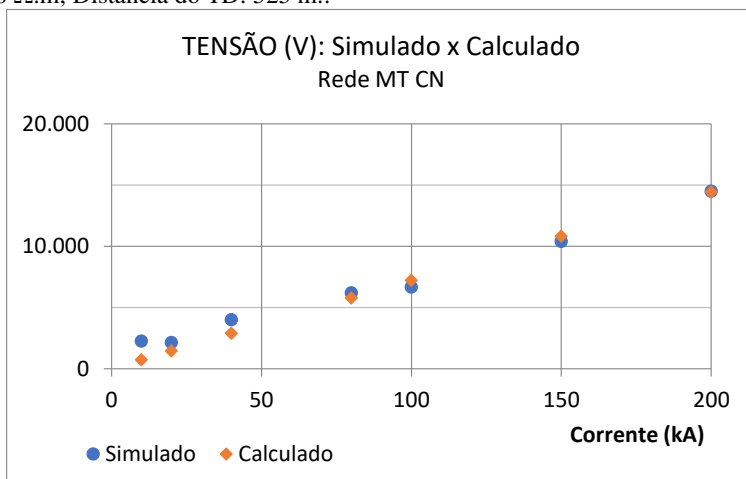
A Figura 53 e a Figura 54 demonstram a comparação dos resultados obtidos por meio de simulações e os calculados por meio do método desenvolvido no caso de resistividade do solo de  $500 \Omega.m$ , localização da fonte de corrente a 525 m do transformador e Rede MT SN e CN.

Figura 53 – Comparação de Tensões simuladas e calculadas – Rede MT/SN;  $500 \Omega.m$ ; Distância do TD: 525 m.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 54 – Comparação de Tensões simuladas e calculadas – Rede MT/CN;  $500 \Omega.m$ ; Distância do TD: 525 m..



Fonte: Da autora (2019).

Com a comparação visual que pode ser feita a partir da Figura 53 e da Figura 54, verifica-se que os valores estimados para baixos valores de pico de corrente são os que apresentam maior erro percentual em relação aos valores obtidos por meio de simulação.

A partir dos resultados da simulação e dos valores calculados pelo método analítico, nos casos sobretensões transferidas da rede de MT, os erros percentuais obtidos e a correlação entre os resultados, são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – Erros percentuais e Correlação cálculos.

Tipo de rede MT	Erro (%)		Correlação
	Máximo	Médio	
SN	69,71	21,78	0,97
CN	80,83	23,64	0,95
CNc	77,48	25,82	0,91

Fonte: Da autora (2019).

Apesar dos erros máximos serem elevados, o que ocorreu para o caso de uma descarga de 10 kA com a fonte de corrente localizada a 245 m do TD, percebe-se os erros médios admissíveis em torno de 25%, e o fator de correlação entre valores calculados e simulados superiores a 0,9.

Para descargas diretas na BT, utilizou-se o mesmo método e que resultou num único valor de  $\beta$  para todas as resistividades de solo, representado por:  $\beta = 201,40$ . Os valores de erros percentuais e correlação estão apresentados na Tabela 30.

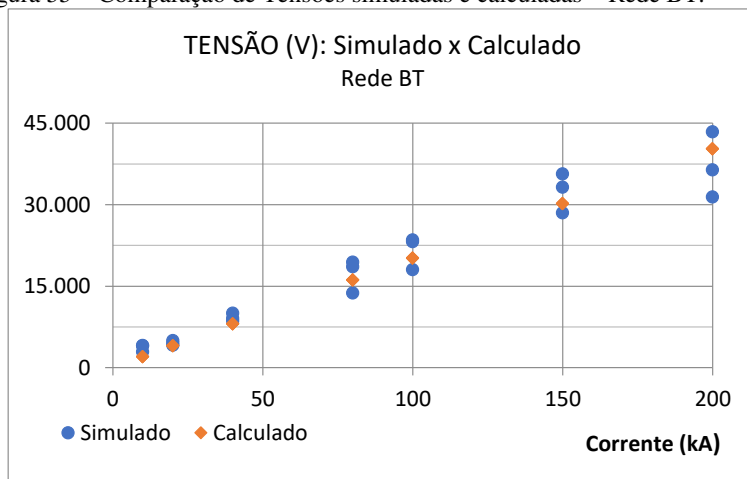
Tabela 30 – Erros percentuais e Correlação BT.

Tipo de rede BT	Erro (%)		Correlação
	Máximo	Médio	
CN	50,11	19,03	0,97
CNc	50,48	17,29	0,95

Fonte: Da autora (2019).

Na Figura 55 estão os resultados obtidos por meio de cálculo e por meio das simulações.

Figura 55 – Comparação de Tensões simuladas e calculadas – Rede BT.



Fonte: Da autora (2019).

Com o valor de  $\beta$  é possível fazer extrapolação para obtenção da curva de probabilidade de ocorrência das sobretensões.

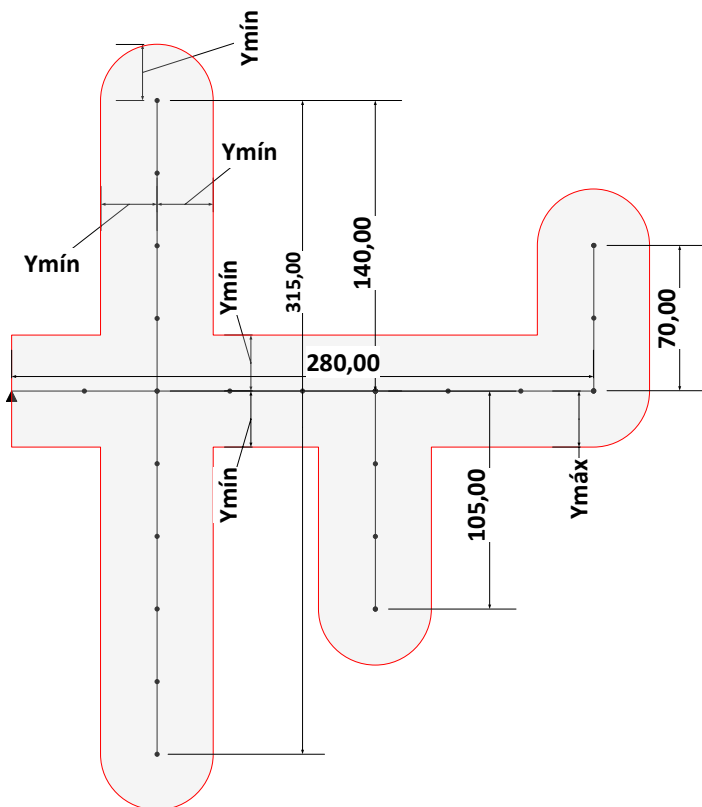
## 6.7 CÁLCULOS DAS PROBABILIDADES ACUMULADAS DE OCORRÊNCIA DE SOBRETENSÕES

A partir dos resultados de  $\beta$  da Tabela 27 e Tabela 28, fez-se a interpolação de outros valores de pico de corrente e extrapolação e interpolação de distâncias fonte de corrente/TD para desenvolver a curva de probabilidade acumulada de ocorrência de sobretensões.

Para cálculo da probabilidade de impacto das descargas considerou-se a altura e traçado das redes, e através do método eletro geométrico (item 3.2.3), calculou-se as distâncias de atração e respectivas áreas de atração para cada corrente de pico. Considerando a equação 2.1 determinou-se a probabilidade de ocorrência de cada uma das áreas.

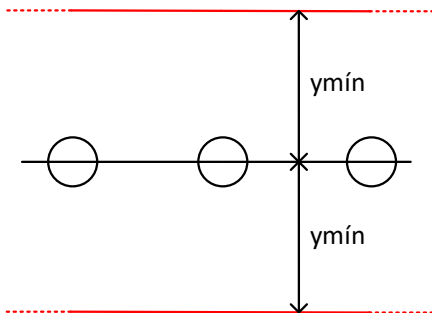
Para cálculo das probabilidades de descargas diretas considerou-se a topologia do circuito conforme mostra a Figura 56, para a rede BT, e a Figura 57, para rede MT. Para cada valor de pico de corrente calculou-se uma “área provável”.

Figura 56 – Área de atração do circuito BT.



Fonte: Adaptado de [43].

Figura 57 – Área de atração do circuito MT.



Fonte: Da autora (2019).

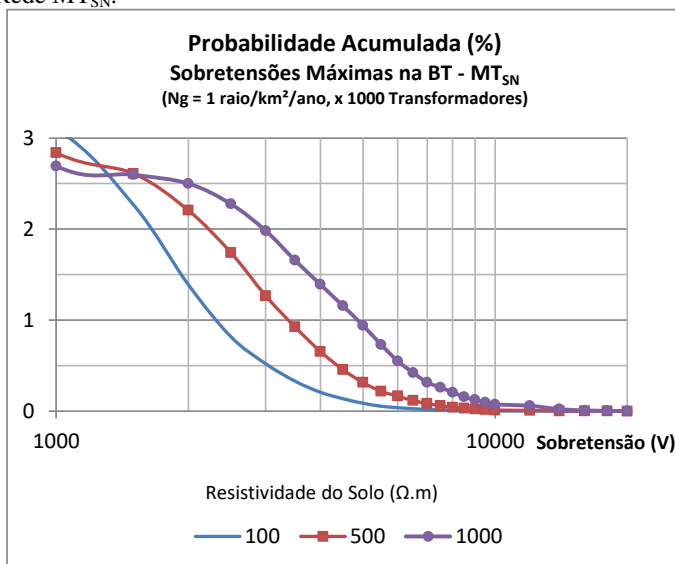
No caso de descargas diretas na rede MT, efetuaram-se os cálculos por vão de rede, ou seja, para cada comprimento de 70 m. Calculou-se as sobretensões máximas provocadas nos consumidores por descargas em cada vão, devido a valores de pico de corrente ( $I_p$ ) entre 5 e 200 kA, de cinco em cinco, e multiplicou-se pela respectiva probabilidade conforme equação 2.1. Utilizou-se para isso uma matriz no Excel, com as correntes na horizontal e as distâncias do ponto de impacto ao transformador ( $d$ ) (de 70 em 70 m) na vertical. Para cada célula linha  $d$ , coluna  $I_p$ , calculou-se  $V_{m\acute{a}x} = \beta I_p$ .

As curvas, apresentadas na Figura 58 e na Figura 59, referem-se à probabilidade de ocorrência de sobretensões nos consumidores provenientes de descargas na rede MT. Na Figura 60 as curvas representam a probabilidade acumulada de sobretensões nos consumidores, provenientes de descargas na rede BT.

Na Figura 59, são apresentadas as curvas para cada resistividade do solo e quando identificado por “c”, mostram a que a rede possui compensação do número de aterramentos.

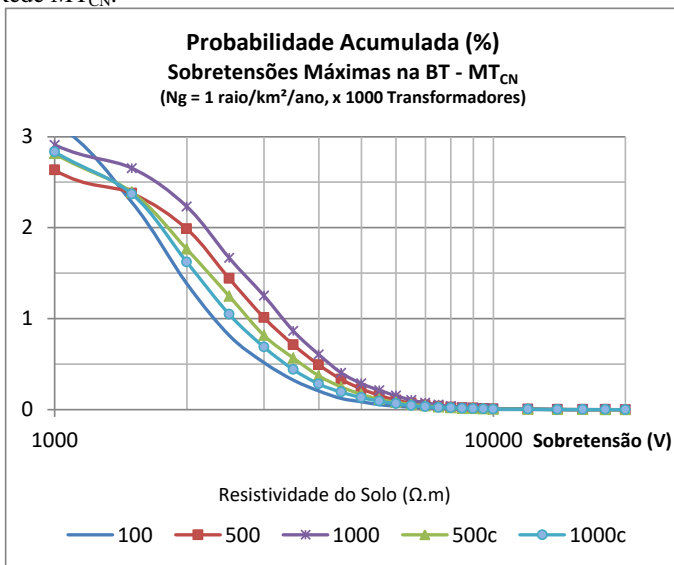
Para rede BT a curva de probabilidade de ocorrência é única, pelo efeito da compensação do número de aterramento ter um desempenho similar ao da rede sem compensação.

Figura 58 – Probabilidade Acumulada (%): Sobretensões Máximas Instalações BT – Rede MT<sub>SN</sub>.



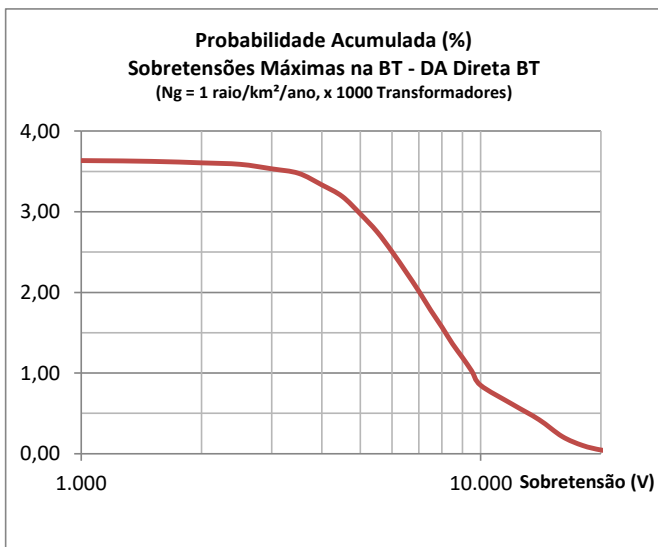
Fonte: Da autora (2019).

Figura 59 – Probabilidade Acumulada (%): Sobretensões Máximas Instalações BT – Rede MT<sub>CN</sub>.



Fonte: Da autora (2019).

Figura 60 – Probabilidade Acumulada (%): Sobretensões Máximas Instalações BT – Rede BT.



Fonte: Da autora (2019).



A quantidade de sobretensões de determinada magnitude depende do índice de densidade de descargas de determinada região,  $N_g$ . De acordo com [53], a cidade brasileira com o maior  $N_g$  é Santa Maria das Barreiras – PA, com 44,3 descargas/km<sup>2</sup>/ano.

Segundo a norma [18], o nível de tensão suportável de impulso deve ser definido pelo fabricante, porém as faixas mínimas a serem suportadas, podem ser verificadas na Tabela 31:

Tabela 31 – Faixas mínimas de tensão suportável de impulso.

<b>Nível de tensão suportável de impulso (kV)</b>	<b>Descrição dos Equipamentos</b>
1,0	equipamentos muito sensíveis (ex. TI)
1,5	eletrodomésticos sensíveis (ex. some imagem), eletrodomésticos e ferramentas
4,0	quadros secundários, interruptores, tomadas, etc.
6,0	quadro de distribuição, disjuntores

Fonte: [18].

## 6.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram analisados os comportamentos das sobretensões em função do ponto de impacto das descargas atmosféricas, a fim de obter informações relevantes, que permitam subsidiar as conclusões e comentários finais, apresentados no capítulo 7, próximo.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste estudo demandou um grande trabalho de pesquisa, tais como o levantamento de dados dos sistemas de distribuição, de referências bibliográficas sobre o assunto e anterioridades. Além disso, executou-se um elevado número de simulações de forma a obter a confiabilidade necessária aos resultados.

Em concordância com o mencionado na análise dos resultados, o comportamento das sobretensões, principalmente, para baixos valores de corrente de pico, dificultou a obtenção de padrões de comportamento das sobretensões, principalmente pela influência da topologia assimétrica do circuito de baixa tensão, assim como, pelas diferentes formas de onda utilizadas. Entretanto, escolher um modelo arbitrário, destoaria da premissa inicial definida para esta pesquisa, fidelidade aos padrões de redes utilizados pelas concessionárias brasileiras.

Pela análise do comportamento da tensão e da corrente ao longo da rede de média tensão, referente ao item 6.3, percebe-se que, mesmo para redes sem o condutor neutro em solos de alta resistividade as sobretensões de origem atmosférica sofrem atenuação e podem tornar-se inferior à tensão suportável do isolador após propagação na rede por pouco mais de 1 km, dependendo da amplitude da descarga. O uso do condutor neutro aterrado contribui significativamente para a atenuação das sobretensões que são reduzidas a valores inferiores à tensão suportável do isolador em uma distância inferior a 1 km. A utilização da compensação de elevados valores de resistência de aterramento com maior número de pontos de aterramento em locais de alta resistividade também se mostrou eficiente.

As sobretensões nas instalações consumidoras, provenientes de descargas diretas na média tensão em distâncias superiores a 1,2 km, ficam abaixo de 1000 V, mesmo para redes MT sem aterramento e em solos de elevada resistividade.

As probabilidades acumuladas de ocorrência de sobretensões mostram-se relativamente baixas. Porém considerando-se regiões com elevadas densidades de descargas e solos de alta resistividade, os números podem se tornar significativos. Exemplo, numa região com densidade de descargas igual a 10, redes MT sem neutro e solo com  $1000 \Omega.m$ , anualmente para cada 10.000 transformadores, esperam-se sobretensões superiores a 3000V em 2 deles. No entanto o número de consumidores do circuito atingidos ao mesmo tempo pode ser elevado, e contando-se o universo de circuitos de BT de concessionárias de grande porte, a quantidade de equipamentos avariados pode ser significativa, caso as instalações não sejam devidamente protegidas por DPS.

As máximas tensões obtidas na entrada do consumidor possuem altos valores de magnitude e o caso crítico se refere às descargas diretas na BT. As descargas diretas possuem maior magnitude que os surtos conduzidos pela rede MT, e estes resultados apontam a fragilidade das redes BT frente às descargas atmosféricas diretas. As probabilidades acumuladas de ocorrência de sobretensões máximas devido às descargas diretas são superiores aquelas obtidas para os surtos originados na MT. Porém, os cálculos foram feitos sem considerar coeficientes de blindagem, devido a edificações e arborização. Portanto, quanto maior o índice de urbanização da região onde está inserido o circuito, menor a probabilidade de descargas diretas na BT. Ainda assim, em casos de grandes danos às instalações, a causa provável é a descarga direta na rede BT ou na própria edificação. Porém, a proteção natural das redes MT e das edificações ajudam a diminuir a possibilidade de existirem elevados valores de sobretensão e corrente.

Ao final, conclui-se que este trabalho atingiu seus objetivos. Além disso, os resultados aqui apresentados podem subsidiar diversos estudos ou ainda servir de modelo para outros:

- O circuito BT modelo utilizado pode sofrer alterações significativas de região para região. A determinação de diversos circuitos típicos pode aumentar a grau de confiança das estatísticas.
- De posse dos resultados deste trabalho é possível realizar estudos de estimativas de taxa de falhas de para-raios, transformadores e DPS.
- Ainda para melhorar os resultados, o desenvolvimento no ATP de uma chave comandada por tensão, que leve em consideração a forma de onda instantânea na definição de tensão disruptiva para fins de modelagem do isolador seria de grande utilidade. Tal elemento já existe em software similar.

## 8 REFERÊNCIAS

- [1] V. Coelho, “Influência das descargas atmosféricas no desempenho de sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica,” 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2005.
- [2] ANEEL, *Resolução Normativa N° 414*, 2010.
- [3] PRODIST - Procedimentos de distribuição de Energia Elétrica no sistema elétrico nacional, ANEEL, [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/prodist>. [Acesso em Out 2018].
- [4] V. Coelho, “Análise do Desempenho de Redes Aéreas de Distribuição de Média Tensão Frente à Ação das Descargas Atmosféricas,” 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2010.
- [5] A. A. Shiga, “Avaliação dos custos decorrentes de descargas atmosféricas em sistemas de distribuição de energia,” 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo., São Paulo, 2007.
- [6] ATPDraw - The graphical preprocessor to ATP, [Online]. Available: <https://www.atpdraw.net/index.php>. [Acesso em 24 Agosto 2018].
- [7] J. Paulino, “Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por descargas atmosféricas,” 100 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas., Campinas, 1994.
- [8] A. Piantini e A. Silva Neto, “Distúrbios em linhas de baixa tensão causados por descargas atmosféricas indiretas,” *O Setor Elétrico*, n. 43, Agosto de 2009.
- [9] A. Piantini e J. Janiszewski, “Avaliação do número de interrupções em linhas de média tensão devido a descargas atmosféricas indiretas,” SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2005.
- [10] A. Monticelli e A. Garcia, *Introdução a sistemas de energia elétrica*, Campinas: Unicamp, 2003.
- [11] A. N. d. Souza, B. F. d. Barros, J. E. Rodrigues e R. Borelli, *SPDA - Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas*, vol. I, São Paulo: Saraiva, 2017.

- [12] S. Visacro Filho, *Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia*, vol. I, São Paulo: Artliber, 2005.
- [13] IEEE Power Engineering Society, “Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines,” IEEE Std 1410, New York, 2010.
- [14] CIGRE, *Lightning Parameters for Engineering Applications*, Working Group: C4.407, August 2013.
- [15] V. Cooray, *Lightning Protection*, London, 2010.
- [16] ONS - Operador Nacional do Sistema, [Online]. Available: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. [Acesso em 30 Novembro 2018].
- [17] P. Chowdhuri, J. Anderson e W. Chisholm, “Parameters of Lightning Strokes: A Review,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, vol. 20, pp. 346-358, Jan 2005.
- [18] ABNT, *Proteção contra descargas atmosféricas*, NBR 5419, Rio de Janeiro, 2015.
- [19] S. Visacro Filho, J. Soares e M. Schroeder, “Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station,” *Journal of Geophysical Research* 109, 2004b.
- [20] A. Silva Neto, “Tensões Induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição de baixa tensão,” 159 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo., São Paulo, 2004.
- [21] P. Chowdhuri, “Significant Parameters in Estimating the Striking Distance of Lightning Strokes to Overhead Lines,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.4, n° 3, July de 1989.
- [22] M. Shigihara, “Modeling of the behavior of medium voltage insulators against lightning overvoltages,” São Paulo, 2015, 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo.
- [23] M. Shigihara, A. Piantini, M. Ramos, C. Braz, C. Mazzetti e A. Ancajima, *A proposal for the Prediction of the volt-time curves of MV insulators based on the disruptive effect model*, International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, 2015.
- [24] A. A. Carrus, E. Cinieri e C. Mazzetti, “Optimal selection of disruptive effect models parameters for the reproduction of MV

- insulators volt-time characteristics under standard and non standard lightning impulses,” Power Tech 2007, Lausanne, July 2007.
- [25] ABNT, *Coordenação de isolamento - Procedimento*, NBR 6939, Rio de Janeiro, 2018.
- [26] ABNT, *Redes de distribuição aérea com condutores nus*, NBR 15688, Rio de Janeiro, 2010 .
- [27] FECOERGS - Federação das Cooperativas de Energia, Telefonia e Desenvolvimento Rural do Rio Grande do Sul, *Padronização - Transformadores de Distribuição - ETD 007.01.22*, Porto Alegre, 2009.
- [28] BALESTRO, “Isoladores Poliméricos Tipo Pilar,” [Online]. Available: <http://www.balestro.com.br/wp-content/uploads/2015/05/Isoladores-polim%C3%A9ricos-Tipo-Pilar-IPBPL.pdf>. [Acesso em 16 Outubro 2018].
- [29] A. Conti, E. Perez, E. Soto, F. H. Silveira, S. Visacro e H. Torres., “Calculation of Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines Including insulation Breakdown,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2010, vol. 25, nº 4.
- [30] FECOERUSC - Federação da Cooperativas de Energia do Estado de Santa Catarina, *Critérios Básicos para Elaboração de Projetos - Norma Técnica e Padronização*, FECO - D02, Içara, 2009.
- [31] ABNT, *Cabos de Alumínio de nus com alma de alço zincado para linhas aéreas - Especificação*, NBR 7270, Rio de Janeiro 2009.
- [32] ABNT, *Cabos de alumínio nus para linhas aéreas - Especificação*, NBR 7271, Rio de Janeiro, 2009..
- [33] CLAMPER, *Proteção de equipamentos elétricos e eletrônicos contra surtos elétricos em instalações*, Lagoa Santa: Editora CLAMPER, 2016.
- [34] Celesc Distribuição S.A., “Norma Técnica N-321.0001 - Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição,” Florianópolis, 2015.
- [35] G. Kindermann e J. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, vol. I, Florianópolis: UFSC, 2002.
- [36] I. Bacca, *ATPDraw Introdução*, Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso, 2007.
- [37] Microsoft, “Excel,” Microsoft Corporation , [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/pt->

- br/p/excel/cfq7ttc0k7dx?activetab=pivot:overviewtab. [Acesso em 7 Fevereiro 2019].
- [38] The MathWorks, Inc, “ MathWorks - MATLAB,” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. [Acesso em 7 Fevereiro 2019].
- [39] L. Prikler e H. Hoidalén, “ATPDraw Version 5.6 - User's Manual,.” Norway, 2009.
- [40] P. Obase, “Manual interno do ATPDraw da Seção Técnica de Estudos do IEE/USP,” São Paulo, 2014.
- [41] L. C. Felício, Modelagem da Dinâmica de Sistemas e Estudo da Resposta - Segunda edição, São Carlos: RiMa, 2010.
- [42] Celesc Distribuição S.A., “Sistema de Desenvolvimento de Sistemas de Distribuição,” Manual Especial, Florianópolis.
- [43] A. Raizer, J. Paulino, V. Coelho, D. Lima, C. Jamil, F. Nyland e V. Coelho, “Desenvolvimento do Modelo de Proteção Contra Sobretensões em Redes de distribuição (MT/BT) devido à descargas atmosféricas,” ANEEL - Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico Brasileiro, PROJETO RGE 0397-025-2005, Relatório Final, Brasília, 2007.
- [44] A. Piantini e A. Kanashiro, “A distribution transformer model for calculating transferred voltages,” Proc. of the 26th International Conference on Lightning Protection, vol. II, pp. 429-434, Cracow, Poland, Sep. 2002..
- [45] ABB High Voltage Technologies Ltd, Application Guidelines Overvoltage Protection (LV), Wettingen, 2001.
- [46] ABB High Voltage Technologies Ltd, “Surge arrester POLIM-D - Technical Data,” [Online]. Available: <https://new.abb.com/high-voltage/surge-arresters/medium-voltage-arresters/distribution-systems/polim-d>. [Acesso em 22 Novembro 2018].
- [47] P. Obase, “Surtos Atmosféricos transferidos à rede Secundária via Transformador,” 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [48] M. Da Silva, “Análise de Desempenho de Redes de Distribuição Monofilares com Retorno Pela Terra (MRT) Frente a Descargas Atmosféricas,” 115 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.
- [49] S. Hintamai e J. Hokiért, “Surge impedance of concrete pole due to



- effect of the electrical proprieties of concrete,” *Kasetsart University, Departament* , pp. 397-400, IEEE Region 10 Conference TENCON, 2004.
- [50] H. Almeguer, R. Coelho, V. Coelho, P. Nosaki e A. Piantini, “A Feasibility Study on the use of concrete pole bases as a grounding Topology for Distribution Systems,” 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), Belo Horizonte, 2013 .
- [51] Celesc Distribuição S.A., “Norma Técnica I 313.0013 - Aterramento de Equipamentos, Redes e Linhas.,” Florianópolis, 1995.
- [52] S. V. Filho, *Aterramentos Elétricos*, São Paulo: Artibeler, 2002.
- [53] INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, [Online]. Available: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>. [Acesso em 02 Fevereiro 2019].