UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LUIZ ANTONIO PERGENTINO

Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a
Partir de Medidas em Campo

São Carlos
2019

LUIZ ANTONIO PERGENTINO

Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a
Partir de Medidas em Campo

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2019

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P952 Pergentino, Luiz Antonio
/ Luiz Antonio Pergentino; orientador Ivan Nunes
da Silva. São Carlos, 2019.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de
Concentração em Sistemas Elétricos de Potência --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

1. Descargas atmosféricas. 2. Proteção contra
sobretensões. 3. Para-raios de distribuição. 4.
Manutenção preventiva. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **LUIZ ANTONIO PERGENTINO**.

Título da dissertação: "Avaliação do impacto de descargas atmosféricas em sistemas de distribuição a partir de medidas em campo".

Data da defesa: 19/12/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Ivan Nunes da Silva**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **José Alfredo Covolan Ulson**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

APROVADO

Prof. Dr. **Marcelo Suetake**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Titular **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

A minha esposa Priscila e minhas filhas Giovana e Giulia pela compreensão apesar das horas da minha atenção subtraídas quando me dedicava a este trabalho, carinho e apoio incansável.

AGRADECIMENTOS

Aos Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva (meu ilustríssimo orientador e amigo), pela valiosa orientação, apoio constante, interesse e dedicação;

Aos Prof. Dr. Danilo Spatti e, em especial o Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino (o considero como um amigo), pela colaboração neste trabalho que contribuiu com a minha formação acadêmica e profissional;

Ao corpo de gestão da EDP São Paulo, representada na figura do Gestor Operacional do Planejamento de Manutenção de Redes de Baixa e Média Tensão, Walker Alexandre de Souza, pelo apoio ao meu curso de pós-graduação, apoio à realização deste trabalho e pela compreensão em razão das várias horas de ausência nas minhas atividades de trabalho;

A equipe do Centro de Serviço da Distribuição Poá e, em especial os colaboradores Janailton Zumba e Sandro Rogério, que em nenhum momento deixaram o projeto de lado, mesmo que houvesse a competição das atividades do projeto em relação às atividades inerentes à manutenção do sistema elétrico local, sobretudo no período do verão, notório pelas ocorrências imprevistas no sistema elétrico;

A equipe da Sete Engenharia e em especial os professores Eduardo Brasil e Marco Aurélio, pela garra com que se dedicaram a este projeto e pela perfeita condução das atividades;

Ao Fabricio Expedito Viana e Gabriel Henrique de Aguiar Batista, companheiros de empresa e parceiros de quilometragem e estudo;

Aos colegas Danilo Fortes, Rodolfo Ota e Alexandre Rodello, pela disposição em ajudar em qualquer ocasião;

E a todos os outros que me ajudaram durante o desenvolvimento do trabalho.

EPIGRAFE

“O relâmpago antecipa-se ao raio, a
graça precede a modéstia”.

Eclesiástico 32:10

RESUMO

PERGENTINO, L. A. Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a Partir de Medidas em Campo. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

A incidência direta ou indireta de descargas atmosférica nas linhas de distribuição é um dos grandes problemas que afetam a qualidade do serviço de energia elétrica, gerando danos às linhas de transmissão e distribuição e multas para as companhias elétricas. O evento geralmente causa desligamentos não programados e é importante entender de que forma as descargas atmosféricas afetam a rede de distribuição. Este trabalho enfoca aspectos fundamentais sobre descargas atmosféricas em sistemas de distribuição, abordando questões relacionadas à frequência de descargas atmosféricas, frequências de sobretensões, propagação de ondas em pontos da rede elétrica de distribuição e correntes em para-raios. Abordou-se informações relacionadas a concessionária EDP – SP, como é o comportamento da rede elétrica mediante ocorrências de descargas atmosféricas, os desligamentos dos equipamentos existentes na rede e os impactos nas unidades consumidoras abastecidos por estes dispositivos. São apresentados os conceitos envolvidos na análise das correntes de raios e as formas de relacionar esses dados com as ocorrências de descargas diretas a linha e de surtos induzidos. Além disso, são apresentados conceitos baseados na relação entre a quantidade de descargas e a intensidade das correntes de descargas atmosféricas a que são submetidos os para-raios da rede de distribuição. Este trabalho consistiu ainda na busca de informações a respeito dos principais aspectos envolvendo os para-raios, bem como seu contexto de atuação, nas mais diversas bases de dados técnico-científicas existentes e pautou os aspectos técnicos necessários à definição da área piloto onde serão instalados os dispositivos para-raios e os contadores de descargas elétricas. Foram realizadas análises dos registros de ocorrências na base fornecida pela EDP, bem como cruzamento dos dados enviados pelo INPE sobre descargas atmosféricas na região de concessão da concessionária.

Palavras-chave: Descargas atmosféricas, proteção contra sobretensões, para-raios de distribuição, manutenção preventiva.

ABSTRACT

PERGENTINO, L. A. **Impact Assessment of Lightning Strikes on Distribution Systems from Field Measurements.** Dissertation Master's Degree presented the School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The direct or indirect incidence of lightning strikes on distribution lines is one of the major problems affecting the quality of electricity service, causing damage to transmission and distribution lines and fines for electric utilities. The event often causes unplanned shutdowns and it is important to understand how lightning strikes affect the distribution network. This work focuses on fundamental aspects of lightning strikes in distribution systems, addressing issues related to lightning frequency, overvoltage frequencies, wave propagation at distribution grid points and lightning currents. Information related to the EDP - SP concessionaire was addressed, such as the behavior of the electricity grid through lightning, the disconnection of existing equipment on the network and the impacts on consumer units supplied by these devices. The concepts involved in the analysis of lightning currents and the ways of relating these data to the occurrence of direct line discharges and induced surges are presented. In addition, concepts based on the relationship between the amount of discharges and the intensity of the lightning currents to which the lightning rods are subjected is presented. This work also consisted in the search for information about the main aspects involving the arresters, as well as their context of operation, in the most diverse existing technical-scientific databases and guided the technical aspects necessary to define the pilot area where they will be installed the lightning arresters and lightning counters. Occurrence records were analyzed in the database provided by EDP, as well as data sent by INPE on lightning strikes in the concessionaire's concession region.

Keywords: Lightning, overvoltage protection, distribution surge arrester, preventive maintenance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química clássica dos varistores de ZnO (OLIVEIRA, 2004).	51
Tabela 2: Características dos óxidos mais utilizados na fabricação de varistores de ZnO (FRANCO, 1993).	52
Tabela 3: Compilação dos parâmetros estatísticos por distribuição log-normal para descargas descendentes negativas levantados pelo CIGRÉ [adaptada de (CIGRÉ, 1991)].	73
Tabela 4: Tabela de classificação de ocorrências de desligamento da EDP-SP (fonte: EDP-SP)	85
Tabela 5: Quantidade de descargas atmosféricas de 2013-2019 na área de concessão da EDP-SP (elaborado pelo autor).	88
Tabela 6: Identificação dos transformadores candidatos à área piloto (SUZ-1306).	95
Tabela 7: Especificações dos contadores de descargas atmosféricas	96
Tabela 8: Planilha de controle para as leituras coletadas mensalmente nas estações transformadoras do projeto.....	108
Tabela 9: Dados da medição e determinação da resistividade aparente do solo	132
Tabela 10: Dados coletados durante 9 meses na ET 5333.	139
Tabela 11: Dados coletados durante 9 meses na ET 2718.	139
Tabela 12: Dados coletados durante 9 meses na ET 5412.	139
Tabela 13: Dados coletados durante 9 meses na ET 5413.	140
Tabela 14: Dados coletados durante 9 meses na ET 540673.	140
Tabela 15: Dados coletados durante 9 meses na ET 253	140
Tabela 16: Dados coletados durante 9 meses na ET 3604.	141
Tabela 17: Ddados coletados durante 9 meses na ET 1665.	141

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Desembolso financeiro da distribuidora em função de transgressão de indicadores de fornecimento.....	33
Figura 2: Duração Equivalente das Interrupções – DEC EDP–SP 2019 (fonte: EDP–SP).	34
Figura 3: Frequência Equivalente das Interrupções – FEC EDP–SP 2019 (fonte: EDP–SP)......	34
Figura 4: Os 28 municípios da área de concessão da EDP–SP e a quantidade de raios que cada cidade recebeu desde 2013 a data atual (elaborado pelo autor).	35
Figura 5: Correlação entre ocorrências de desligamentos da rede elétrica versus incidência de descargas atmosféricas na cidade de Guararema (SP) em janeiro de 2019 (elaborado pelo autor).	36
Figura 6: Precipitação em Guararema (SP) em dezembro de 2018 (elaborado pelo autor).....	36
Figura 7: Diagrama de blocos do projeto de pesquisa e desenvolvimento EDP e USP São Carlos.	38
Figura 8: Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D’AJUZ <i>et al.</i> , 1985).	47
Figura 9: Curvas de tensão e corrente de para-raios de ZnO, de SiC e ideal [adaptada de (MAMEDE, 2005)].	48
Figura 10: Característica de tensão e corrente para o carboneto de silício e o óxido de zinco (D’AJUZ <i>et al.</i> , 1985).	50
Figura 11: Curva característica de V versus I para um resistor não linear de ZnO [adaptada de (OLIVEIRA, 2004)].	53
Figura 12: Dependência do coeficiente não linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica [adaptada de (FURTADO, 2005)].	54
Figura 13: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro de porcelana [adaptada de (HINRICHSEN, 2001)].	55
Figura 14: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro polimérico [adaptada de (HINRICHSEN, 2001)].	56
Figura 15: Característica potência consumida versus tempo para resistores de ZnO de primeira, segunda e terceira geração (SANTOS, 2007).	58
Figura 16: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de $8 \times 20 \mu\text{s} - 400 \text{A/cm}^2$ (SANTOS, 2007).	59
Figura 17: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de $500 \times 1500 \mu\text{s} - 35 \text{A/cm}^2$ (SANTOS, 2007).	59
Figura 18: Curva característica típica de um varistor de ZnO (FRANCO, 2008).	61

Figura 19: Distribuição das cargas nas nuvens [adaptada de (UMAN, 1984)].....	65
Figura 20: Probabilidade da amplitude máxima de corrente em virtude da polaridade da descarga [adaptado de (NOBLAT, 1994)].	66
Figura 21: Visão geral de uma descarga atmosférica [adaptado de Rakov e Uman (2003)].	67
Figura 22: Representação da formação das descargas subsequentes [adaptada de (UMAN, 1984)].	68
Figura 23: Sinal típico da corrente de uma descarga atmosférica. O registro foi feito na estação do Morro do Cachimbo (VISACRO, 2005).	69
Figura 24: Onda dupla exponencial (VISACRO, 2005).	70
Figura 25: Representação da onda de corrente utilizando a curva de Heidler [5].	71
Figura 26: Forma de onda típica da corrente de descarga com seus principais parâmetros associados para uma descarga nuvem-solo negativa [adaptada de (CIGRÉ, 1991; IEEE, 2004)].	72
Figura 27: Distribuição acumulada de corrente baseada na equação de Anderson (ANDERSON, 1982).	74
Figura 28: Mapa de curvas isoceraúnicas do Brasil (NBR 5419, 2005).	74
Figura 29: Mapa de curvas isoceraúnicas da região Sudeste para o período de 1971 a 1995 (NBR 5419, 2005).	75
Figura 30: Número médio de dias de trovoadas por ano (T_d) na região sudeste do Brasil de 1999 a 2006 (fonte: Pinto Jr, Naccarato e Pinto, 2003).	76
Figura 31: Mapa de isodensidades (N_g) da região Sudeste do Brasil (descargas atmosféricas/km ² /ano). Fonte: ABNT, 2015.	76
Figura 32: Linha de transmissão sem para-raios atingida por uma descarga atmosférica direta em um de seus condutores energizados [adaptada de (VISACRO, 2005)].	79
Figura 33: Linha de transmissão atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica direta [adaptada de (VISACRO, 2005)].	80
Figura 34: Representação da reflexão da onda de tensão e determinação da onda resultante no topo da torre [adaptada de (VISACRO, 2005)].	81
Figura 35: Fenômeno do Back flashover no topo da torre e meio do vão [adaptada de (VISACRO, 2005)].	82
Figura 36: Representação de uma linha de distribuição afeta pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica indireta [adaptada de (VISACRO, 2005)].	83
Figura 37: Ocorrências para Aparecida (APA).	87
Figura 38: Descargas atmosféricas para APA.	87

Figura 39: Mapas de intensidade de descargas atmosféricas.	89
Figura 40: Mapa de polaridade negativa para o período 2006-2008.....	90
Figura 41: Mapa de polaridade negativa para o período 2014-2015.....	91
Figura 42: Mapa de variação da densidade de descargas atmosféricas para os dois períodos analisados.	92
Figura 49: Cruzamento de informações para SUZ-1306.....	92
Figura 50: Trecho do alimentador SUZ-1306 sobreposto aos registros das intensidades e quantidades de descargas atmosféricas 2014 e 2015.	94
Figura 51: Trecho do alimentador SUZ-1306 contendo os transformadores de distribuição.	94
Figura 52: Exemplo de posicionamento dos contadores instalados em série no condutor de descida do aterramento.....	97
Figura 53: ET candidata 2251.	99
Figura 54: ET candidata 4693.	100
Figura 55: ET candidata 0253.	101
Figura 56: ET candidata 0253.	101
Figura 57: ET candidata 4693.	102
Figura 58: ET candidata 4693.	102
Figura 59: ET candidata 4693.	103
Figura 60: ET candidata 4693.	103
Figura 61: ET candidata 4693.	104
Figura 62: ET candidata 4693.	104
Figura 63: ET candidata 5412.	105
Figura 64: ET candidata 4693.	105
Figura 65: Localização das ET's investigadas e das ET's escolhidas.....	106
Figura 66: Equipamento contador de descarga atmosférica.....	107
Figura 67: Localização do trecho de rede para a reposição do neutro onde o condutor foi furtado.	110
Figura 68: Densidade de descargas atmosféricas.	111
Figure 69: Densidades de ocorrências.....	111
Figura 70: Mapa de energia “densidade de descargas” x “densidade de ocorrências”.	112
Figura 71: Mapa de sensibilidade.....	113
Figura 72: Densidade de rede primária.	113
Figure 73: Mapa de sensibilidade de descargas atmosféricas.	114
Figura 74: Medição da resistividade do solo em laboratório.	125

Figura 75: Disposição das hastes de prova para a medição da resistividade do solo.	126
Figura 76: Esquema de ligação do terrômetro para medição da resistividade do solo.	127
Figura 77: Circulação da corrente em várias camadas do solo.	128
Figura 78: Verificação da calibração do aparelho de medição	129
Figura 79: Verificação da calibração do aparelho de medição com inserção de resistor.	130
Figura 80: Conexões do terrômetro para medição da resistividade do solo.	131
Figura 81: Sistema primário a 3 fios com neutro secundário contínuo.	132
Figura 82: Sistema primário a 4 fios com neutro secundário contínuo.	132
Figura 83: Representação de um sistema com neutro contínuo e multiterrado.	133
Figura 84: Esquema de medição quando a descida do aterramento é externa ao poste.....	134
Figura 85: Esquema de medição quando a descida do aterramento é interna ao poste.	134
Figura 86: Posicionamento do terrômetro em postes de 10,5 m e 12 m.	135
Figura 87: Posicionamento do terrômetro para estruturas CE – ET e CE3 – ET.	135
Figura 88: Posicionamento do terrômetro para transformador trifásico.	136
Figura 89: Ocorrências para BCU.....	142
Figura 90: Ocorrências para BIR.	142
Figura 91: Ocorrências para BOI.	143
Figura 92: Ocorrências para BOM.....	143
Figura 93: Ocorrências para BRR.	143
Figura 94: Ocorrências para CAC.....	144
Figura 95: Ocorrências para CAR.....	144
Figura 96: Ocorrências para CMB.	144
Figura 97: Ocorrências para CPA.	145
Figura 98: Ocorrências para CRU.....	145
Figura 99: Ocorrências para CSO.	145
Figura 100: Ocorrências para DUT.....	146
Figura 101: Ocorrências para FER.....	146
Figura 102: Ocorrências para GOP.	146
Figura 103: Ocorrências para GUE.....	147
Figura 104: Ocorrências para GUL.....	147
Figura 105: Ocorrências para GUR.	147
Figura 106: Ocorrências para INP.	148
Figura 107: Ocorrências para IPO.	148
Figura 108: Ocorrências para ITQ.	148

Figura 109: Ocorrências para JAC.	149
Figura 110: Ocorrências para JCE.....	149
Figura 111: Ocorrências para JNO.....	149
Figura 112: Ocorrências para LOR.	150
Figura 113: Ocorrências para MAP.....	150
Figura 114: Ocorrências para MAS.....	150
Figura 115: Ocorrências para MCI.....	151
Figura 116: Ocorrências para MRE.....	151
Figura 117: Ocorrências para PID.....	151
Figura 118: Ocorrências para PIL.	152
Figura 119: Ocorrências para PME.	152
Figura 120: Ocorrências para POA.	152
Figura 121: Ocorrências para SAL.....	153
Figura 122: Ocorrências para SBR.....	153
Figura 123: Ocorrências para SJC.....	153
Figura 124: Ocorrências para SKO.	154
Figura 125: Ocorrências para SLU.....	154
Figura 126: Ocorrências para SSC.	154
Figura 127: Ocorrências para SUZ.....	155
Figura 128: Ocorrências para TAU.....	155
Figura 129: Ocorrências para UNA.....	155
Figura 130: Ocorrências para VGA.....	156
Figura 131: Ocorrências para VHE.	156
Figura 132: Ocorrências para VJS.....	156
Figura 133: Ocorrências para VSL.....	157
Figura 134: Descargas atmosféricas para BCU.....	158
Figura 135: Descargas atmosféricas para BIR.	158
Figura 136: Descargas atmosféricas para BOI.	159
Figura 137: Descargas atmosféricas para BON.	159
Figura 138: Descargas atmosféricas para BRR.....	159
Figura 139: Descargas atmosféricas para CAC.....	160
Figura 140: Descargas atmosféricas para CAR.....	160
Figura 141: Descargas atmosféricas para CMB.....	160
Figura 142: Descargas atmosféricas para CPA.	161

Figura 143: Descargas atmosféricas para CRU.	161
Figura 144: Descargas atmosféricas para CSO.	161
Figura 145: Descargas atmosféricas para DUT.	162
Figura 146: Descargas atmosféricas para FER.	162
Figura 147: Descargas atmosféricas para GOP.	162
Figura 148: Descargas atmosféricas para GUE.	163
Figura 149: Descargas atmosféricas para GUL.	163
Figura 150: Descargas atmosféricas para GUR.	163
Figura 151: Descargas atmosféricas para INP.	164
Figura 152: Descargas atmosféricas para IPO.	164
Figura 153: Descargas atmosféricas para ITQ.	165
Figura 154: Descargas atmosféricas para JAC.	165
Figura 155: Descargas atmosféricas para JCE.	165
Figura 156: Descargas atmosféricas para JNO.	166
Figura 157: Descargas atmosféricas para LOR.	166
Figura 158: Descargas atmosféricas para MAP.	166
Figura 159: Descargas atmosféricas para MAS.	167
Figura 160: Descargas atmosféricas para MCI.	167
Figura 161: Descargas atmosféricas para MRE.	167
Figura 162: Descargas atmosféricas para PID.	168
Figura 163: Descargas atmosféricas para PIL.	168
Figura 164: Descargas atmosféricas para PME.	168
Figura 165: Descargas atmosféricas para POA.	169
Figura 166: Descargas atmosféricas para SAL.	169
Figura 167: Descargas atmosféricas para SBR.	169
Figura 168: Descargas atmosféricas para SJC.	170
Figura 169: Descargas atmosféricas para SKO.	170
Figura 170: Descargas atmosféricas para SLU.	170
Figura 171: Descargas atmosféricas para SSC.	171
Figura 172: Descargas atmosféricas para SUZ.	171
Figura 173: Descargas atmosféricas para TAU.	171
Figura 174: Descargas atmosféricas para UNA.	172
Figura 175: Descargas atmosféricas para VGA.	172
Figura 176: Descargas atmosféricas para VHE.	172

Figura 177: Descargas atmosféricas para VJS.	173
Figura 178: Descargas atmosféricas para VSL.	173

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	–	Aparecida
ATP	–	Alternative Transients Program
BCU	–	Brás Cubas
BIR	–	Biritiba
BOI	–	Boiçucanga
BON	–	Bonsucesso
BrasilDAT	–	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
BRR	–	Barreiro
CAC	–	Caçapava
CAR	–	Caraguatatuba
CEA	–	Canadian Electricity Association
CIGRÉ	–	International Council on Large Electric Systems
CMB	–	Cumbica
CPA	–	Cachoeira Paulista
CRU	–	Cruzeiro
CSO	–	Cesar de Sousa
DUT	–	Dutra
EDP	–	Energias de Portugal
ELAT	–	Grupo de Eletricidade Atmosférica
EMTP	–	Eletromagnetic Transients Program
ET	–	Estação Transformadora
ETD	–	Estação Transformadora de Distribuição
FER	–	Ferraz
GOP	–	Gopouva
GUE	–	Guararema
GUL	–	Guarulhos
GUR	–	Guaratinguetá
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronic Engineers
INP	–	Independência
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPO	–	Iporanga
ITQ	–	Itaquaquecetuba

JAC	–	Jacareí
JCE	–	José Centro
JNO	–	João Novaes
LD	–	Linha de Distribuição
LOR	–	Lorena
LT	–	Linha de Transmissão
MAP	–	Manuel Areias Pereira
MAS	–	Massaguaçu
MCI	–	Mogi Cidade
MRE	–	Maresias
NBI	–	Nível Básico de Isolamento
PID	–	Pindamonhangaba
PIL	–	Parque Industrial
PME	–	Pimentas
POÀ	–	Poá
RINDAT	–	Rede Nacional de Localização de Descargas Atmosféricas
SAL	–	Salesópolis
SBR	–	Santa Branca
SiC	–	Carboneto de Silício
SJC	–	São José dos Campos
SKO	–	Skol
SLU	–	São Luiz
SSC	–	São Sebastião
SUZ	–	Suzano
TAU	–	Taubaté
UNA	–	Una
VGA	–	Vila Galvão
VHE	–	Vila Hermínia
VJS	–	Valter José dos Santos
VSL	–	Vale do Sol
ZnO	–	Óxido de Zinco

Sumário

Capítulo 1.	Introdução	31
	1.1.) MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA	31
	1.2.) OBJETIVO	39
	1.3.) ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	39
	1.4.) ATIVIDADES DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICAS	39
Capítulo 2.	Aspectos Fundamentais Relacionados aos Pára-Raios.....	41
	2.1.) INTRODUÇÃO	41
	2.2.) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICA	41
	2.3.) PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS PARA-RAIOS.....	45
	2.4.) HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO	46
	2.5.) PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	50
Capítulo 3.	Características das Descargas Atmosféricas	63
	3.1.) DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS	63
	3.2.) PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUENS.....	64
	3.3.) PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	65
	3.4.) CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DA ONDA DE CORRENTE DE DESCARGA.....	68
	3.5.) INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	74
	3.6.) TIPOS DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E RESPECTIVAS CONSEQUÊNCIAS	77
Capítulo 4.	Processamento de Descargas Atmosféricas para Determinação de Alimentador Piloto	85
	4.1.) PROCESSAMENTO DE OCORRÊNCIAS	86
	4.2.) PROCESSAMENTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	87
	4.3.) INSTALAÇÃO DE CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS	88
	4.4.) MAPAS DE INTENSIDADE	89
	4.5.) MAPAS DE DENSIDADE.....	91
	4.6.) CRUZAMENTO DE INFORMAÇÕES PARA ESCOLHA DO ALIMENTADOR PILOTO	92
	4.7.) ESCOLHA DAS ESTAÇÕES TRANSFORMADORAS CANDIDATAS PARA INSTALAÇÃO DOS CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	93
	4.8.) CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	95
	4.9.) CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DOS TRANSFORMADORES EM QUE SERÃO INSTALADOS OS CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	98
	4.10.) PASSO A PASSO DAS ATIVIDADES PARA A ESCOLHA DOS TRANSFORMADORES	98
	4.11.) ESCOLHA DAS ESTAÇÕES TRANSFORMADORAS DA ÁREA PILOTO.....	99
	4.12.) PROJETO PARA INSTALAÇÃO DOS PARA-RAIOS E CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ÁREA PILOTO	106
	4.13.) CONSIDERAÇÕES PARCIAIS	109
	4.14.) ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE DESCARGAS E OCORRÊNCIAS ..	110
	4.15.) MAPAS DE ENERGIA	112
	4.16.) RELACIONAMENTO ENTRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E REDE PRIMÁRIA.....	113
Capítulo 5.	Conclusão.....	115
	5.1.) CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
	5.2.) PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	117
Capítulo 6.	Referências Bibliográficas.....	119
Apêndice A –	Medição da Resistividade do Solo e Utilização do Alicates Terrômetro na Área Piloto	125

Apêndice B – Sistemática de Retirada, Transporte, Armazenamento e Envio dos Para-Raios Retirados da Rede Para Ensaios em Laboratório.....	137
Apêndice C – Tabelas com as informações coletadas em campo dos contadores de descargas atmosféricas.....	139
Apêndice D – Gráficos de ocorrências para as causas vento, descargas atmosféricas, causas não determinadas e não classificadas das subestações estudadas.....	142
Apêndice E – Mapa de densidade de descargas atmosféricas por subestação e suas redes elétricas	158

Capítulo 1. Introdução

1.1.) MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

Segundo estimativas de especialistas em monitoramento e estudos sobre descargas atmosféricas no Brasil e no mundo, destaque para a brasileira INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), o Brasil é um dos países onde mais se ocorre a queda de descargas atmosféricas no mundo, com cerca de 70 milhões de raios por ano (SANTOS, 2009). As descargas atmosféricas são responsáveis por muitos desligamentos das linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica apesar de suas redes serem protegidas através do uso de para-raios de linha. Ainda segundo o INPE, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição são provocados por raios no Brasil, sendo o número de transformadores queimados por raios em torno de 40% (SANTOS, 2009).

Tais eventos causam impacto considerável na qualidade e no fornecimento de energia, o que pode ser constatado pela alta correlação entre a incidência de descargas e os índices DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) da maioria das empresas do setor elétrico. O DEC indica o número de horas que, em média, as unidades consumidoras de determinado consumo ficaram sem energia elétrica durante um determinado período. Já o FEC indica quantas vezes, em média, as unidades consumidoras de determinado conjunto sofreram interrupção. A cada ano, por questões relacionadas à melhoria contínua da qualidade do fornecimento de energia elétrica, conforme obrigações decorrentes dos contratos de concessão e da regulação do mercado de energia elétrica, a cobrança às distribuidoras pela redução dos valores DEC e FEC aumenta a cada ano visando uma maior quantidade de disponibilidade do sistema.

Além dos indicadores coletivos DEC e FEC, as quantidades de horas que uma unidade consumidora individualmente fica sem fornecimento de energia elétrica é medida pelo indicador DIC que é o intervalo de tempo que, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica e pelo FIC (frequência de interrupção individual por unidade consumidora), sendo o número de interrupções ocorridas, no período de apuração, em cada unidade consumidora ou ponto de conexão.

O impacto econômico que as empresas de distribuição de energia elétrica sofrem devido às penalidades impostas pelas agências reguladoras em decorrência dos desligamentos não programados gira em torno de milhões de reais; sem falar nos prejuízos que atingem tanto o setor

econômico, sobretudo na interrupção dos processos produtivos, quanto o setor social, afetando o funcionamento de aparato de segurança e saúde, que atende a população.

Como já mencionado, o Brasil recebe um grande volume de descargas atmosféricas a cada ano. Porém, em especial, a região sudeste do Brasil e em destaque o estado de São Paulo destoa ainda mais quando se verifica o volume de incidência de raios. Não coincidentemente, o INPE está instalado na cidade de São José dos Campos (SP), cidade localizada a 100 quilômetros da capital paulista. São José dos Campos é uma cidade integrante da região conhecida como Vale do Paraíba, região muito afetada por quedas de raios e uma das 28 cidades da área de concessão da EDP-SP, distribuidora que forneceu a maior parte das informações vistas nesta dissertação e que participou do projeto tema deste trabalho.

Quando se compara ano a ano a quantidade de queda de raios na área de concessão desta distribuidora, dados e informações obtidas junto à empresa Climatempo, de 2013 a 2019, os seis primeiros meses de 2019 se sobressaem em relação aos demais anos, tornando a preocupação com as interrupções do sistema elétrico e impactos das sobretensões de origem atmosférica relevante e atual:

- 2013: 35.246 quedas de raios;
- 2014: 23.956 quedas de raios;
- 2015: 36.791 quedas de raios;
- 2016: 79.143 quedas de raios;
- 2017: 72.639 quedas de raios;
- 2018: 57.454 quedas de raios;
- 2019 (até junho): 49.279 quedas de raios.

E o prejuízo financeiro da distribuidora EDP-SP frente a estas incidências de descargas atmosféricas? Com informações obtidas junto a ela e devidamente autorizadas para inclusão nesta dissertação, apura-se que as descargas atmosféricas ocasionam além de desligamentos da rede afetando assim a manutenção do fornecimento e cujas transgressões são convertidas em valores monetários e pagas a unidade consumidora afetada, impactam também na qualidade do produto, já que as sobretensões geradas causam a queima dos transformadores de distribuição e também equipamentos eletroeletrônicos e domésticos das residências atendidas pelos transformadores avariados.

Até junho de 2019, em função das transgressões de fornecimento ou queima de aparelhos das unidades consumidoras, a distribuidora EDP SP já havia pago em torno de R\$ 3,7 milhões. A Figura 1: Desembolso financeiro da distribuidora em função de transgressão de indicadores de

fornecimento demonstra este desembolso financeiro (por mês) realizado através de pagamentos para os seus clientes quando as unidades consumidoras ficam sem energia em um período superior aos limites definidos pelo órgão regulador ANEEL e em frequência (em vezes) que também extrapolam estes limites. Como estes valores são custos operacionais, afetam diretamente a receita da empresa e não são possíveis de serem repassadas às tarifas mediante reajustes tarifários (anual) ou decorrentes das revisões tarifárias (de 4 em 4 anos). Para a confecção deste gráfico, se considerou as interrupções decorrentes das causas que possuem relação com a incidência das descargas atmosféricas definidas pela EDP: ventos, as causas desconhecidas ou não classificadas ou as próprias descargas atmosféricas.

Figura 1: Desembolso financeiro da distribuidora em função de transgressão de indicadores de fornecimento.

Não é tema dessa dissertação se aprofundar no entendimento sobre a variância dos dados de quedas de raios outrora mencionados ou a diferença no volume de raios ano a ano medidas de várias formas pelos centros de pesquisa; porém, as descargas atmosféricas são uma realidade com grandes impactos nos resultados operacionais das concessionárias de energia. Cada distribuidora possui uma forma de atribuir uma causa a um desligamento, e na EDP-SP, quando se verifica os maiores ofensores de desligamentos da rede de distribuição, nota-se que os desligamentos que podem ser atribuídos às descargas atmosféricas figuram como as principais causas, ou seja: Descarga Atmosférica (11), Vento (20), Causas Não Classificadas (880) e Causas Não Determinadas (890). A Figura 2, dentro do universo de desligamentos da rede elétrica sob concessão da distribuidora EDP-SP demonstra o percentual de contribuição das 16 principais causas no indicador DEC da distribuição e a Figura 3 mostra o ranking das 16 principais causas

que afetam o indicador FEC. Tanto no primeiro como no segundo gráfico percebe-se a relevância das quatro causas já mencionadas neste parágrafo.

Figura 2: Duração Equivalente das Interrupções – DEC EDP–SP 2019 (fonte: EDP–SP).

Figura 3: Frequência Equivalente das Interrupções – FEC EDP–SP 2019 (fonte: EDP–SP).

Conforme se vê na Figura 4, quando se avalia o volume de queda de raios nos 28 municípios de atuação da distribuidora EDP–SP, houve elevação na incidência de quedas de raio em 2018 e na parcial de 2019 em praticamente todas as cidades.

Figura 4: Os 28 municípios da área de concessão da EDP–SP e a quantidade de raios que cada cidade recebeu desde 2013 a data atual (elaborado pelo autor).

Um estudo de caso foi feito na cidade de Guararema (SP), região localizada na divisa do Alto Tietê e Vale do Paraíba e um dos municípios da área de concessão da EDP SP.

Esta cidade possui 726 km de rede aérea, sendo 33% desta rede de média tensão constituída por condutores protegidos também conhecidos como rede Spacer.

Em dezembro de 2018 ocorreram 22 dias de registros de precipitação e 14 dias com registros de descargas atmosféricas. No dia 22 de dezembro, 7.176 unidades consumidoras ficaram desligadas e este fato ocorreu quando houve o maior registro de descargas atmosféricas. Na Figura 6, a seguir, são correlacionados dados de chuvas (precipitação), descargas atmosféricas, atendimentos das ocorrências e números de clientes interrompidos. No mês de janeiro de 2019, os indicadores de qualidade de fornecimento foram impactados essencialmente por causas relacionadas às descargas atmosféricas e por vegetação, sendo este último potencializado pelas condições climáticas, sobretudo na existência de tempestades (e raios).

A Figura 5 demonstra a quantidade de ocorrências de desligamento em janeiro de 2019.

Figura 5: Correlação entre ocorrências de desligamentos da rede elétrica versus incidência de descargas atmosféricas na cidade de Guararema (SP) em janeiro de 2019 (elaborado pelo autor).

Os histogramas em vermelho representam diariamente o número de ocorrências (basicamente, quantidade de unidades consumidoras que solicitaram os serviços da distribuidora, pois houve falta de energia) em janeiro de 2019. Nos dias 3, 4, 8, 16, 17, 18, 24, 25 e 26, ou seja, em 9 dias constatou-se que o aumento de acionamentos da distribuidora coincidiu com desligamentos de equipamentos da rede de distribuição por causas atmosféricas e climáticas, inclusive descargas atmosféricas com intensidades positivas, notoriamente mais potentes e danosas à rede de distribuição.

Figura 6: Precipitação em Guararema (SP) em dezembro de 2018 (elaborado pelo autor).

O impacto das descargas atmosféricas fica dessa maneira notório, portanto, dentro desse trabalho, além das pesquisas sobre o fenômeno das descargas atmosféricas em si, busca-se entender os seguintes aspectos importantes do vasto e complexo assunto referente a surtos de origem atmosférica:

- Frequências das ocorrências de sobretensão de origem atmosféricas nas redes de distribuição;
- Comportamento das ondas de tensão e corrente resultante das incidências das descargas sobre os condutores ou componentes da linha, assim como a indução de tensão pelo campo eletromagnético gerado pela corrente de descarga incidente em um ponto próximo à linha.
- Fatores que contribuem e explicam as correntes de descarga em para-raios, sendo esses equipamentos de muita relevância na proteção contra sobretensões atmosféricas da rede de distribuição.

Assim, um dos principais elementos de proteção contra as descargas atmosféricas é o para-raios. Entretanto, esse dispositivo é substituído com base na inspeção visual, a qual identifica se ocorreu a atuação do disparador automático ou a destruição do para-raios. Este procedimento caracteriza a manutenção corretiva. Não se efetua a substituição preventiva devido à ausência de estudos que definam a relação entre quantidade e intensidade de solicitações que um para-raios instalado na rede de distribuição pode sofrer, sendo então este o tema desta dissertação.

É necessária a substituição preventiva do para-raios à medida que as pastilhas de óxido metálico se deterioram. Caso não ocorra o restabelecimento da isolação, a corrente subsequente de 60 Hz estabelece um curto circuito fase-terra ocasionando a atuação do equipamento de proteção a fim de desligar o circuito.

Compreendendo se como ocorrem as descargas atmosféricas, assim como o que ocorre quando da sua queda direta ou indiretamente na rede elétrica, em especial nas linhas de distribuição de 15 kV (média tensão), e dos potenciais locais de incidência definidos após cálculos estimativos de probabilidade e impacto, permite-se então entender o que ocorre com o para-raios e de que forma as distribuidoras podem atuar preventivamente evitando-se desligamentos não programados da rede elétrica. Neste sentido, a EDP SP vem atuar neste tema através de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) realizado em conjunto com a Universidade de São Paulo – São Carlos. Tal parceria gerou além desta dissertação, 2 outras dissertações de mestrado já defendidas e que representam a totalidade dos trabalhos realizados nos anos de 2016 a 2018 no âmbito do projeto de P&D.

As leituras das duas dissertações citadas são de especial interesse para a compreensão do projeto. São elas:

- Batista, Gabriel Henrique de Aguiar; Modelagem de Para-Raios Baseada em Ensaios Elétricos. São Carlos, 2019;

- Expedito Viana, Fabricio; Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas. São Carlos, 2019.

A base desta dissertação é o detalhamento dos trabalhos realizados nas etapas 1, 2 e 3 do projeto, com o levantamento de dados que servirão de informação para as demais fases do projeto. Conforme a Figura 7, as etapas do projeto e os detalhes de cada etapa são:

Etapa 1 - Levantamento de dados das ocorrências do sistema elétrico de uma concessionária de distribuição; levantamento das informações do INPE relativas às descargas atmosféricas na área de atuação da referida concessionária; e correlação dos dados das ocorrências do sistema elétrico com os dados do INPE para definição da Área Piloto.

Etapa 2 - Projeto e instalação de novos para-raios e de contadores de descarga na área piloto para obtenção dos dados de intensidade e quantidade de ocorrência das descargas atmosféricas, bem como dados sobre a atuação dos para-raios em campo.

Etapa 3 - Registro dos dados dos contadores de descarga instalados; correlação dos dados obtidos com os dados do INPE e dados das interrupções da rede; medição da corrente de fuga dos para-raios; medição da resistência de aterramento; e substituição dos para-raios da área piloto para envio ao laboratório.

Etapa 4 - Realização de ensaios em para-raios novos e nos para-raios retirados da Área Piloto, e registros dos seus resultados para levantamento de dados para estimação da degradação dos mesmos.

Etapa 5 - Valendo-se das investigações e resultados resultantes das etapas anteriores serão desenvolvidos os modelos de estimação da degradação dos para-raios para sistemas de distribuição.

Etapa 6 - Desenvolvimento, implementação e validação computacional de sistema especialista de apoio à decisão para substituição preventiva de para-raios em sistemas de distribuição.

Figura 7: Diagrama de blocos do projeto de pesquisa e desenvolvimento EDP e USP São Carlos.

Estes são os resultados esperados neste trabalho e nos trabalhos que se seguirão complementarmente a esta dissertação.

1.2.) OBJETIVO

O objetivo dessa dissertação é investigar como uma determinada região delimitada por para-raios é afetada por sobretensões de origem atmosféricas, analisando-se os impactos das sobretensões em um setor composto por equipamentos inerentes ao setor elétrico de distribuição mediante as medidas de contadores de descargas atmosféricas estrategicamente instalados. Para tanto, serão analisadas as relações entre a quantidade e a intensidade das correntes de descargas atmosféricas a que são submetidos os para-raios da rede de distribuição.

1.3.) ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é composta de 6 capítulos, incluindo este capítulo introdutório que faz a abordagem geral deste trabalho.

Em sequência, no Capítulo 2 está registrada uma breve revisão bibliográfica a respeito de descargas atmosféricas, a fim de contextualização do ambiente de operação dos para-raios, assim como são pontuados os aspectos construtivos dos para-raios.

Nos Capítulos 3 e 4 têm-se os aspectos envolvendo as análises de ocorrências e descargas atmosféricas. Assim, podem-se acompanhar os critérios utilizados para escolha da área piloto para a instalação dos contadores de descargas atmosféricas. Descreve também a correlação entre a descarga atmosférica, a onda viajante e NBI das estruturas da rede de distribuição para a definição dos tipos de contadores e respectivas correntes de disparo. São ainda descritas as atividades em campo para a definição dos 8 transformadores em que serão instalados os contadores de descargas atmosféricas, bem como a apresentação da alternativa escolhida para o projeto de instalação dos para-raios e contadores de descargas atmosféricas nas estruturas das ET's.

Finalmente, no Capítulo 5, são então apresentadas as considerações finais sobre o trabalho realizado e no Capítulo 6 as referências bibliográficas.

1.4.) ATIVIDADES DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICAS

Em razão da relevância deste tema na atualidade, alguns trabalhos foram elaborados e publicados em meios de grande importância científica, a seguir mencionados:

- ✓ PERGENTINO, L. A.; SILVA, I. N.; FLAUZINO, R. A. Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a Partir de Medidas em Campo. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos* (Submetido), 2020.

- ✓ ARAÚJO, M. A.; SPATTI, D. H.; LIBONI, L. H. B.; PERGENTINO, L. A.; VIANA, F. E.; FLAUZINO, R. A. Decision-Making Support Method for the Preventive Substitution of Surge Arresters on Distribution Systems. *Journal of Control, Automation and Electric Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 391-401, 2019.

- ✓ PERGENTINO, L. A. Sistema Inteligente de Apoio à Decisão para Substituição Preventiva de Para-raios em Sistemas de Distribuição. *2º Congresso Técnico Sobre Manutenção nas Empresas de Energia Elétrica (CETECMAN)*, 2017.

Capítulo 2. Aspectos Fundamentais

Relacionados aos Pára-Raios

2.1.) INTRODUÇÃO

Este capítulo é dedicado ao estudo dos para-raios, objeto principal desta dissertação, sendo que estes se destacam dentre os equipamentos utilizados na proteção contra sobretensões nos sistemas elétricos de potência, mais especificamente os para-raios de óxido de zinco (ZnO). Eles são projetados para proteção contra sobretensões originadas por ocorrências no próprio sistema, pela incidência direta de descargas atmosféricas, ou por indução devido às descargas indiretas, e os quais visam mitigar as sobretensões a fim de aumentar a confiabilidade e a continuidade de operação dos sistemas elétricos.

Nesta conjuntura, a fim de prover condições para o conhecimento do comportamento e das características dos para-raios, o capítulo percorre pelas características elétricas do equipamento, descrevendo a curva linear que o caracteriza e apresentando uma revisão bibliográfica e históricas sobre os principais trabalhos e estudos correlatos aos para-raios, sobretudo os para-raios de ZnO. Também são expostos seus princípios de funcionamento, histórico de desenvolvimento deste equipamento de proteção, vantagens de utilização dos para-raios de ZnO em relação aos de carboneto de silício (SiC), e conceitos mais aprofundados sobre o para-raios de ZnO, com relação a suas características construtivas, fatores de degradação e especificações.

2.2.) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICA

O desenvolvimento dos para-raios iniciou-se em 1892, a partir do surgimento do centelhador, primeiro equipamento com a função de limitar sobretensões, e em seguida em 1920 pelos para-raios propriamente ditos, do tipo expulsão. Desde 1930 há registros na literatura técnica de projetos de proteção de linhas frente às descargas atmosféricas pela aplicação destes dispositivos. Entretanto, é somente em 1940 que Peterson *et al.* publicam um dos principais estudos neste segmento, no qual expõem os resultados de oito anos de pesquisas e aplicações de para-raios em linhas de 13,8 a 230 kV. Por meio da experiência adquirida, o documento por eles publicado busca resumir a concepção da teoria de operação, demonstra os fatores que devem ser considerados nas características do dispositivo e do sistema em que serão utilizados, e em seguida sugere uma padronização para facilitar sua aplicação.

Posteriormente, em Matsuoka (1971) é apresentado um estudo pioneiro na aplicação do óxido de zinco para construção de para-raios. No mesmo, é avaliada a microestrutura cerâmica deste material em relação às suas propriedades ôhmicas, resistividade elétrica, geração de campo elétrico e dependência com a temperatura, constatando-se ser este um excelente material para este tipo de aplicação.

Em Matsuoka (1981) são publicados os resultados e conclusões de pesquisas sobre o progresso de desenvolvimento dos varistores de ZnO. As mesmas analisam a aplicação de vários aditivos para incrementar o desempenho destes dispositivos a fim de elevar sua eficiência, absorção de energia e dissipação de calor, agrupados, segundo suas funções, em três classes: formação da estrutura básica, propriedades não ôhmicas e estabilidade. Além disso, por meio destas pesquisas foi proposta a clássica formulação de Matsuoka para composição dos varistores de ZnO, ainda hoje muito utilizada na maioria dos varistores comerciais nas mais diferentes faixas de aplicação, com pequenas modificações em determinadas situações.

Já em Lat & Kortschinski (1989) é apresentada uma visão geral de um guia de aplicação de para-raios em redes de distribuição de 2,4 a 50 kV elaborado pela *Ontario Hydro* e patrocinado pela *Canadian Electricity Association* (CEA), com especial destaque para os para-raios de óxido de zinco. Além disso, baseando-se no guia mencionado, também são expostos os resultados de uma pesquisa entre as causas e efeitos de descargas atmosféricas para a terra nas proximidades de um sistema de distribuição a fim de avaliar o formato da linha, os locais de instalação dos para-raios, e a coordenação de isolamento da mesma.

Em IEEE (1992), o Grupo de Trabalho 3.4.11 do IEEE, a partir da análise de informações sobre as características de para-raios de óxido de zinco, mostrou que havia uma dependência significativa de suas características com a frequência em estudos de sobretensões de origem atmosférica. Ademais, foi proposto um modelo para representar as características dinâmicas dos mesmos, envolvendo a ocorrência de descargas atmosféricas e outros picos de frente de onda rápidos, incluindo um método para gerar os parâmetros do modelo a partir de dados obtidos em manuais de fabricantes de para-raios.

Em IEEE (1997) é publicado o Guia IEEE Std 1410 com informações sobre métodos para melhorar o desempenho de linhas de distribuição de até 69 kV frente à incidência de descargas atmosféricas. Este guia expõe técnicas de construção de linhas e de melhoria de desempenho considerando o material da estrutura, a geometria da linha, o tipo de blindagem, o nível de isolamento, os métodos de aterramento e a utilização de para-raios, a fim de minimizar os problemas causados pela incidência direta e indireta de descargas atmosféricas.

A seguir, em Durbak (2001) são discutidas as etapas a serem realizadas para se obter os parâmetros necessários para representar para-raios de óxido metálico na plataforma de simulações de transitórios EMTP. Este trabalho inclui um resumo da representação matemática, dos procedimentos de conversão utilizados para obtenção de parâmetros, e de diretrizes para escolha dos parâmetros mais adequados.

Posteriormente, em IEEE (2004) é publicada uma revisão do Guia IEEE Std 1410 (IEEE, 1997) com a adição de novas técnicas de melhoria de desempenho a partir de modernas pesquisas e informações divulgadas sobre o tema.

Ao mesmo tempo, em Thanasaksiri (2004) é exibido um estudo sobre melhoria de desempenho de linhas aéreas de distribuição de 22 kV, frente às descargas atmosféricas, empregando o modelo computacional desenvolvido pelo EPRI. Para tanto, são analisados o desempenho da proteção de determinada linha inicialmente com inclusão de cabos de blindagem e posteriormente com para-raios, além de ser avaliada a influência do tamanho dos cabos de blindagem e da impedância de aterramento.

Em Bueno *et al.* (2005) são expostos os resultados da composição de um método simplificado de engenharia para análise e melhoria de desempenho de linhas aéreas de distribuição frente às descargas atmosféricas. Para tanto, são empregadas simulações de sobretensões induzidas no programa ATP e realizado um estudo estatístico de simulação de descargas atmosféricas com o programa LIOV. Seus resultados mostram onde devem ser instalados os para-raios de surto na linha, os quais não devem ultrapassar uma distância máxima de 200 m um do outro para garantir a proteção efetiva esperada.

Concomitantemente, em Meister (2005) é apresentada uma avaliação técnica comparativa da modelagem de varistores de óxido de zinco e a definição de qual modelo de para-raios é o mais apropriado para tipos específicos de estudos. Ressalta-se que sua principal contribuição é a validação e análise destes modelos no software ATP, e a aplicação dos mesmos em um estudo de coordenação de isolamento de uma subestação de 500 kV. Os modelos descritos e validados são os seguintes: modelo convencional ou modelo do resistor não linear; modelo proposto por Tominaga *et al.* (1979); modelo proposto por Kim *et al.* (KIM *et al.*, 1996); modelo do IEEE (1992); modelo proposto por Pinceti E Giannettoni (1999); e modelo proposto por Fernandez & Diaz (2001).

Em Saran (2009) é abordado o estudo de uma ampla gama de efeitos e impactos das descargas atmosféricas sobre linhas de distribuição reais, a fim de estabelecer os principais pontos de intervenção para a melhoria de desempenho das mesmas por meio da análise das respostas de equipamentos instalados na rede, como transformadores, isoladores e para-raios. Para tanto, é

utilizado o software ATP para simulação e modelagem de surtos devido às descargas diretas e de tensões induzidas por descargas indiretas, além de realizar a modelagem da linha e de seus componentes como um todo. Também é criado um programa computacional para o tratamento, exibição e utilização das informações de bancos de dados geoposicionais do sistema sob estudo, e são feitas simulações e análises estocástica, probabilística e estatística da ocorrência e geração de surtos por descargas atmosféricas.

Simultaneamente, em IEEE (2009) é publicado um dos guias mais completos da área de proteção de sistemas elétricos de corrente alternada por aplicação de para-raios, o qual aborda o emprego de para-raios de óxido metálico para proteger equipamentos com tensão nominal de operação acima de 1 kV contra sobretensões. Este guia fornece informações sobre as características de para-raios de óxido de zinco para proteção de equipamentos de subestações, sistemas de distribuição, linhas aéreas, e grandes máquinas elétricas, e é uma atualização dos guias publicados em IEEE (1991; 1997).

Em Alves (2010) é desenvolvida uma ferramenta de cálculo de tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas, baseada no Modelo de Rusck, para análise de sistemas polifásicos com grande quantidade de estruturas e de para-raios de ZnO, a qual foi implementada no software de transitórios eletromagnéticos EMTP. Adicionalmente, para a validação de seus resultados foram realizados testes de cálculo da tensão induzida em uma linha de distribuição trifásica variando-se o ponto de incidência da descarga indireta, a quantidade e o posicionamento dos dissipadores de surto.

Em Munukutla *et al.* (2010) é apresentado um projeto de proteção contra descargas atmosféricas para uma linha de transmissão de 115 kV com a utilização de para-raios baseando-se em dados obtidos em estudos de campo e empregando o software ATP. São propostos vários procedimentos a fim de maximizar a confiabilidade do serviço nesta linha utilizando um número mínimo de para-raios, alocando um número diferente dos mesmos por torre, variando a distância entre torres com para-raios, e analisando a dependência dessas configurações em relação à resistência de pé de torre.

Em EPRI (2011) é publicado um guia com procedimentos para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e sobre técnicas de aterramento, baseando-se em relatórios publicados anteriormente. O seu conteúdo inclui a teoria de formação e a definição dos parâmetros das descargas atmosféricas, os impactos das descargas sobre linhas de transmissão, e os fundamentos, aspectos práticos e de projeto de aterramento de linhas. Também constam nas mesmas diretrizes para melhorar o desempenho de linhas, teoria e práticas de instalação de para-raios contra descargas, e diretrizes de aplicação do software TFlash.

Em Rakholiya e Reddy (2016) são feitas simulações no software ATP / EMTP utilizando para-raios tipo Óxido de Zinco dos fabricantes Pinceti e Fernandez & Diaz para as características dependentes da frequência. Os parâmetros dos modelos foram calculados usando o método de tentativa e erro dos softwares. Os resultados sugerem que o modelo Pinceti fornece melhores respostas de tensão residual em comparação com outros modelos. Além disso, o modelo Fernandez & Diaz é o melhor para-raios, principalmente no que diz respeito ao tempo de resfriamento.

Em Veleba (2017) são descritas as possibilidades de modelagem matemática de para-raios no software de simulação DYNAST. Esta ferramenta não pertence aos softwares de modelagem padrão no campo da engenharia elétrica. No entanto, podem-se oferecer algumas vantagens importantes quando comparado a softwares usados com mais frequência, como EMTP-ATP e MATLAB-Simulink. É apresentada uma descrição da modelagem de varistor de óxido de metal em sobretensões temporárias e de comutação, estados de frente rápida e descargas atmosféricas. São ainda fornecidas mais informações sobre a estrutura interna definida dos modelos de para-raios e maneiras de implementar as respectivas características V-I. Para verificar o comportamento correto dos modelos, os cenários de sobretensão lenta e rápida são simulados e avaliados.

Em Pengfei Meng e Shuai Wan (2019) estudou-se os vários varistores de ZnO baseados em dopantes e otimização de sua microestrutura e propriedades elétricas adaptando as características de sinterização. As propriedades foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), características de tensão de corrente, características de tensão de capacitância, características dielétricas e características de difração de raios-X.

Em Christos (2019) estudou-se a colocação ideal de pára-raios para a proteção eficiente de redes de média tensão contra sobretensões atmosféricas.

Posto isto, finalizada esta revisão bibliográfica e histórica sobre os trabalhos publicados de maior relevância a respeito de para-raios, principalmente os de ZnO. Em seguida, serão expostos os conceitos e princípios sobre o funcionamento destes equipamentos.

2.3.) PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS PARA-RAIOS

Os para-raios são, basicamente, resistores não lineares que fornecem um caminho de baixa impedância para a corrente de surto e que limitam os níveis de sobretensões a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos que protegem. Sem eles, as sobretensões que porventura atinjam os equipamentos elétricos poderiam provocar a disrupção do dielétrico e a consequente perda do patrimônio, além de danos pessoais, ao meio ambiente e às instalações. Essa proteção se deve ao caminho condutivo de baixa impedância de surto entre fase e terra promovido pelo para-raios. A descarga de corrente à terra através dessa impedância de surto limita a tensão em relação

à terra. Em condições normais de operação, essa impedância é suficientemente elevada para atuar como um circuito aberto, e assim permanece até o para-raios ser atingido por uma tensão de surto.

Além disso, em todos estes tipos de aplicação, em uma situação ideal, espera-se que os mesmos atuem da seguinte forma (CEPEL, 1977; D'AJUZ *et al.*, 1985; MAMEDE, 2005):

- Apresentando impedância infinita entre os seus terminais nas condições de regime permanente do sistema;
- Comportando-se como um circuito aberto até a ocorrência de uma sobretensão;
- Possuindo a capacidade instantânea de entrar em condução quando da ocorrência de uma sobretensão com valor de pico próximo ao da tensão nominal do sistema;
- Mantendo sua tensão de início de condução durante toda a ocorrência da sobretensão;
- Parando de conduzir e retomando a condição de circuito aberto assim que a tensão do sistema voltar ao seu estado inicial.

Entretanto, os para-raios disponíveis não têm a capacidade de operar dessa forma ideal, mas as novas tecnologias construtivas empregadas em sua fabricação vêm aperfeiçoando seu funcionamento desde o surgimento dos mesmos aproximando-os do ideal, como será visto a seguir.

2.4.) HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO

Existem dois tipos de para-raios quanto ao material semicondutor utilizado: o para-raios de carboneto de silício (SiC) e o para-raios de óxido de zinco (ZnO). O primeiro dispositivo desenvolvido para proteção contra sobretensões foi o centelhador, ilustrado na Figura 8(a), instalado entre fase e terra nas terminações de linhas e equipamentos. O mesmo utilizava como meio dielétrico o próprio ar e possuía seu funcionamento baseado no rompimento do dielétrico entre seus dois polos, a fim de limitar o valor da sobretensão a qual era exposto. Entretanto, o mesmo tinha o inconveniente de ocasionar curtos-circuitos frequentemente durante sua operação, requerendo a atuação conjunta de um mecanismo de proteção contra esse tipo de falta. Também sofria forte influência das condições atmosféricas em suas características disruptivas, e a incapacidade de interromper as correntes subsequentes (D'AJUZ *et al.*, 1985; CEPEL, 1977).

Ainda neste contexto, surgiram os centelhadores do tipo chifre que devido a sua forma geométrica obtiveram uma redução da ocorrência de curto-circuito acidental em relação ao centelhador simples. Também apareceram os para-raios tipo expulsão, constituídos basicamente por dois centelhadores dispostos em um tubo isolante e conectados em série, cujo princípio de funcionamento é o mesmo atualmente adotado para os elos fusíveis de expulsão (D'AJUZ *et al.*, 1985; MAMEDE, 2005).

Posteriormente, com o intuito de evitar o estabelecimento de curtos-circuitos no sistema, como ocorria com a aplicação dos centelhadores, foram desenvolvidos os para-raios constituídos por um resistor não linear em série com um centelhador, como mostrado na Figura 8 (b). Esta configuração possuía a finalidade de limitar a corrente de descarga, e seu resistor possuía uma resistência muito elevada, o que implicava na formação de uma tensão residual nos terminais destes para-raios (D'AJUZ *et al.*, 1985; CEPEL, 1977; MAMEDE, 2005).

Em seguida, foram desenvolvidos os para-raios compostos por centelhador e resistores não lineares a base de carboneto de silício (SiC), como apontado na Figura 8(c), com limitadores de corrente em virtude da necessidade provocada pelo aumento nos níveis de tensão dos sistemas elétricos, fazendo com que os para-raios tivessem que ser dotados de um centelhador ativo. O funcionamento destes instrumentos baseava-se no alongamento do arco elétrico através do centelhador com o auxílio de um campo magnético, e no descarregamento para a terra através do resistor não linear ao atingir o nível de tensão de proteção (D'AJUZ *et al.*, 1985; CEPEL, 1977).

Apesar das melhorias sucessivas a utilização de centelhadores com limitadores de corrente demonstrou-se inapropriada ao proporcionar o surgimento de transitórios indesejáveis na tensão. Dessa maneira, diversas pesquisas sobre diferentes materiais para a composição dos para-raios foram realizadas até que surgiram os resistores não lineares de óxido de zinco, cuja corrente de fuga é bem menor que a dos elementos compostos por SiC. Os para-raios empregados atualmente compõem-se apenas por resistores não lineares de ZnO, como exposto na Figura 8(d), e dispensam a utilização de centelhadores porque seu comportamento $V \times I$ resulta em correntes mínimas, da ordem de dezenas de miliampéres, para sua tensão de operação.

Figura 8: Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D'AJUZ *et al.*, 1985).

Como se observa na Figura 9, para níveis de tensão até o valor da tensão de operação (U_{op}) os para-raios de SiC frente a pequenas variações de tensão apresentam grandes variações na corrente de fuga drenada, da ordem de centenas de ampères, como indicado pelo ponto A. Enquanto que para estas mesmas variações de tensão a corrente de fuga nos para-raios de ZnO possuem valores extremamente baixos, da ordem de miliampéres, como indicado pelo ponto B.

Assim, devido à elevada não linearidade característica do ZnO a corrente de fuga em para-raios com este material é menor que em compostos por SiC, sendo esta característica de corrente o fator determinante para que os mesmos sejam conectados diretamente ao sistema elétrico de potência sem a presença de centelhadores.

Ainda na Figura 9 é possível identificar o ponto C, em que os para-raios entram em condução ao atingir a tensão de descarga (U_d), a partir da qual flui no para-raios uma corrente de descarga de alta intensidade. Observa-se também o ponto D, em que idealmente os para-raios deveriam limitar a tensão a um valor máximo (U_m) pré-estabelecido drenando o excesso de corrente do sistema. Por fim, visualiza-se a curva representativa de um para-raios com comportamento ideal expressando a necessidade de um varistor com elevado grau de não linearidade, pois quanto maior o grau de não linearidade melhor o desempenho de atuação do para-raios (ZANETTA Jr., 2003; MAMEDE, 2005).

Figura 9: Curvas de tensão e corrente de para-raios de ZnO, de SiC e ideal [adaptada de (MAMEDE, 2005)].

Contudo, quando se utilizam para-raios de ZnO sem centelhadores os mesmos podem ser solicitados por sobretensões temporárias ou transitórias impondo-lhes uma grande quantidade de energia que necessita ser dissipada a fim de garantir sua estabilidade térmica. Assim, os para-raios a ZnO sem centelhadores podem sofrer um fenômeno de avalanche térmica conhecido por *Thermal Runaway*. O mesmo consiste no aumento descontrolado da temperatura, a qual pode subir rapidamente e danificar o para-raios por meio da formação de pontos de superaquecimento, fusão e tensões devido aos elevados gradientes da mesma (SANTOS, 2007).

Segundo D'AJUZ *et al.* (1985) analisando a equação (2.1), que representa a característica não linear dos resistores a ZnO e SiC, verifica-se que o SiC tem expoente n de ordem 4 enquanto que o ZnO apresenta um expoente n de ordem 25, demonstrando à alta não linearidade do ZnO.

$$I = k.V^n \quad (2.1)$$

Além disso, tomando como referência (MODRUSAN, 1983), (D'AJUZ *et al.*, 1985), (SAKSHAUG, 1991), (FRANCO, 1993, 2001), (RINGLER *et al.*, 1997), (DE NIGRIS *et al.*, 1998) e (MELCHIOR, 2003), podem-se destacar algumas das vantagens em se utilizar os para-raios com resistores de ZnO quando comparados aos constituídos por resistores de SiC, as quais são as seguintes:

- Característica não linear do ZnO superior à do SiC na região de intensidade de baixas correntes;
- Construção mais simples, menor tempo de fabricação, e significativa redução de tamanho devido à ausência de centelhadores;
- Tempo de resposta reduzido frente a fenômenos transitórios e a impulsos de corrente;
- Desempenho superior na região de operação;
- Boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão nominal de operação;
- Baixa tensão residual;
- Maior grau de confiabilidade;
- Estabilidade térmica;
- Elevada capacidade de absorção de energia para sobretensões temporárias e transitórias.

Ressalta-se que algumas destas vantagens podem ser identificadas por meio da Figura 9, como já foi exposto anteriormente, e mediante a Figura 10, que expõem as características não lineares entre tensão e corrente para o ZnO e o SiC em diferentes temperaturas. Na Figura 10 observa-se que os elementos de ZnO apresentam pequena dependência da temperatura apenas na zona de baixos valores de corrente, enquanto os de SiC exibem comportamento semelhante em uma zona de correntes mais elevadas (estabilidade térmica).

Portanto, a partir do exposto conclui-se que as características de para-raios de ZnO possuem várias vantagens em relação aos de SiC que determinam seu melhor desempenho, o que justifica a substituição dos de SiC pelos de ZnO atualmente. Desse modo, por serem os únicos fabricados nos dias atuais e por se adequarem a esta pesquisa os para-raios de óxido de zinco serão abordados com mais detalhes a seguir.

Figura 10: Característica de tensão e corrente para o carboneto de silício e o óxido de zinco (D’AJUZ *et al.*, 1985).

2.5.) PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

Devido à superioridade de performance dos para-raios de ZnO e por estes serem os encontrados comercialmente hoje em dia, a seguir serão fornecidas as características construtivas dos mesmos, as particularidades de seus resistores e dos seus tipos de invólucros, alguns de seus fatores de degradação, e a descrição de algumas de suas especificações.

2.5.1.) Características Construtivas dos Para-Raios de ZnO

Os para-raios de ZnO são constituídos basicamente por blocos resistores de óxido de zinco dispostos em série, os quais determinam as características não lineares que definem a limitação das sobretensões, e são formados por um invólucro polimérico ou de porcelana, responsável pela proteção mecânica, isolamento e estanqueidade dos componentes internos.

Dentre os elementos auxiliares que fazem parte da composição dos para-raios destacam-se os enumerados a seguir, que têm sua geometria e aplicabilidade determinadas de acordo com a necessidade do projeto do para-raios (ABB, 2012).

- Espaçadores de alumínio;
- Terminais de ligação;
- Molas de compressão;
- Mecanismos de alívio de sobrepressão;
- Elementos de vedação;
- Duto de ventilação;
- Terminal de linha;

- Flange;
- Suporte de fixação.

Não obstante, a seguir serão descritos os dois componentes fundamentais aos para-raios citados acima, ou seja, os resistores de ZnO e os tipos de invólucro.

a) Características dos Resistores de ZnO

Os resistores, ou varistores, de ZnO são dispositivos cerâmicos semicondutores com propriedades resistivas altamente não lineares, dependentes da tensão elétrica que existe entre seus terminais. Geralmente possuem formato cilíndrico e alta densidade de óxido metálico, da ordem de $5,4 \text{ g/cm}^3$ a $5,6 \text{ g/cm}^3$, sendo obtidos por meio de moldagem a altas pressões e sinterização a altas temperaturas sob atmosfera oxidante.

A primeira formulação proposta para composição dos varistores de ZnO foi desenvolvida por Matsuoka (1981) após aproximadamente uma década de estudos do mesmo sobre os óxidos que poderiam melhorar o desempenho destes varistores. Esta formulação clássica serviu como ponto de partida para diversas pesquisas neste segmento que culminaram com os varistores modernos de grande capacidade não linear e tempo de vida útil, a qual é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química clássica dos varistores de ZnO (OLIVEIRA, 2004).

Componente	% Molar
ZnO	96,5
Bi ₂ O ₃	0,5
Sb ₂ O ₃	1,0
CoO	1,0
MnO	0,5
Cr ₂ O ₃	0,5

Atualmente, os varistores de ZnO são produzidos por diferentes processos industriais que determinam, em conjunto com o tipo de aplicação requerida, suas características para garantir respostas compatíveis frente aos impulsos de corrente, sua capacidade de absorção de energia e tensão nominal demandada, tais como (FRANCO, 1993):

- Pureza e qualidade dos materiais usados;
- Variedade de óxidos empregados;
- Concentração dos dopantes;
- Homogeneidade da mistura;
- Área do eletrodo;
- Forma de prensagem dos pós de óxido metálico;

- Dimensão, geometria e massa do varistor.

Nesta conjuntura, na Tabela 2 são apresentadas as particularidades dos principais componentes empregados na fabricação dos varistores de ZnO produzidos hoje em dia.

Tabela 2: Características dos óxidos mais utilizados na fabricação de varistores de ZnO (FRANCO, 1993).

Óxido	Fórmula	Peso Molecular	Densidade (g/cm ³)	Ponto de Fusão (°C)	Pureza (%)	Tamanho Médio das Partículas (µm)
Zinco	ZnO	81,37	5,61	1975	99,9	0,1 – 0,5
Bismuto	Bi ₂ O ₃	465,96	8,9	825	99,9	5 – 10
Cobalto	Co ₂ O ₃	165,86	5,18	895	99,9	1 – 5
Manganês	MnO ₂	86,94	5,03	535	99,9	5 – 10
Antimônio	Sb ₂ O ₃	291,5	5,2	656	99,9	1 – 5
Níquel	NiO	74,71	6,67	1984	99,9	1 – 5
Cromo	Cr ₂ O ₃	151,99	5,21	2266	99,9	1 – 5

Por outro lado, em virtude do seu arranjo, as junções óxido de zinco - camada intergranular apresentam cargas fixas que formam regiões de depleção, o que faz com que ocorra a formação de barreiras simétricas ao redor dos grãos de ZnO e na camada intergranular que os envolvem, conhecidas como Barreiras de Schottky. Estas barreiras simétricas causam o desempenho não linear destas junções e, conseqüentemente, dos resistores, o que torna possível afirmar que cada conjunto camada intergranular - grão de óxido de zinco - camada intergranular opera como um circuito ceifador, com tensão de corte em torno de 2,5 V a 3 V de crista (SANTOS, 2007).

A não linearidade, propriedade mais importante dos varistores de ZnO, é caracterizada pela curva de tensão (*V*) *versus* corrente (*I*), como ilustrado na Figura 11, em que são destacadas suas três regiões de operação que podem ser explicadas por meio da atuação das Barreiras de Schottky, definidas como:

- Região I: região linear de baixas densidades de corrente, ou região de pré-ruptura;
- Região II: região de operação altamente não linear, ou região de ruptura;
- Região III: região linear para altas densidades de corrente, ou região de retorno.

Figura 11: Curva característica de V versus I para um resistor não linear de ZnO [adaptada de (OLIVEIRA, 2004)].

A Região I é definida como a região de baixa densidade de corrente correspondendo à atuação do varistor na ausência de sobretensões, na qual o mesmo pode encontrar-se submetido a uma tensão máxima menor ou igual a sua máxima tensão de operação. Estas tensões resultam em um campo elétrico de baixa densidade, insuficiente para promover uma diminuição expressiva na altura das suas barreiras de potencial. Como consequência, o resistor a ZnO apresenta comportamento característico de um resistor linear de alto valor fazendo com que por ele passe apenas uma corrente de fuga dependente da temperatura (FRANCO, 1993; SANTOS, 2007).

Já a Região II é definida como a região de média densidade de corrente, relativa à essência da ação de um resistor não linear de ZnO, uma vez que na mesma o varistor conduz de modo crescente uma ampla quantidade de corrente elétrica para um pequeno incremento de tensão. Este aumento de tensão acarreta um acréscimo do campo elétrico, e, por conseguinte, causa uma redução da altura das barreiras de potencial, obrigando o resistor de ZnO a apresentar desempenho altamente não linear. Além disso, é por meio desta região que se define o nível de proteção dos para-raios quando submetidos às correntes de impulso atmosférico ou de manobra, e na mesma a característica $V \times I$ é quase independente da temperatura. Contudo, para se obter o correto funcionamento dos varistores de ZnO nesta região é fundamental que seus caminhos de corrente apresentem um mesmo número de barreiras. Isto ocorre, pois, qualquer heterogeneidade do material provoca uma distribuição não uniforme de corrente e o consequente aquecimento localizado do varistor, o qual pode levar a sua perfuração ou trinca quando submetidos aos surtos de tensão e corrente (FRANCO, 1993; SANTOS, 2007).

E na Região III a característica $V \times I$ é novamente linear, análoga aquela da Região I, mas com a tensão aumentando mais rapidamente com a corrente devido à resistência própria finita dos grãos de ZnO da estrutura do varistor. Tal fato também se deve à redução das barreiras de potencial

até certo limite, a partir do qual o resistor a ZnO volta a proporcionar um comportamento igual ao de um resistor linear de baixo valor (FRANCO, 1993; SANTOS, 2007).

O coeficiente de não linearidade (α), principais parâmetros dos varistores de óxido de zinco, define-se como o recíproco da inclinação da curva $I \times V$ ou da curva $J \times E$ (densidade de corrente elétrica *versus* intensidade do campo elétrico aplicado), na região não linear, e pode ser calculado pela equação (2.2).

$$\alpha = \frac{d[\log(I)]}{d[\log(V)]} \quad (2.2)$$

Por fim, ressalta-se que quanto maior o valor de α maior a não linearidade do varistor e melhor seu desempenho, e que para os varistores à base de ZnO este parâmetro pode variar na faixa de 25 a 100, mas na maioria das aplicações comerciais α varia entre 25 e 60. Ademais, o valor de α é inversamente proporcional às condições de temperatura e pressão sob as quais o varistor está submetido, já que diminui com o incremento de ambas, e também decresce com o aumento da densidade de corrente, como mostrado pela Figura 12. Fato este, que pode ser amenizado por meio da diminuição da resistividade elétrica dos grãos de ZnO mediante uma dopagem moderada por Al (Alumínio), Ga (Gálio) ou In (Índio), pois o excesso destes elementos pode levar a uma elevada redução do valor de α (FURTADO, 2005).

Figura 12: Dependência do coeficiente não linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica [adaptada de (FURTADO, 2005)].

b) Tipos de Invólucros dos Para-Raios de ZnO

Os para-raios de ZnO com invólucros de porcelana datam da década de 1970 e são montados com os resistores de forma concêntrica dentro do invólucro com geometria para minimizar os efeitos da distribuição não uniforme de campo elétrico e de ionização interna, mesmo sob condições severas de poluição externa. Também possuem mecanismos de alívio de

sobrepressão dentro dos flanges terminais para evitar que o para-raios sofra algum tipo de explosão devido a solicitações superiores às especificadas, evitando a danificação de outros equipamentos e o risco de acidentes para pessoas localizadas em suas adjacências.

A Figura 13 mostra em detalhe um para-raios de distribuição com invólucro de porcelana com seus respectivos componentes indicados a saber (HINRICHSEN, 2001).

Figura 13: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro de porcelana [adaptada de (HINRICHSEN, 2001)].

Posteriormente, em meados da década de 80 surgiram os para-raios com invólucro polimérico que proporcionaram melhorias quanto às características mecânicas, físicas e de desempenho, os quais são subdivididos em duas categorias, com e sem espaçamento interno de ar.

Os para-raios com espaços internos de ar são montados de maneira semelhante aos com invólucro de porcelana, sendo o polímero do invólucro injetado sobre um tubo de fibra de vidro de alta resistência mecânica. Os blocos de ZnO são inseridos dentro do invólucro, formando-se o espaçamento interno de ar entre a parte interior do polímero e os blocos de ZnO, o que acarreta a necessidade de utilização de dispositivos de alívio de sobrepressão.

Nos para-raios sem espaços internos de ar os blocos de ZnO são envoltos em um tubo de fibra de vidro impregnado em resina epóxi, e o invólucro polimérico é aplicado sobre o tubo pelo processo de injeção de borracha ou de moldagem. Como este tipo é mais comum do que o com espaços de ar, na Figura 14, é exposto um para-raios de distribuição com invólucro polimérico sem espaços internos de ar com seus respectivos elementos apontados a seguir (HINRICHSEN, 2001):

Figura 14: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro polimérico [adaptada de (HINRICHSSEN, 2001)].

Além disso, devido às diferentes necessidades e formas de montagem os para-raios poliméricos podem ser compostos por apenas uma ou várias seções, e por uma ou mais colunas dispostas em paralelo. Ressalta-se que os para-raios multi-colunas são empregados em situações nas quais é preciso maior capacidade de absorção de energia, seus blocos de resistores de ZnO podem estar dentro de um mesmo invólucro ou em invólucros separados. Ainda, em virtude do arranjo série e paralelo dos seus blocos de resistores deve-se atentar para que a repartição de corrente seja a mais uniforme possível garantindo seu correto funcionamento.

Cabe observar que os para-raios com invólucro polimérico possuem algumas vantagens técnicas e econômicas em relação aos de porcelana, o que tem tornado sua utilização cada vez maior, as quais seguem a seguir (COLOMBO *et al.*, 1996; DE NIGRIS *et al.*, 1998; LAHTI *et al.*, 2001):

- Desempenho superior sob contaminação;
- Maior nível de segurança em caso de falha;
- Facilidade de transporte, armazenamento, manuseio e instalação;
- Melhor performance mecânica;
- Menor peso e tamanho do invólucro;
- Menor corrente de fuga, e consequente redução das perdas de energia;
- Maior capacidade de absorção de energia devido a uma melhor capacidade de dissipação de calor.

Vale-se destacar o impacto das correntes de fugas em para-raios instalados na rede de distribuição e em regime permanente de operação. Esta condução de corrente (indevida) gera

desligamentos não programados e atuação dos equipamentos de proteção a montante a sua instalação, danos a outros dispositivos instalados e, principalmente, podem implicar em risco de morte aos profissionais que trabalham em campo.

2.5.2.) Fatores de Degradação dos Para-Raios de ZnO

A degradação do funcionamento dos varistores de para-raios de ZnO está associada a diversos fatores técnicos e ambientais que podem ser de origem elétrica, térmica, mecânica ou química. Em geral conduzem a um aumento da dissipação de energia provocando elevação excessiva da temperatura, que ao ultrapassar os limites especificados para atuação dos mesmos podem resultar em sérios problemas comprometendo o seu desempenho e reduzindo sua vida útil.

Dentre estes fatores, a perda de estanqueidade por trincas no invólucro ou deterioração da vedação dos dispositivos de alívio de sobre pressão, ao unir-se com o efeito do depósito de resíduos e da penetração de umidade, causa alterações expressivas dos níveis e da distribuição de tensão, e a elevação do valor da corrente de fuga comprometendo o isolamento externo. Como consequência ocorre à redução da capacidade de absorção de energia dos mesmos em casos de distúrbios no sistema elétrico, e o aquecimento excessivo e envelhecimento dos seus blocos de ZnO (FRANCO, 1993).

Já a contaminação do invólucro por chuva, fumaça ou deposição de resíduos de poluição é mais crítica em para-raios de porcelana do que nos poliméricos. Esta é capaz de gerar descargas internas que dão origem a gases que podem alterar as propriedades químicas e dielétricas do material isolante que recobre os varistores. Tal fato acaba acelerando seu envelhecimento e desviando correntes para sua superfície, o que também compromete a adequada atuação dos mesmos (SCHEI; FRANCO, 1999).

Outro fator importante que influi na degradação dos varistores de ZnO são solicitações transitórias de longa duração e de alta intensidade e curta duração. As primeiras quando não consideradas durante o projeto e seleção do para-raios ao ocorrer podem acarretar a queima ou rachadura dos blocos cerâmicos, e as do segundo tipo podem originar a perfuração dos blocos devido à concentração da corrente em um único ponto. A degradação proveniente de solicitações transitórias gera redução gradual da máxima temperatura para a qual o varistor tem a capacidade de dissipar a energia proveniente destes surtos, ou seja, diminui a capacidade de absorção de energia dos varistores (FRANCO, 1993).

Atualmente há três gerações de resistores a óxido de zinco cujo desempenho frente a uma determinada tensão em frequência industrial sugere que os resistores mais modernos possuem uma tendência a se auto estabilizarem quando submetidos a estas solicitações. A vida operacional dos

mesmos pode ser decomposta em três regiões, as quais são demonstradas na Figura 15 e definidas da seguinte maneira (SANTOS, 2007):

- Região I: região estável na qual ocorre o envelhecimento do resistor;
- Região II: região em que acontece um pequeno acréscimo na taxa de crescimento da corrente de fuga tornando difícil a manutenção do equilíbrio térmico, evidenciando o início do processo de instabilidade;
- Região III: região na qual se processa um grande aumento na taxa de crescimento da corrente de fuga e perda do equilíbrio térmico, ratificando o processo de instabilidade, e onde se averigua o acontecimento do fenômeno *Thermal Runaway*, citado na Seção 2.4.

Figura 15: Característica potência consumida versus tempo para resistores de ZnO de primeira, segunda e terceira geração (SANTOS, 2007).

O envelhecimento dos resistores a ZnO também se origina das descargas de surtos de corrente de origem atmosférica e de manobra, sendo que o mesmo é fundamentalmente condicionado à forma do impulso da descarga, à densidade de corrente através do resistor, à temperatura do resistor, à polaridade dos surtos e número de descargas, como se observa na Figura 16 e na Figura 17. Estas se referem a impulsos atmosféricos e a impulsos de manobra, respectivamente, e por meio delas se conclui que quanto maior a densidade de corrente imposta aos resistores de ZnO maior será o aumento na corrente de fuga.

Figura 16: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de 8x20 μ s – 400A/cm² (SANTOS, 2007).

Figura 17: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de 500x1500 μ s – 35A/cm² (SANTOS, 2007).

2.5.3.) Características Elétricas dos Para-raios

A correta seleção e especificação de um para-raios para adequada proteção de um equipamento, ou de um grupo de equipamentos, deve levar em consideração uma série de fatores. Dentre os mesmos, os mais relevantes a esta pesquisa serão expostos a seguir baseando-se nas definições apresentadas por Franco (2008), D'Ajuz *et al.* (1985) e ABB (2012), para um para-raios de ZnO sem centelhador.

- **Tensão Nominal:** É o maior valor eficaz de tensão fase–terra, à frequência industrial (60 Hz), que o para-raios pode suportar seguramente durante sobretensões temporárias estabelecidas nos ensaios de ciclo de operação.
- **Tensão Residual:** é o valor de pico de tensão desenvolvido entre os terminais do para-raios e, conseqüentemente, ao equipamento em paralelo com ele, durante a passagem da corrente de descarga.
- **Tensão Máxima de Disparo para Impulso Atmosférico:** é o maior valor de tensão de disparo do para-raios quando submetido a impulsos do tipo 1,2x50 μ s.
- **Máxima Tensão Contínua de Operação (MCOV):** É o maior valor eficaz de tensão fase–terra, à frequência industrial (60 Hz), a que pode ser submetido o para-raios continuamente e por tempo indeterminado, sem que o mesmo se danifique. Por exemplo, se a tensão nominal do sistema for 138 kV e o mesmo nunca opera acima de 150 kV, então a MCOV será $150 \text{ kV}/\sqrt{3}=86,6 \text{ kV}$. O valor de MCOV mais próximo disponível comercialmente é 92 kV, que está associado a um para-raios de 120 kV de tensão nominal.
- **Capacidade de Sobretensão Temporária (TOV):** é determinada em função da característica de suportabilidade tensão *versus* duração, em que é indicada a quantidade de tempo para a qual é permitida a aplicação de uma tensão superior à tensão máxima de operação em regime contínuo nos terminais do para-raios.
- **Capacidade de Curto-circuito:** é a capacidade de um para-raios de, na eventualidade de uma sobrecarga por qualquer motivo, conduzir a corrente de curto-circuito resultante do sistema sem abalos violentos que possam danificar os equipamentos próximos ou ferir pessoas. Após tal operação, o para-raios deve ser substituído.
- **Capacidade do Isolamento Externo:** é o valor máximo da tensão aplicada, com uma forma de onda específica, que não causa descarga disruptiva em um para-raios. Ao contrário de outros equipamentos, os para-raios são projetados para descarregar internamente e a tensão através do seu encapsulamento não pode nunca exceder os níveis de proteção. Assim, o isolamento externo está auto protegido se a sua capacidade for superior à dos níveis de proteção corrigidos para a altitude de instalação.
- **Capacidade de Absorção de Energia:** é o valor da maior quantidade de energia a que pode ser submetido um para-raios, em condições preestabelecidas, sem que as suas características sofram alterações significativas após o retorno às condições normais de operação.
- **Corrente de Descarga Nominal:** É o valor de pico de corrente usada para classificar o para-raios. Possui forma de onda de 8/20 μ s.

- **Corrente de Referência:** é o valor de crista da componente resistiva da corrente de frequência industrial aplicada ao para-raios para definir sua tensão de referência, e seus valores típicos se situam na faixa entre 1 e 20 mA.
- **Tensão de Referência:** é o valor de crista da tensão de frequência fundamental dividida por 2, que se estabelece nos terminais do para-raios quando por ele circula a corrente de referência, definindo o ponto de transição entre as regiões de baixas correntes e de alta não linearidade.

Posto isto, o conhecimento da curva associado às especificações nela contidas é importante para a escolha de um para-raios pelo projetista do sistema de proteção de uma subestação, linha de transmissão ou linha de distribuição. A título de ilustração, a Figura 18 mostra o esboço de uma curva característica de um varistor de ZnO com alguns dos valores típicos das especificações descritas anteriormente.

Figura 18: Curva característica típica de um varistor de ZnO (FRANCO, 2008).

Capítulo 3. Características das Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica (ou raio) é um fenômeno da natureza de difícil análise em razão de sua aleatoriedade. É uma descarga elétrica de grande extensão (da ordem de quilômetros) e de grande intensidade (com picos de corrente elétrica da ordem de quiloampères) e um dos causadores de distúrbios eletromagnéticos nos sistemas elétricos de potência, resultando em desligamentos não programados dos sistemas de energia e culminando em enormes perdas para consumidores residenciais, industriais, comerciais e públicos.

Atualmente, devido ao processo de aquecimento e grandes alterações climáticas pelo qual o planeta passa, estas intempéries naturais estão intensificando-se e se tornando cada vez mais severas. Além disso, em regiões tropicais próximas à linha do Equador, onde se localiza o Brasil, este fenômeno se manifesta mais intensamente e em maior número, o que torna o seu estudo ainda mais relevante (PINTO Jr, 2009).

Dessa forma, no presente capítulo serão descritos os conceitos básicos sobre descargas atmosféricas, como ocorre à formação das cargas nas nuvens e dos raios, como se desenvolvem as descargas entre nuvem e o solo, locais onde se observa maior incidência das mesmas, e quais as principais características e parâmetros da corrente de descarga, pois seu conhecimento é de grande importância para estimar adequadamente a severidade de fenômenos solicitantes em sistemas elétricos em virtude da ocorrência de descargas diretas e indiretas, tais como as tensões induzidas, e para a determinação de práticas de proteção mais adequadas a partir de suas análises.

3.1.) DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS

Antes de descrever e caracterizar os diferentes processos envolvendo o fenômeno das descargas atmosféricas se faz necessário apresentar algumas definições e conceitos os quais seguem abaixo (VISACRO, 2005).

- **Descarga elétrica:** fluxo de cargas elétricas a partir de um ponto eletricamente carregado por meio de um processo disruptivo em meio isolante ou por meio de descarregamento através de meio condutor;
- **Descarga atmosférica:** descarga elétrica com origem atmosférica entre nuvens ou entre uma nuvem e a terra, a qual consiste em um ou mais impulsos de vários quiloampères, envolvendo efeitos elétricos, sonoros e visuais;

- **Canal de Descarga:** corresponde ao canal ionizado que liga nuvem e solo e por meio do qual evolui a corrente de retorno de descarga;
- **Corrente de Retorno:** corrente que flui pelo trajeto ionizado formado pelo canal de descarga em seguida ao fechamento do mesmo;
- **Raio:** representa um impulso elétrico de uma descarga atmosférica para a terra;
- **Trovão:** ruído produzido pelo deslocamento do ar em virtude do súbito aquecimento deste nas proximidades do canal de descarga;
- **Relâmpago:** luz emitida em virtude do desenvolvimento da corrente de retorno no canal de descarga;
- **Índice Ceraúnico:** é definido como o número de dias de trovoada em determinado lugar decorrido o período de um ano;
- **Isoceraúnicas:** são curvas que ligam pontos que possuem o mesmo índice ceraúnico.

3.2.) PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS

Mesmo com diversos estudos a formação das cargas nas nuvens é um fenômeno ainda não totalmente conhecido devido à grande quantidade de fatores envolvidos neste processo. Contudo, quase a totalidade das teorias desenvolvidas reconhece a fundamental importância da atuação do vento na separação das partículas de polaridades opostas, ainda que apresentem diferentes conceitos entre si a respeito da importância do papel da ionização da atmosfera, da temperatura e de outros aspectos (SALARI, 2006).

Dessa forma, o conceito comum entre tais teorias indica que as correntes de ar ascendentes, as quais são bastante úmidas, ao atingirem elevadas altitudes e deparar-se com menores temperaturas sofrem o processo de condensação de sua umidade formando gotículas de água suspensas que se agrupam até formarem gotas maiores. Essas gotas ao colidirem com outras gotas de água promovem a distribuição de cargas positivas na parte superior das nuvens e de negativas na parte inferior das mesmas, como pode ser visto na Figura 19. Tal separação ocorre em virtude da diferença de energia cinética destas cargas, uma vez que as gotas carregadas positivamente possuem maior energia cinética e por isso se movem ascendentemente.

Devido à concentração de cargas negativas na parte inferior da nuvem induz-se uma concentração de cargas positivas no solo com comprimento equivalente ao da nuvem, como também se vê na Figura 19. Estas cargas acompanham o deslocamento da nuvem em virtude da ação dos ventos promovendo o deslocamento de cargas positivas por prédios, antenas, torres, árvores, pontes, morros e carros.

Ainda, tem-se conhecimento de que os mecanismos de eletrificação e carregamento das nuvens abarcam diversos fenômenos não descritos aqui e de maior complexidade, mas é sabido que aproximadamente 95% das nuvens carregam-se pelo processo descrito acima (SARAN, 2009).

Figura 19: Distribuição das cargas nas nuvens [adaptada de (UMAN, 1984)].

3.3.) PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas são descargas elétricas de grande extensão e de grande intensidade de corrente elétrica, as quais se dão em virtude da interação do acúmulo de cargas elétricas opostas entre nuvens ou entre a atmosfera e a terra (UMAN, 1984). Quando o campo elétrico produzido pela influência mútua destas cargas excede a rigidez dielétrica do ar ocorre uma intensa e rápida movimentação de elétrons da região de cargas negativas para a região de cargas positivas acarretando a formação de um impulso elétrico para a terra, ou raio (VISACRO, 2005).

Podem-se classificar as descargas atmosféricas segundo os locais que envolvem sua ocorrência, a sua direção de evolução e sua polaridade da seguinte forma:

- Local de ocorrência: dentro das nuvens ou intra-nuvens, entre nuvens, entre nuvens e o solo, e entre nuvens e a estratosfera;
- Direção de evolução: ascendente ou descendente;
- Polaridade: positiva ou negativa.

Quando o centro gerador de carga é negativo, a descarga é chamada de descarga negativa. Quando o centro gerador de carga é positivo, a descarga é do tipo positiva. Os centros de carga mais próximos ao solo possuem as maiores chances de produzir descargas nuvem-solo. Como as cargas inferiores positivas não são muito significativas, os “bolsões” negativos constituem as fontes mais frequentes desse tipo de fenômeno.

Esta pesquisa focar-se-á nas descargas mais severas aos estudos de proteção de sistemas elétricos, ou seja, descargas entre nuvens e o solo, e as de maior ocorrência, descendentes e negativas. Isto porque as descargas entre nuvens e o solo são mais danosas às redes de transmissão e distribuição de energia e pelo menos 90% das mesmas são descendentes e negativas, segundo CIGRÉ (1991) e como se pode ver pela Figura 20.

Figura 20: Probabilidade da amplitude máxima de corrente em virtude da polaridade da descarga [adaptado de (NOBLAT, 1994)].

Inicialmente, para ocorrer a formação de uma descarga nuvem/solo é necessário que campos elétricos interiores à nuvem rompam a rigidez dielétrica do ar originando um primeiro canal ionizado. Este canal ainda não é capaz de ligar a nuvem ao solo, mas promove o deslocamento de novas cargas elétricas que se agrupam formando novos canais em direção ao solo. O campo elétrico necessário para tanto é da ordem de 2 MV/m para o ar seco em condições atmosféricas normais, entretanto pode variar em virtude da presença de gotículas de água na nuvem e da altura da mesma (UMAN, 1984; WAGNER, 1950).

Posto isto, estes canais evoluem em direção ao solo de forma aleatória por saltos ou impulsos deslocando consigo grande quantidade de cargas negativas dando origem ao canal precursor de descarga, o qual se desloca sempre em direção ao solo e se compõem por diversas ramificações que muitas vezes terminam no ar. Ao chegar às proximidades do solo ou de estruturas, tais como postes, torres, antenas e condutores de linhas de transmissão e distribuição,

induz-se um campo elétrico resultante capaz de dar origem a um ou mais canais ascendentes com carga positiva. Estes canais também se deslocam por saltos e vão ao encontro do canal descendente, podendo ocorrer a conexão entre eles e o consequente fechamento do percurso caso a carga dos canais descendentes seja elevada o bastante para manter a progressão, e a distância entre ambos superar determinado valor crítico, como pode ser visto na Figura 21 (RAKOV e UMAN, 2003).

Figura 21: Visão geral de uma descarga atmosférica [adaptado de Rakov e Uman (2003)].

A partir de então fica estabelecido um canal condutor ionizado ligando uma região carregada de uma nuvem a terra, estabelecendo uma corrente de descarga com pico de várias dezenas de quiloampères e tempo de deslocamento de poucos microssegundos com forma de onda impulsiva. Não obstante, durante o fluxo desta corrente, designada por corrente de retorno, ocorrem dois fenômenos perceptíveis pelo ser humano, conhecidos popularmente como trovão e relâmpago.

Terminado o fluxo de corrente da descarga de retorno, a descarga atmosférica pode então extinguir-se ou não, pois se ocorrerem novos fluxos de cargas negativas em direção ao canal de

ionização surgirá uma corrente de reacendimento do canal e se iniciarão outras descargas, denominadas descargas subsequentes. Além disso, também poderá surgir um novo precursor entre a nuvem e o solo, sem ramificações e com velocidade de propagação ainda maior que a do precursor inicial, mas que possuirá corrente de magnitude inferior, em torno de $1/3$ a $1/2$ da corrente inicial (WAGNER, 1950).

Por fim, o processo descrito pode se repetir inúmeras vezes e outras descargas podem suceder esta segunda com magnitudes de corrente até maiores que a da primeira descarga, sendo que em média observa-se o acontecimento de 2 ou 3 descargas subsequentes. O procedimento do desenvolvimento das sucessivas descargas pode ser demonstrado pela Figura 22.

Figura 22: Representação da formação das descargas subsequentes [adaptada de (UMAN, 1984)].

3.4.) CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DA ONDA DE CORRENTE DE DESCARGA

As características da onda de corrente de descarga são fundamentais para estudos do comportamento de linhas de transmissão e distribuição frente às descargas atmosféricas. Dentre estas características destacam-se (BERGER *et al.*, 1975):

- **Amplitude da corrente:** critério de maior influência na determinação da severidade dos danos causados à linha, pois quanto maior a amplitude de corrente maior será a sobretensão gerada;
- **Tempo de frente:** tempo que a onda de corrente de descarga leva para alcançar seu pico, ressaltando que quanto menor o tempo maior o rigor da sobretensão causada;
- **Taxa de crescimento da corrente:** parâmetro que demonstra o quão rápido cresce a corrente de retorno, observando-se que quanto mais rápido é este aumento mais severo é a descarga;

- **Tempo de cauda:** tempo que a onda de corrente leva para retornar a 50% do seu valor de pico desde o seu início, ou seja, representa o tempo que a linha é submetida à corrente de descarga atmosférica;
- **Carga da corrente de descarga de retorno:** intensidade de carga acumulada ao longo do canal precursor pelo impulso da corrente de retorno e transferida a terra pela mesma;
- **Energia dissipada por unidade de resistência:** expressa a potencialidade da corrente de retorno em dissipar energia.

A corrente de descarga de uma descarga atmosférica possui um formato de impulso, pois, devido à curta duração do evento (da ordem de microssegundos), a corrente atinge sua amplitude máxima (conhecida como valor de pico ou valor de crista) e depois cai mais lentamente para valores da ordem de quiloampères. O tempo médio de duração de uma descarga atmosférica é da ordem de 500 ms (VISACRO, 2005). A Figura 23 mostra a relação Corrente versus Tempo de uma descarga atmosférica.

Figura 23: Sinal típico da corrente de uma descarga atmosférica. O registro foi feito na estação do Morro do Cachimbo (VISACRO, 2005).

O sinal típico que representa uma descarga atmosférica consiste na forma de onda da corrente de retorno. Muito utilizada na literatura é a forma de onda dupla exponencial vista na Figura 24, chamada de onda de impulso atmosférico. Essa grande utilização se baseia na necessidade de padronização dos ensaios experimentais e pela capacidade da estimativa de parâmetros, comportamento de equipamentos, dispositivos e materiais quando submetidos a um surto de comportamento impulsivo como uma descarga atmosférica e a facilidade em gerar tal padrão de onda em laboratório. Tradicionalmente as ondas de $1,2/50\mu\text{s}$ e $5/20\mu\text{s}$ são utilizadas em ensaios laboratoriais (VISACRO, 2005).

Figura 24: Onda dupla exponencial (VISACRO, 2005).

Apesar das vantagens na utilização da onda dupla exponencial, esta não possui uma boa representatividade do sinal de uma descarga atmosférica real, pois existem aspectos importantes que diferem as curvas reais de descargas e a dupla exponencial.

O primeiro diferencial está na natureza côncava da frente de onda da descarga real nos instantes iniciais, que não é contemplada pela representação por dupla exponencial. O outro aspecto está na derivada máxima: enquanto a dupla exponencial possui derivada máxima próxima ao pico, a representação real possui exatamente no pico da curva. Portanto, a avaliação de desempenhos de sistemas elétricos que utilizam o perfil de corrente da dupla exponencial poderá resultar em efeitos muito diferentes daqueles sistemas que utilizam o perfil de onda com representação mais fiel a real (VISACRO, 2005).

Heidler (1995) apresentou uma função analítica capaz de representar com boa fidelidade o sinal de uma descarga. Hoje em dia essa curva é amplamente utilizada em simulações para avaliação de efeitos gerados pelo fluxo da corrente de retorno (VISACRO, 2005). A Figura 25 mostra a onda típica do sinal de descarga atmosférica representada pela Função de Heidler.

Figura 25: Representação da onda de corrente utilizando a curva de Heidler [5].

Baseado na Figura 25 pode se extrair informações importantes do sinal de descarga, tais como: valor de crista (I_0); o tempo de frente virtual (t_1), que representa o intervalo de tempo entre o instante da origem virtual (30% de I_0) e o valor de pico I_0 ; a cauda do raio, que se mostra mais suave e começa após a passagem do pico de descarga; e o tempo de meia cauda (t_2), que é o tempo decorrido entre a origem virtual e o momento após a passagem do valor de pico que a descarga atinge 50% de I_0 .

Além disso, na Tabela 3 são mostrados os dados estatísticos levantados pelo CIGRÉ (1991) a partir de uma compilação de informações obtidas por diversos autores, com os respectivos parâmetros empregados na distribuição log-normal para representação de uma descarga negativa como a da Figura 26.

Neste contexto, a Figura 26 a seguir representa uma onda característica de corrente de descarga ao longo do tempo para uma descarga nuvem-solo negativa, cuja variação do pico de corrente foi aproximada por uma distribuição log-normal, a partir da qual se pode definir e identificar alguns de seus principais parâmetros, os quais são expostos a seguir.

Figura 26: Forma de onda típica da corrente de descarga com seus principais parâmetros associados para uma descarga nuvem-solo negativa [adaptada de (CIGRÉ, 1991; IEEE, 2004)].

- **Amplitude máxima [kA]**

- I_I – primeiro pico da corrente de descarga ou corrente inicial;
- I_F – segundo pico da corrente de descarga ou corrente final, o qual geralmente é o maior valor entre os dois picos;
- I_{10} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 10% do valor de I_I ;
- I_{30} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 30% do valor de I_I ;
- I_{90} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 90% do valor de I_I ;
- I_{100} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 100% do valor de I_I .

- **Tempo de frente de onda [μ s]**

- $T_{10/90}$ – intervalo de tempo entre os pontos em que o módulo da corrente vale respectivamente 10% e 90% do valor de seu primeiro pico;
- $T_{30/90}$ – intervalo de tempo entre os pontos em que o módulo da corrente vale respectivamente 30% e 90% do valor de seu primeiro pico.

- **Derivadas da corrente em relação ao tempo [$\text{kA}/\mu\text{s}$]**

- S_m – derivada máxima da corrente durante o tempo de frente de onda;
- S_{10} – derivada da corrente no ponto em que seu módulo vale 10% do primeiro pico;
- $S_{10/90}$ – derivada média da corrente no ponto em que seu módulo vale 10% e 90% do primeiro pico;

➤ $S_{30/90}$ – derivada média da corrente no ponto em que seu módulo vale 30% e 90% do primeiro pico.

- T_h – tempo de cauda [μs].
- Q_I – carga do impulso da corrente de descarga [C].
- $\int I^2(t) dt$ – energia dissipada por unidade de resistência [$(kA)^2s$].

Tabela 3: Compilação dos parâmetros estatísticos por distribuição log-normal para descargas descendentes negativas levantados pelo CIGRÉ [adaptada de (CIGRÉ, 1991)].

Parâmetro	Primeira Descarga		Descarga Subsequente	
	Média	Desvio Padrão Logarítmico	Média	Desvio Padrão Logarítmico
Frente de Onda [μs]	-----	-----	-----	-----
$td_{10/90} = T_{10/90} / 0,8$	5,63	0,576	0,75	0,921
$td_{30/90} = T_{30/90} / 0,6$	3,83	0,553	0,67	1,013
Taxa de Crescimento [$kA/\mu s$]	-----	-----	-----	-----
S_m máximo	24,3	0,599	39,9	0,852
S_{10} (em 10% de I_{pico})	2,6	0,921	18,9	1,404
$S_{10/90}$ (entre 10% e 90% de I_{pico})	5	0,645	15,4	0,944
$S_{30/90}$ (entre 30% e 90% de I_{pico})	7,2	0,622	20,1	0,967
Corrente de Crista [kA]	-----	-----	-----	-----
I_I (corrente inicial)	27,7	0,461	11,8	0,53
I_F (corrente final)	31,1	0,484	12,3	0,53
I_I / I_F	0,9	0,23	0,9	0,207
T_h [μs]	77,5	0,577	30,2	0,933
Q_I [C]	4,65	0,882	0,938	0,882
$\int I^2(t) dt$ [$(kA)^2s$]	0,057	1,373	0,0055	1,366
Intervalo entre Descargas [ms]	-----	-----	35	1,066

Posto isto, a partir dos dados da Tabela 3 e de estudos específicos sobre os parâmetros das correntes de descarga, pode-se aproximar a variação da corrente de pico (I) pela distribuição log-normal e definir a função distribuição de probabilidade da corrente de pico pela equação (3.1) (ANDERSON, 1982). Esta função traduz a probabilidade de I ser maior ou igual a um determinado valor i_0 em kA, e tem sua representação dada pelo gráfico da Figura 27.

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (\frac{i_0}{31})^{2,6}} \quad (3.1)$$

Figura 27: Distribuição acumulada de corrente baseada na equação de Anderson (ANDERSON, 1982).

3.5.) INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O conhecimento da distribuição e incidência de descargas atmosféricas em determinada região é fundamental para a predição da severidade de surtos em pontos específicos do sistema elétrico. Um meio de obterem-se tais informações é pela análise de mapas isoceraúnicos, os quais ilustram o número de dias de trovoadas por ano (T_d) em uma região específica. Na Figura 28 e na Figura 29 são apresentados estes dados por meio das curvas isoceraúnicas para todo território brasileiro e apenas para a região Sudeste, respectivamente.

Figura 28: Mapa de curvas isoceraúnicas do Brasil (NBR 5419, 2005).

Figura 29: Mapa de curvas isoceraúnicas da região Sudeste para o período de 1971 a 1995 (NBR 5419, 2005).

Pode-se estimar a densidade de descargas atmosféricas diretas para a terra (N_g), ou seja, o número de raios para a terra por quilômetro quadrado por ano para uma dada região. Sendo assim, o valor de N_g pode ser calculado para uma determinada região por (3.2):

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} \text{ [km}^2\text{/ano]} \quad (3.2)$$

Onde T_d é o número de dias de trovoadas por ano, obtido de mapas isoceraúnicos ou, mais recentemente, de mapas como o ilustrado na Figura 30.

Alternativamente, os valores de N_g para uma dada região podem ser obtidos dos mapas de isodensidades (ABNT, 2015; INPE, 2015). Um exemplo pode ser visto na Figura 31.

Figura 30: Número médio de dias de trovoadas por ano (T_d) na região sudeste do Brasil de 1999 a 2006 (fonte: Pinto Jr, Naccarato e Pinto, 2003).

Figura 31: Mapa de isodensidades (N_g) da região Sudeste do Brasil (descargas atmosféricas/km²/ano). Fonte: ABNT, 2015.

Não obstante, estudos revelam que há maior incidência de raios em pontos mais elevados do relevo, em torres, árvores, prédios, regiões de muita precipitação com fortes tempestades, e em locais com solos maus condutores. Neste tipo de solo a incidência é maior porque forma-se um “capacitor” entre a nuvem e o mesmo, e porque por meio dele não acontece o escoamento dos raios, o que faz com que eles procurem caminhos de menor resistência para se distribuir. Dentre os solos com características más condutoras com maior incidência de raios destacam-se os graníticos e os xistosos, enquanto os calcários são tidos como terrenos bons condutores (KINDERMANN, 1992).

Uma forma de identificar terrenos mais propensos à incidência de raios é por meio da manifestação de um cheiro adocicado indicando a presença de ozônio em virtude da ionização do ar. Essa ionização diminui a distância de isolamento entre os mesmos causando um aumento da probabilidade de o raio piloto furar a camada de ar e incidir nessa região. Em países como Estados Unidos, Alemanha e França, por exemplo, foram definidos nos seus mapas locais os pontos onde é maior a probabilidade de incidência de descargas atmosféricas baseando-se na localização dos terrenos maus condutores e mais elevados do seu relevo (KINDERMANN, 1992).

3.6.) TIPOS DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E RESPECTIVAS CONSEQUÊNCIAS

As descargas diretas, embora menos frequentes nos sistemas de distribuição, possuem consequências severas, podendo ocasionar o desligamento de linhas de transmissão de alta tensão. Em contrapartida, as tensões induzidas pela incidência de descargas próximas à linha são fenômenos mais frequentes e que originam amplitudes de sobretensão relativamente amortizadas nos condutores da linha quando comparadas às de origem direta, situando-se seus valores máximos em aproximadamente 300 kV (VISACRO, 2005). Tendo como base este valor, averigua-se que as sobretensões relacionadas à incidência indireta são mais relevantes para sistemas de média e baixa tensão, tais como as redes de distribuição de energia, que são o foco principal desta pesquisa.

Nesta conjuntura, baseando-se em Visacro (2005), a seguir, serão expostas considerações sobre o mecanismo de estabelecimento de sobretensões em linhas aéreas de quatro formas diferentes. Por incidência direta de descargas atmosféricas nos condutores energizados da linha, denominado *flashover*; por incidência direta nos condutores de blindagem, designado *backflashover*; por incidência direta nos cabos de blindagem a meio vão; e por incidência de descargas atmosféricas indiretas.

3.6.1.) Características Pertinentes a Incidência Direta de Descargas Atmosféricas

As descargas diretas que atingem francamente a rede elétrica podem afetar os condutores fase, os cabos de blindagem e para-raios, e os cabos de blindagem a meio vão, originando diferentes sobretensões. Estas sobretensões dependem de vários fatores, tais como a intensidade da corrente de descarga e a taxa de crescimento da mesma, o ponto de incidência, as características de aterramento da linha e o comportamento transitório do sistema elétrico abrangido.

c) Incidência Direta em Condutor Energizado

O mecanismo de ruptura do isolamento relacionado à incidência de uma descarga atmosférica direta em um condutor energizado de uma linha é denominado descarga disruptiva no isolamento, ou *flashover*. O mesmo pode ocorrer na situação em que determinada linha não possui cabos de blindagem ou quando o sistema de blindagem existente sofre uma falha. Este segundo caso acontece em circunstâncias em que a amplitude da corrente de descarga é consideravelmente reduzida, o que possibilita a penetração desta corrente na área protegida pela blindagem sem que a mesma seja interceptada, tornando-a apta a atingir os condutores energizados.

Dessa forma, após a incidência direta da descarga na linha, tem-se o estabelecimento de elevados níveis de sobretensões entre os condutores energizados e o terra, uma vez que as ondas de tensão decorrentes da corrente de descarga viajam ao longo da linha fazendo com que os isoladores sejam submetidos a elevados valores de sobretensões.

Além disso, usualmente o isolador é exposto a uma sobretensão tão elevada que ocorre o rompimento do isolamento e a formação de um arco elétrico que liga o condutor energizado à estrutura aterrada drenando parcialmente a corrente proveniente da descarga atmosférica em direção a terra.

Destaca-se que os equipamentos mais empregados em linhas de transmissão e distribuição para proteção contra o *flashover* são os para-raios e cabos de blindagem, os quais são diretamente ligados às estruturas a serem protegidas e ao solo através dos sistemas de aterramento.

Apenas a título ilustrativo, de modo simples a amplitude da sobretensão associada à incidência direta de uma descarga pode ser calculada basicamente pelo produto entre a amplitude da corrente que viaja na linha e o valor da impedância de surto (Z_S) da mesma, impedância está dada por (3.3).

$$Z_S = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.3)$$

Na qual L e C representam a indutância e a capacitância da linha, respectivamente. Desse modo, como ilustrado na Figura 32, considerando uma descarga direta em uma linha que possui

impedância de surto de $300\ \Omega$, cuja corrente de descarga tenha valor de pico de 40 kA e sua onda viajante de corrente se divida em duas parcelas no momento da incidência, tem-se um valor de 6 MV para a amplitude da sobretensão (VISACRO, 2005).

Figura 32: Linha de transmissão sem para-raios atingida por uma descarga atmosférica direta em um de seus condutores energizados [adaptada de (VISACRO, 2005)].

d) Incidência Direta em Condutor de Blindagem

O mecanismo de ruptura do isolamento relacionado à incidência de uma descarga atmosférica direta em um condutor de blindagem da linha é designado descarga disruptiva de retorno, ou *backflashover*. Os cabos de blindagem são alocados acima dos condutores fase a fim de assegurar a interceptação de eventuais descargas que poderiam atingir diretamente as fases da linha. Os mesmos são ligados diretamente ao solo por condutores de descida ou por conexões elétricas à estrutura, conectadas à malha de aterramento, direcionando para o solo as correntes de eventuais descargas.

Quando ocorre a incidência de uma descarga direta sobre o condutor de blindagem, como ilustrado na Figura 33, francamente na estrutura aterrada da linha, ou no meio vão da mesma, a corrente de descarga viaja pelos condutores de blindagem até se deparar com as estruturas aterradas e se descarregar no solo. Ao mesmo tempo se estabelecem elevados níveis de sobretensões no topo das torres e nas cadeias de isoladores que sustentam os condutores das fases separando-os eletricamente da estrutura metálica da linha.

Figura 33: Linha de transmissão atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica direta [adaptada de (VISACRO, 2005)].

Assim como para um *flashover*, a amplitude da sobretensão originada pela ocorrência de um *backflashover* é dada aproximadamente pelo produto entre a amplitude da onda de corrente e a impedância de surto da linha. Quando a sobretensão advinda do *backflashover* em uma linha de transmissão, como a da Figura 33, atinge os componentes do sistema de aterramento sua onda sofre uma reflexão, caracterizando o fenômeno da propagação de ondas em descontinuidades. A amplitude desta onda de sobretensão refletida é intensamente dependente da relação entre a impedância da linha e a impedância do sistema de aterramento, sendo seu coeficiente de reflexão (Γ_r) e a relação entre a tensão refletida (V_r) e a tensão incidente (V_i) dados por (3.4) e (3.5) (ZANETTA, 2003).

$$\Gamma_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (3.4)$$

$$V_r = \Gamma_r V_i \quad (3.5)$$

Em que Z_1 representa a impedância da linha e Z_2 a impedância do sistema de aterramento.

Ainda neste contexto, a tensão refletida no topo da linha de transmissão é obtida pela sobreposição das ondas incidente e refletida, conforme ilustrado na Figura 34. Por meio desta figura, depreende-se que há reflexão total da onda incidente para a condição em que $\Gamma_r = -1$ e também se constata um atraso entre tais ondas igual ao dobro do tempo de transito, representado por τ . Não obstante, a onda de sobretensão total resultante chega ao topo da estrutura aterrada estabelecendo o valor final da sobretensão, que é imposto entre a estrutura aterrada e os condutores energizados.

Figura 34: Representação da reflexão da onda de tensão e determinação da onda resultante no topo da torre [adaptada de (VISACRO, 2005)].

Ressalta-se que o efeito da reflexão da tensão na base da estrutura aterrada é o mais significativo dentre os diferentes efeitos relacionados às reflexões que podem suceder nos condutores de blindagem, nos eletrodos de aterramento e nas estruturas próximas a linha. Além disso, em estudos de proteção, a análise dos efeitos das sobretensões originadas pelo *backflashover* sobre a cadeia de isoladores recebe maior importância, pois segundo os mesmos observa-se que a impedância de aterramento tem grande influência na sobretensão estabelecida nos terminais da cadeia de isoladores. Nestas situações, em geral, as concessionárias de energia adotam a redução da resistência de pé de torre a fim de reduzir a amplitude desta sobretensão e a frequência de ocorrência das descargas disruptivas de retorno (SOARES Jr, 1996).

e) Incidência Direta em Condutor de Blindagem a Meio Vão

Outro mecanismo de ruptura do isolamento relacionado à incidência de uma descarga atmosférica direta ocorre quando há incidência nos condutores de blindagem no meio do vão entre duas torres de transmissão que possuem vãos muito extensos, como mostrado na Figura 35. Neste tipo de situação é gerada uma sobretensão entre os condutores de blindagem e os condutores fase energizados muito superior à sobretensão nas cadeias de isoladores devido à incidência direta sobre os componentes da torre. Sobretensão esta, a qual pode ser de três a quatro vezes maiores que à sobretensão na cadeia de isoladores, causando a ruptura do isolamento do ar entre os condutores fase e os de blindagem.

Figura 35: Fenômeno do Back flashover no topo da torre e meio do vão [adaptada de (VISACRO, 2005)].

O valor de amplitude da sobretensão neste caso se deve ao fato de a incidência da descarga ocorrer em um ponto bastante distante do ponto de aterramento da linha, o que faz com que a onda de tensão negativa refletida demore muito para alcançar o ponto de incidência da descarga. Isto faz com que a onda de sobretensão resultante alcance seu valor de pico antes do efeito da onda negativa de tensão, estabelecendo uma grande solicitação, até mesmo em situações em que as correntes de descarga possuam pequenas amplitudes. Nestas circunstâncias a impedância de aterramento tem pouca influência sobre a máxima sobretensão estabelecida, e a medida mais adequada para amenizar o surgimento de tais sobretensões é a diminuição da distância entre os condutores fase e o condutor de blindagem.

Como exemplo, em uma linha que possui 900 m de comprimento entre duas torres sucessivas e na qual ocorre a incidência de uma descarga a meio vão, o retorno da onda de tensão refletida aconteceria após aproximadamente 3 μ s. Sendo assim, para qualquer descarga cuja corrente tenha tempo de frente inferior a 3 μ s a sobretensão resultante a meio vão atingiria o valor de crista da onda incidente (VISACRO, 2005).

Por fim, adverte-se que este tipo de ocorrência de sobretensão é mais comum em linhas de transmissão de alta tensão localizadas em relevos montanhosos, nos quais se faz necessário a instalação de torres bastante elevadas e com grandes vãos entre torres adjacentes.

3.6.2.) Características Pertinentes à Incidência Indireta de Descargas Atmosféricas

As descargas indiretas, ou próximas, são descargas que caem nas regiões adjacentes às linhas, como ilustrado pela Figura 36, e que podem causar prejuízos às mesmas por meio do surgimento de tensões induzidas. Estas tensões são fruto do campo eletromagnético causado pela

corrente de descarga de retorno, o qual se irradia atingindo os cabos fase energizados, cabos de blindagem, para-raios, e demais componentes das redes de energia.

A irradiação deste campo eletromagnético pode causar efeitos como interferência eletromagnética ou o surgimento de tensões induzidas, estando à intensidade das mesmas condicionadas pela taxa de crescimento da corrente de retorno na frente de onda ou pelos seus parâmetros associados (VISACRO, 2005).

A corrente de retorno apresenta uma variação no tempo bastante rápida, da ordem de microssegundos, gerando um campo eletromagnético intenso que se propaga e interage com os corpos condutores em regiões próximas ao ponto de incidência da descarga, implicando na formação das tensões induzidas. Os modelos de acoplamento eletromagnético foram desenvolvidos para representar a interação eletromagnética existente entre o canal de descarga e os condutores de linhas aéreas de transmissão e distribuição e, conseqüentemente, para servirem como ferramentas de cálculo de tensões induzidas nestas linhas.

Figura 36: Representação de uma linha de distribuição afeta pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica indireta [adaptada de (VISACRO, 2005)].

A amplitude da tensão induzida é influenciada por vários fatores dentre os quais se destacam: a intensidade da corrente de descarga, o tempo de frente da onda de corrente, a velocidade de propagação da corrente no canal de descarga, a distância relativa entre o ponto de incidência e a linha, a resistividade do solo, a altura da nuvem, e a altura da linha, além da configuração e de outros parâmetros da rede (VISACRO, 2005; SILVEIRA, 2006).

As sobretensões induzidas por descargas indiretas são mais comuns em redes de distribuição, uma vez que estas redes normalmente encontram-se protegidas naturalmente de descargas diretas por edificações, torres, árvores e obstáculos elevados ao redor de suas estruturas. Sendo assim, as descargas deste tipo são as grandes causadoras de falhas, desligamentos não

programados e interrupções de energia, que afetam consumidores de média e baixa tensão conectados às redes de distribuição.

Segundo Braga (2009) o nível básico de isolamento (NBI) das linhas de distribuição de média tensão é relativamente baixo se comparado com o das linhas de transmissão, uma vez que varia entre 95 kV e 170 kV. Em virtude deste fato, as descargas indiretas originam sobretensões acima do tolerável para estas linhas, já que causam sobretensões induzidas com valor máximo em torno de 300 kV.

Capítulo 4. Processamento de Descargas Atmosféricas para Determinação de Alimentador Piloto

As informações repassadas pela EDP-SP e pelo INPE permitiram a composição de três diferentes bases de dados, sendo elas a de ocorrências, de informações de rede e de registros de descargas atmosféricas.

O processamento destas informações fora realizado de maneira automatizada de forma a se realizar um filtro para a retirada de inconsistências, sendo que se pode dividir o cruzamento de informações em duas fases: tratamento da base de ocorrências, visando-se extrair o número de desligamentos para as causas 11, 20, 880 e 890 (na Tabela 4, os códigos e suas respectivas classificações para desligamentos da rede utilizadas pela distribuidora EDP-SP), elencadas como as possíveis causas oriundas de descargas atmosféricas; e tratamento das distribuições de intensidade e densidade de descargas atmosféricas para a região de concessão da EDP-SP, georreferenciando-se as quadrículas fornecidas pelo INPE com os dados dos alimentadores.

Tabela 4: Tabela de classificação de ocorrências de desligamento da EDP-SP (fonte: EDP-SP)

Código	Descrição	Atributos
11	011-Descarga Atmosférica	Descarga
20	020-Vento forte	Vento
130	130-Corrosão	Corrosão
150	150-Incendio não Ocasionado por Falhas	Incêndio
170	170-Inundação	Inundação
180	180-Galho de Árvore	Galhos
181	181-Árvore caída sobre a rede	Árvore
182	182-Poste podre / deteriorado	Poste podre
200	200-Animais	Animais
201	201-Defeito Interno - Trafo Particular	Defeito Int. - Trafo Part.
246	246-Interferência da Rede de Alta Tensão	Alta Tensão
300	300-Terceiros	Terceiros
310	310-Vandalismo	Vandalismo
311	311-Furto de Material da Empresa	Furto Mat.
321	321-Abalroamento	Abalroamento
322	322-Papagaio (Pipa)	Pipa
323	323-Objeto na rede	Objeto na Rede
324	324-Balões	Balões
325	325-Queimadas	Queimadas
326	326-Erosão	Erosão
327	327-Sujeira / Poluição	Sujeira/Poluição
328	328-Ligação Clandestina	Clandestinos
329	329-Maresia	Maresia
342	342-Defeito Interno - afetando outros	Def. Int. - Afetando Outros
343	343-Defeito Interno	Defeito Interno.
350	350-Desligamento Emergencial Solicitação Cliente	Emerg./cliente
351	351-Desligamento Emergencial Solicitação Autoridade	Emerg./autoridade

353	353-Racionamento	Racionamento
410	410-Problemas em trabalho de Linha Viva	Problemas LV
412	412-Bloqueio trabalho linha viva	Bloqueio p/ LV
420	420-Interferência Acidental Própria	Interf. Própria
430	430-Erros de Operação	Erros de Operação
440	440-Sobrecarga	Sobrecarga
443	443-Anomalia de Tensão	Anomalia Tensão
444	444-Tensão encontrada normal	Tensão Normal
445	445-Tensão corrigida no local	Tensão Corrigida
446	446-Tensão NÃO corrigida local	Tensão Não Corrigida
480	480-Falha no ajuste de proteção	Falha proteção
491	491-Deterioração de Equipamento	Deterioração
492	492-Conexão	Conexão
711	711-Falha no suprimento externo - LT	Falha Suprimento - LT
712	712-Falha no suprimento externo - SE	Falha Suprimento - SE
715	715-Atuação de esquema especial	Atuação Esq. Especial
811	811-Anomalia rede terceiros	Anomalia 3os.
812	812-Anomalia rede IP	Anomalia rede IP
813	813-Turmas trabalhando no local	Turmas no local
814	814-Verificações	Verificações
815	815-Encontrado em ordem	Em ordem
816	816-Endereço não localizado	End. Não local.
817	817-Cortado falta pagamento	Falta de Pagamento
818	818-Terreno intransitável	Terreno intransit.
819	819-Prédio em demolição	Prédio em demolição
820	820-Serviço mal executado	Serviço mal executado
823	823-Acompanhamento de carreta	Acompanhamento de carreta
824	824-Pré / Pós Intervenção na Rede	Pré/Pós Interv. na Rede
825	825-Prédio fechado	Prédio Fechado
827	827-Suspeita de fraude	Suspeita de Fraude
830	830-Rede própria - Falha outra Concessionária	Rede próp.falha outra Conc.
831	831-Rede outra Concessionária com sua falha	Rede outra Conc. c/sua falha
880	880-Causas não classificadas	Causas não classificadas
882	882-Corte / Religação	Corte / Religação
890	890-Causas não determinadas	Causas não determinadas
891	891-A Investigar	A investigar
944	944-Programada pelo consumidor	Programada pelo consumidor
970	970-Serviço Programado com aviso	Serviço programado
980	980-Desligamento para Manutenção Emergencial	Desligamento Emergencial
981	981-Demanda da Subtransmissão	Demanda subtransmissão
982	982-Contingência	Contingência

Para uma melhor compreensão dos fenômenos analisados, a rede da EDP–SP fora analisada ao nível das subestações, sendo os resultados apresentados nas seções a seguir.

4.1.) PROCESSAMENTO DE OCORRÊNCIAS

As ocorrências na rede de distribuição permitiram a confecção de gráficos de barras com o volume destas ocorrências, como exemplificado na Figura 37. Contempla-se através dos histogramas de distribuição de ocorrências as causas “descarga atmosférica” (11), “vento forte” (20), “causa não classificada” (880) e “causa não determinada” (890) para o período 2014-2015, e mostra-se o registro total de ocorrências por subestação, bem como a compilação de cada uma das 4 causas elencadas como associadas às descargas atmosféricas. Esta atividade se estendeu para todas as subestações desta concessionária.

Figura 37: Ocorrências para Aparecida (APA).

4.2.) PROCESSAMENTO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para o mesmo período de 2014-2015 foram também avaliadas as quadrículas contendo as informações de densidade e intensidade de descargas atmosféricas, sendo que tais dados foram processados a fim de se confeccionar um único gráfico que representasse a severidade da influência das descargas. Em seguida, realizou-se o georreferenciamento com os dados de rede primária, concentrando as análises por subestações. A Figura 38 mostra o resultado desta etapa para o alimentador Aparecida (APA). A escala utilizada para a definição das quadrículas refere-se à densidade da descargas atmosféricas por km². Os tons mais escuros indicam uma maior quantidade de descargas atmosféricas recebidas no local.

Figura 38: Descargas atmosféricas para APA.

De posse das análises de ocorrências e descargas atmosféricas por subestação é possível então realizar o cruzamento destas informações para escolha da área piloto. Esta metodologia de seleção será apresentada a seguir.

4.3.) INSTALAÇÃO DE CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As informações provenientes de descargas atmosféricas, as quais serão empregadas para futuras análises no projeto, contemplam o período entre os anos de 2014 e 2015. Nesse primeiro momento foi priorizado o processamento para a área de concessão da EDP-SP, sendo observadas 50.077 descargas em 2014 e 74.52 descargas em 2015. Foram também utilizados dados passados de descargas atmosféricas, compreendidos entre 2006-2008 para fins de comparação.

Assim, tem-se que em 2006 foram 65.666 descargas, 72.735 descargas em 2007 e 99.533 descargas em 2008. A amplitude média das descargas atmosféricas fora de 18.2 kA para o triênio 2006-2008 e 19.1 kA para o biênio 2014-2015. Em termos de polaridade, pôde-se constatar 88% de descargas negativas para o triênio 2006-2008 e 97% de descargas negativas para o biênio 2014-2015. Complementarmente, na Tabela 5, tem-se a relação de quedas de raio na área de concessão da EDP-SP em termos de número e por cada cidade integrante da área de concessão.

Tabela 5: Quantidade de descargas atmosféricas de 2013-2019 na área de concessão da EDP-SP (elaborado pelo autor).

Cidade	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total Geral
São José dos Campos	5537	3467	4242	7899	11966	7300	6632	47043
Mogi das Cruzes	2470	2935	5027	7943	5265	7072	4201	34913
Taubaté	2656	1804	2533	5677	5882	3768	4072	26392
Jacareí	2202	1911	1899	6147	4868	3785	3910	24722
Suzano	916	927	1788	1793	2005	2144	3118	12691
Pindamonhangaba	2226	861	1855	2916	4397	3335	2934	18524
Caçapava	1869	833	1245	2768	3907	2154	2714	15490
Salesópolis	892	1095	965	4258	1828	1412	2516	12966
Guaratinguetá	2375	1149	2178	4621	4894	4060	2249	21526
Guarulhos	1041	1216	1680	3650	3618	2457	2090	15752
São Sebastião	1470	660	896	2044	1899	1214	1618	9801
Santa Branca	921	930	1081	3490	2468	1241	1548	11679
Lorena	1205	661	1583	4319	2804	2516	1376	14464
Caraguatatuba	1035	504	777	1835	2042	1028	1308	8529
Itaquaquecetuba	292	592	724	1237	924	1024	1299	6092
Monteiro Lobato	1406	587	1244	2787	2267	2736	1282	12309
Biritiba-Mirim	1248	791	1442	2689	1322	1109	1159	9760
Guararema	934	948	1023	3872	1411	1735	1075	10998

Jambeiro	1268	363	835	1978	1626	1898	822	8790
Roseira	441	250	382	831	890	856	593	4243
Cachoeira Paulista	866	321	1100	2451	1632	1585	572	8527
Tremembé	593	309	519	828	1323	614	499	4685
Cruzeiro	533	265	716	847	1397	1054	462	5274
Aparecida	284	184	491	894	865	656	436	3810
Ferraz de Vasconcelos	200	162	161	374	452	234	391	1974
Poá	85	91	120	313	322	138	167	1236
Potim	120	60	64	266	177	180	136	1003
Canas	161	80	221	416	188	149	100	1315
Total Geral	35246	23956	36791	79143	72639	57454	49279	354508

4.4.) MAPAS DE INTENSIDADE

Para se ter um panorama geral de como a região de concessão da EDP–SP fora atingida por descargas atmosféricas, também se gerou mapas contendo todos os alimentadores, principalmente avaliando-se os dois períodos citados. Na Figura 39 é possível se comparar os mapas de intensidade média de descargas atmosféricas para os dois períodos citados.

Figura 39: Mapas de intensidade de descargas atmosféricas.

A intensidade das descargas segue uma uniformidade na região de concessão, ou seja, não se verifica uma região onde as descargas possuem intensidade que se destaque em relação à média. Com relação à polaridade, observou-se uma redução das descargas positivas, ou seja, aquelas que transportam uma maior quantidade de energia.

Conforme os dados citados anteriormente podem-se inferir que a média anual de descargas atmosféricas é de aproximadamente 79.311 para o primeiro período e de 62.264 para o segundo. Apesar de a média anual de descargas que atingiram a região de concessão da EDP-SP ter sofrido uma considerável redução de aproximadamente 27%, ainda existem análises que podem ser de suma importância para a escolha das especificações dos dispositivos que serão instalados no alimentador piloto.

Dentre tais constatações aponta-se a elevação de quase 1 kA na amplitude média das descargas. Tal elevação pode ser devido a uma infinidade de fatores e, se analisada separadamente, tendem a mascarar a severidade das ocorrências de descargas atmosféricas na região de concessão da EDP-SP.

As descargas que transportam mais energia são aquelas de polaridade positiva, e para os períodos citados fora observado redução destas de 12% do total de descargas para 3%. Assim, a elevação das ocorrências de descargas negativas, que transportam menos energia, pode ser realizada também por meio de mapas das regiões de concessão da EDP-SP. Na Figura 40 tem-se o mapa de polaridade negativa para o período 2006-2008 e na Figura 41 o mapa de polaridade negativa para 2014-2015.

Figura 40: Mapa de polaridade negativa para o período 2006-2008.

Figura 41: Mapa de polaridade negativa para o período 2014-2015.

A evolução das ocorrências de descargas atmosféricas na região da EDP-SP não mostra divergências em relação à média. Isto significa que se pode observar certa uniformidade na distribuição das polaridades das descargas em toda a região de concessão neste primeiro período.

Já para o período de 2014-2015, pode-se destacar de maneira bastante contundente o aumento da polaridade negativa na região de concessão da EDP-SP. No primeiro período poucas quadrículas podem ser apontadas com valores próximos do limite superior da escala, sendo que para o segundo período a maior parte das quadrículas encontram-se próximas do limite da escala, tal como exemplificado pela Figura 41.

Apesar da nítida redução de descargas com polaridade positiva, que transportam mais energia, o aumento da amplitude média das descargas de quase 1 kA também pode ser acompanhado pela elevação das polaridades negativas destas descargas na região de concessão da EDP-SP.

Tais informações envolvendo a evolução da amplitude média das descargas, bem como da polaridade, apontam que os dispositivos precisam ter especificações superiores aos que poderiam ser instalados no primeiro período considerado.

4.5.) MAPAS DE DENSIDADE

A densidade das descargas se modificou de maneira a ter seu número reduzido próximo de São José dos Campos, Caçapava e Taubaté. Em contraste, observa-se aumento da densidade de descargas próximo a Itaquaquecetuba, Suzano, Mogi das Cruzes e Biritiba. Estas informações podem também ser conferidas na Figura 42.

Figura 42: Mapa de variação da densidade de descargas atmosféricas para os dois períodos analisados.

4.6.) CRUZAMENTO DE INFORMAÇÕES PARA ESCOLHA DO ALIMENTADOR PILOTO

Com base no cruzamento de informações, apontou-se o SUZ-1306 como sendo o alimentador mais promissor para fins de estudo deste projeto, tendo-se em vista as características de ocorrências, bem como de descargas atmosféricas. É possível ainda contemplar das análises que, considerando-se as causas mais prováveis de ocorrências de Descargas Atmosféricas (011, 020, 880 e 890), no período 2014-2015, aproximadamente 30% do total de registros (986) referem-se a tais causas apontadas na base de dados para o SUZ-1306. Na Figura 43 tem-se o cruzamento de informações para o alimentador SUZ-1306 localizado na região de Suzano.

Figura 43: Cruzamento de informações para SUZ-1306.

É possível pontuar que inúmeras análises foram realizadas em todas as bases, desde pré-processamento até análises estatísticas, a fim de se consolidar uma metodologia de escolha de alimentador piloto para a posterior instalação dos dispositivos de monitoramento de descargas atmosféricas, bem como de para-raios. A escolha do alimentador SUZ-1306 como área piloto levou em consideração a geolocalização das quadriculas sobre descargas atmosféricas fornecidas pelo INPE e, também, o histórico de ocorrências registradas na base da EDP-SP, especialmente aquelas com maior correlação com descargas atmosféricas.

Por fim, ressalta-se a importância deste cruzamento de informações para a escolha da área piloto frente ao andamento da pesquisa, tendo em vista que as especificações dos dispositivos que foram adquiridos para monitoramento de descargas, assim como os para-raios que foram instalados para acompanhamento de falhas, irão ter subsídios técnico-científicos ajustados para a área de concessão da EDP-SP.

4.7.) ESCOLHA DAS ESTAÇÕES TRANSFORMADORAS CANDIDATAS PARA INSTALAÇÃO DOS CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Com base na configuração da rede de distribuição, nos equipamentos instalados na região escolhida e nos dados de concentração e de intensidade das descargas atmosféricas (em quiloAmperes) ocorridas nos anos de 2014 e 2015, foi possível estimar, em ordem de prioridade, os transformadores candidatos para instalação dos contadores de descargas atmosféricas, conforme indicado nas Figura 44 e Figura 45.

Figura 44: Trecho do alimentador SUZ-1306 sobreposto aos registros das intensidades e quantidades de descargas atmosféricas 2014 e 2015.

Figura 45: Trecho do alimentador SUZ-1306 contendo os transformadores de distribuição.

Os transformadores candidatos a integrarem a área piloto estão em destaque e são identificados na Tabela 6.

Tabela 6: Identificação dos transformadores candidatos à área piloto (SUZ-1306).

IDENTIFICAÇÃO	NÚMERO DO TRAFÓ
1	ET00002251
2	ET00005333
3	ET00004693
4	ET00005458
5	ET00000253
6	ET00001650
7	ET00540673
8	ET00005607
9	ET00002255
10	ET00003604
11	ET00002718
12	ET00008706
13	ET00002100
14	ET00504163
15	ET00000372
16	ET00008730
17	ET00504717
18	ET00005411
19	ET00536112
20	ET00004453

4.8.) CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para a definição dos contadores de descargas atmosféricas que serão utilizados na contagem das descargas efetuadas pelos para-raios de distribuição foram admitidas as seguintes hipóteses:

- O NBI médio das estruturas da rede de distribuição da EDP-SP é igual a 150 kV;
- A impedância de surto dos condutores da rede de distribuição é igual a 500 Ω ;
- A onda viajante devido ao surto induzido pela descarga atmosférica é igual nas três fases da rede trifásica de distribuição;
- A corrente máxima de surto induzido pela descarga atmosférica limitada pelo NBI é igual a 300 A.

Com base nessas premissas foram especificados três tipos de contadores de descargas atmosféricas com diferentes níveis de sensibilidade à passagem da corrente de surto com as seguintes características principais:

a) Adequação de Uso:

O Contador de Descargas deve ser adequado para uso com para-raios de óxido metálico em rede de distribuição da classe de tensão 15 kV. Estes instrumentos devem ser projetados para instalação ao tempo e no condutor de descida do aterramento dos para-raios.

b) Ponto de Instalação:

O Contador de Descargas deve ser projetado para instalação em postes de madeira ou de concreto duplo T ou de seção circular, no condutor de descida do aterramento dos para-raios.

c) Alimentação:

O Contador de Descargas deve ser autônomo na sua operação. Ou seja, não requer fonte auxiliar.

d) Invólucro:

Caixa em material resistente para instalação ao tempo, totalmente selada e a prova d'água, fabricada numa única peça com pintura em epóxi com alto grau de resistência à corrosão.

e) Princípio de Operação:

O caminho para a terra é completado através do contador de descargas, o qual é conectado em série no condutor de descida do aterramento. O contador de descargas deve ter um circuito que seja sensibilizado ao ser percorrido por corrente de surto atmosférico oriunda da operação dos para-raios. A cada surto atmosférico que provocou a atuação dos para-raios o contador deve registrar uma contagem que será somada às que ocorreram anteriormente. O fabricante deve indicar quais são as formas de onda que sensibilizam o contador.

f) Especificações Técnicas:

Os contadores devem obedecer às seguintes especificações definidas na Tabela 7.

Tabela 7: Especificações dos contadores de descargas atmosféricas

ITEM	DETALHAMENTO
Ciclômetro	6 dígitos 5 contagens/segundo
Corrente mínima de disparo do contador	Contador Tipo 01: ≤ 50 A (onda de 8/20 μ s)
	Contador Tipo 02: 100 A (onda de 8/20 μ s)
	Contador Tipo 03: 200 A (onda de 8/20 μ s)
Corrente máxima	100 kA (onda 4/10 μ s)
Tensão residual - 100 kA (onda 4/10 μ s)	5 kV de pico
Contato auxiliar	1 A - 250 V

g) Condições Normais de Serviço:

Os contadores abrangidos por esta especificação deverão ser usados em locais não abrigados, podendo ser expostos à chuva, ao sol e ao acúmulo de pó.

h) Instalação dos Contadores de Descargas Atmosféricas no Poste:

Os contadores de descargas atmosféricas serão instalados na estrutura do transformador conforme Figura 46 a seguir.

Figura 46: Exemplo de posicionamento dos contadores instalados em série no condutor de descida do aterramento.

Dependendo do espaço disponível na estrutura, os contadores podem ser instalados em oposição no poste ou ainda em espiral, de forma a permitir a acomodação dos três contadores em série no condutor de descida do aterramento.

Para a pesquisa foram utilizados 24 contadores de descargas atmosféricas com diferentes níveis de sensibilidade:

- 8 contadores com corrente mínima de disparo de 50 A;
- 8 contadores com corrente mínima de disparo de 100 A;
- 8 contadores com corrente mínima de disparo de 200 A.

4.9.) CRITÉRIOS PARA A DEFINIÇÃO DOS TRANSFORMADORES EM QUE SERÃO INSTALADOS OS CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As premissas utilizadas para a definição das estações transformadoras que receberão os contadores de descargas atmosféricas foram :

- Local de fácil acesso;
- Estrutura com o condutor de descida do aterramento que permita a medição da resistência de aterramento com a utilização do alicate terrômetro;
- Estrutura que possibilite a instalação de três contadores de descargas atmosféricas no condutor de descida do aterramento;
- Estrutura que possibilite a leitura dos contadores de descargas atmosféricas com facilidade;
- Local que permita a melhoria do aterramento, se necessário, com a instalação de hastes adicionais;
- Instalação que possua resistência de aterramento $\leq 100 \Omega$ conforme valor praticado na distribuidora e definido pelo corpo de engenharia desta empresa para postes que possuem equipamentos instalados. Este valor foi utilizado pelo equipe do projeto durante todo o seu desenvolvimento.

4.10.) PASSO A PASSO DAS ATIVIDADES PARA A ESCOLHA DOS TRANSFORMADORES

- **Equipe de eletricitas**

Os serviços de medição serão executados por equipe de trabalho em linha viva.

- **Medições na estrutura do transformador**

Após a verificação de conformidade das características da ET com os critérios indicados no item anterior, serão realizadas as medições de resistência de aterramento com o alicate terrômetro.

- **Medição da resistividade do solo**

Caso seja necessário, serão realizadas medições de resistividade do solo, no local, com o terrômetro de quatro terminais.

4.11.) ESCOLHA DAS ESTAÇÕES TRANSFORMADORAS DA ÁREA PILOTO

Para a escolha das estações transformadoras que integraram a área piloto foram efetuados levantamentos em campo nos dias 16 e 17/02/17 na região do alimentador SUZ-1306.

A primeira atividade foi uma reunião informativa em que os participantes tomaram conhecimento dos objetivos e das características dos pontos listados como candidatos a integrarem a área piloto, da utilização do medidor de resistência de aterramento tipo alicate, da importância do condutor neutro para o estudo, e das dimensões dos contadores de descargas atmosféricas para subsidiar a análise em campo da instalação dos mesmos nas estruturas.

Para a definição dos pontos a integrarem a área piloto foi utilizado o medidor de resistência de aterramento tipo alicate. Além disso, foi observada a continuidade do condutor neutro entre a ETD e a ET em estudo. Pois, se houver descontinuidade do neutro há a necessidade de sua reposição para possibilitar a medição da resistência de aterramento da ET sem necessidade de interrupção da rede.

a) ET 2251 – Na lista de candidatas número 01

Figura 47: ET candidata 2251.

No dia 16/02/17 foi constatado que no trajeto entre a ETD e esta ET haviam alguns trechos em que o condutor neutro foi furtado.

No entanto, em função da extensão da rede, havia a possibilidade de que a resistência equivalente do sistema do neutro contínuo e multiterrado à jusante do ponto da medição fosse de valor desprezível, possibilitando assim a leitura da resistência do aterramento local. A medição foi efetuada e a hipótese não foi confirmada resultando em valor da leitura maior que 1500 Ω (OVER RANGE).

Em função dessa constatação foi verificada a possibilidade de se efetuar a imediata reposição e interligação ao aterramento do condutor neutro nos trechos à montante do ponto de

medição. A equipe técnica da EDP-SP definiu que no início do dia 17/02/17 esta reposição ocorreria e, em seguida, as medições seriam refeitas nesta ET.

O resultado da medição no dia 17/02 após a reposição do neutro apresentou o valor de resistência de aterramento igual a 42 Ω .

b) ET 4693 – Na lista de candidatas número 03

Figura 48: ET candidata 4693.

No dia 16/02/17 foi constatado que no trajeto entre a ETD e esta ET havia alguns trechos em que o condutor neutro foi furtado.

Neste caso, também em função da extensão da rede, considerou-se a possibilidade de que a resistência equivalente do sistema do neutro contínuo e multiterrado à jusante e à montante do ponto da medição fosse de valor desprezível, possibilitando assim a leitura da resistência do aterramento local. A medição foi efetuada e a hipótese não foi confirmada resultando em valor da leitura maior que 1500 Ω (OVER RANGE).

Porém, no caso desta ET, por razões de logística, não foi possível efetivar de imediato a reposição do condutor neutro e respectivas interligações ao aterramento. Uma nova medição com o alicate terrômetro foi descartada neste momento.

Uma vez que a estrutura possui espaço suficiente para acomodar a instalação dos três contadores de descargas atmosféricas, pode ser uma alternativa, caso a resistência de aterramento apresente valores adequados.

c) ET 0253 – Na lista de candidatas número 05

Figura 49: ET candidata 0253.

No dia 16/02/17 foi constatado que no trajeto entre a ETD e esta ET não havia trechos com o condutor neutro furtado. A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a 58Ω .

d) ET 0253 – Na lista de candidatas número 05

Figura 50: ET candidata 0253.

No dia 16/02 foi constatado que no trajeto entre a ETD e esta ET não havia trecho com o condutor neutro furtado. A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a $1,2 \Omega$.

e) ET 1650 – Na lista de candidatas número 06

Figura 51: ET candidata 4693.

Foi constatada infestação por abelhas nesta ET, o que inviabilizou a sua imediata inclusão como integrante da área piloto, pois não havia como efetuar as medições do condutor sem riscos ao operador. Por este motivo a medição da resistência de aterramento nesta ET foi abandonada neste momento. Uma vez que a estrutura possui espaço suficiente para acomodar a instalação dos três contadores de descargas atmosféricas, pode ser uma alternativa, caso a resistência de aterramento apresente valores adequados.

f) ET 5458 – Na lista de candidatas número 04

Figura 52: ET candidata 4693.

A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a 1.500Ω . É um indicador de que pode haver algum componente do aterramento desconectado, inexistente ou furtado.

g) ET 5333 – Na lista de candidatas número 02

Figura 53: ET candidata 4693.

A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a 88,0 Ω .

h) ET 614 – Não incluída na lista de candidatas

Figura 54: ET candidata 4693.

A medição na mesma apresentou valor da leitura maior que 1500 Ω (OVER RANGE). É um indicador de que pode haver algum componente do aterramento desconectado, inexistente ou furtado, pois se trata de uma ET nova e situada em fim de linha.

i) ET 2718 – Na lista de candidatas número 11

Figura 55: ET candidata 4693.

A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a $30,1 \Omega$. Pode-se observar que nesta estrutura o espaço para a instalação dos contadores de descargas atmosféricas é exíguo, apesar de ser possível. Como existem alternativas já mencionadas anteriormente, há então a possibilidade de descartarmos esta estrutura.

j) ET 5413 – Não incluída na lista de candidatas

Figura 56: ET candidata 4693.

A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a $38,0 \Omega$.

k) ET 5412 – Não incluída na lista de candidatas

Figura 57: ET candidata 5412.

A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a 52,5 Ω .

l) ET 1665 – Não incluída na lista de candidatas

Figura 58: ET candidata 4693.

A medição na mesma apresentou valor de resistência de aterramento igual a 27,0 Ω . Esta ET necessita que os para-raios sejam instalados.

m) Resumo das investigações

Foram investigadas 12 estações transformadoras contidas na área piloto, localizadas nas imediações das áreas com maior densidade de descargas atmosféricas que ocorreram na região nos anos de 2014 e 2015.

A Figura 59 apresenta a localização de oito estações transformadoras onde foram instalados os contadores de descargas atmosféricas e os trechos de rede em que foi feita a reposição do condutor neutro e sua interligação ao aterramento da estrutura.

Figura 59: Localização das ET's investigadas e das ET's escolhidas.

4.12.) PROJETO PARA INSTALAÇÃO DOS PARA-RAIOS E CONTADORES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NA ÁREA PILOTO

5.9.1. Projeto para instalação de para-raios nas estruturas das ET's escolhidas

A instalação de para-raios novos deve seguir o projeto padronizado pela EDP. Nas ET's escolhidas serão instalados para-raios novos simultaneamente com os contadores de descargas atmosféricas.

5.9.2. Retirada de para-raios nas estruturas das ET's escolhidas

Os para-raios instalados nas estruturas escolhidas foram retirados para ensaios em laboratório para a verificação de conformidade com a especificação da EDP-SP, avaliação do desgaste do invólucro, das pastilhas de óxido metálico, do disparador, etc.

Para manter a integridade física dos para-raios retirados da rede, os serviços de retirada, acondicionamento, armazenamento e transporte devem seguir as orientações contidas no Apêndice B.

5.9.3. Projeto de instalação dos contadores de descargas atmosféricas

Por se tratar de um equipamento estranho à rede de distribuição, cuja instalação se restringe ao projeto tema dessa Dissertação “Avaliação do impacto de descargas atmosféricas em sistemas de distribuição a partir de medidas em campo” e considerando a reduzida quantidade de unidades que serão utilizadas em diferentes tipos de estruturas da rede de distribuição, as equipes técnicas do projeto decidiram que a instalação dos contadores nas estruturas das ET’s deve obedecer aos seguintes critérios. Conforme a Figura 60, demonstra-se um contador de descarga atmosférica utilizado no projeto:

- A localização dos três equipamentos em série nas estruturas das ET’s será realizada de forma a não comprometer as atividades de operação da rede de distribuição;
- A instalação dos equipamentos não pode reduzir o NBI da estrutura;
- As ET’s escolhidas serão identificadas para que, em caso de manutenção preventiva ou corretiva, as equipes de manutenção sejam instruídas de forma a que os contadores possam ser retirados e reinstalados sem danos;
- O condutor de descida do aterramento será seccionado em ponto conveniente para que os três contadores possam ser instalados em série entre si e com o próprio condutor de aterramento através dos terminais de linha e de terra;
- A conexão entre os contadores e entre contador e cabo de descida do aterramento deve ser efetuada com cabo de cobre flexível de diâmetro igual ao do existente;
- A sequência de instalação dos contadores deve obedecer à seguinte ordem:
 - Contador de 50 A, no ponto mais próximo do topo da estrutura;
 - Contador de 100 A, na posição intermediária;
 - Contador de 200 A, abaixo do contador de 100 A.

Figura 60: Equipamento contador de descarga atmosférica

As equipes técnicas da EDP-SP fizeram então uma montagem experimental, no centro de treinamento, dos contadores nos diferentes tipos de ET's para a definição dos materiais a serem utilizados, bem como a melhor disposição dos mesmos nas estruturas.

5.9.4. Coletas mensais das leituras dos contadores

As leituras coletadas pela equipe técnica do projeto mensalmente nos contadores instalados nas estações transformadoras do projeto conforme tabela 8 são fundamentais para a construção do modelo matemático de degradação dos para-raios. Os contadores foram instalados em série no condutor de descida do aterramento dos para-raios, sendo o primeiro o de 50 A, o segundo de 100 A e o terceiro de 200 A. Quando ocorre uma descarga atmosférica induzida de intensidade suficiente para o acionamento dos ciclômetro dos contadores, espera-se o sucesso de uma das seguintes combinações possíveis:

- Houve registro apenas no contador de 50 A : $50 \text{ A} \geq \text{IRAIO} < 100 \text{ A}$;
- Houve registro nos contadores de 50 A e 100 A : $50 \text{ A} \geq \text{IRAIO} < 200 \text{ A}$;
- Houve registro nos três contadores: $\text{IRAIO} > 200 \text{ A}$.

Tabela 8: Planilha de controle para as leituras coletadas mensalmente nas estações transformadoras do projeto.

DATA	REGISTRO DO CICLÔMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
07/06/17	008	005	006	17,0	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	008	005	006	-	-	-	-	Sandro Santos
16/08/17	008	005	006	18,7	0,258	0,230	0,204	Sandro Santos
12/09/17	008	005	006	19,0	0,415	1,010	0,576	Sandro Santos

Além destes dados coletados, demais informações relevantes foram apuradas mensalmente, tais como:

- Medição da corrente de fuga dos para-raios;
- Medição da resistência de aterramento;
- Verificação da integridade dos para-raios e disparador automático.

Com os registros fornecidos pelo INPE da localização e da intensidade das descargas atmosféricas ocorridas na área de concessão da EDP, realiza-se uma correlação dos registros de ocorrências na rede de distribuição, registros de descargas atmosféricas e de contagem dos ciclômetros dos contadores da área piloto.

4.13.) CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Apresentou-se aqui a sistemática adotada para obterem-se as estruturas de transformadores mais adequadas para a instalação dos contadores de descargas atmosféricas na área piloto, definida com base nos estudos e correlações das descargas atmosféricas detectadas pelo sistema CLIMA-GRID do INPE e das ocorrências na rede de distribuição da EDP-SP nos período de 2014 e 2015.

A reunião informativa realizada na Regional de Suzano, antes do início das atividades de campo, revelou-se muito importante e produtiva. Os participantes tiveram oportunidade de conhecer e tirar dúvidas referentes aos seguintes aspectos:

- Aos objetivos e resultados esperados da pesquisa base do tema desta dissertação;
- Às características dos pontos candidatos a integrarem a área piloto;
- À importância da existência do condutor neutro contínuo e multiterrado para a rede e para o estudo;
- À utilização do medidor de resistência de aterramento tipo alicate;
- Às dimensões dos contadores de descargas atmosféricas para subsidiar a análise em campo para o projeto de instalação dos mesmos nos diferentes tipos de estruturas existentes.

Para possibilitar a instalação dos contadores em área mais promissora e conforme já tinha sido acordado com a equipe técnica da EDP-SP, o condutor neutro deveria ser repostado no trecho da rede de distribuição compreendido entre ET-01 e ET-08. A figura 67 apresenta o trecho de rede sob consideração.

Figura 61: Localização do trecho de rede para a reposição do neutro onde o condutor foi furtado.

4.14.) ANÁLISES DE CORRELAÇÃO ENTRE DESCARGAS E OCORRÊNCIAS

O objetivo, nesta etapa da pesquisa, foi de realizar o relacionamento entre ocorrências na rede de distribuição e as descargas atmosféricas. Para tanto, considerou-se os dados referentes às descargas atmosféricas compreendidas entre os anos de 2014 e 2015, e dados de ocorrências correspondentes aos anos de 2014 a 2016. Assim, para efeito de análises, foram confeccionados os mapas de densidade de descargas atmosféricas e densidade de ocorrências conforme Figura 62 e 69, respectivamente.

Figura 62: Densidade de descargas atmosféricas.

Figure 63: Densidades de ocorrências.

A comparação gráfica entre ambos os mapas de densidade motiva o teste de hipótese acerca da existência de correlação significativa entre o número de ocorrências e a densidade de descargas atmosféricas. Procedendo com o cálculo do coeficiente de correlação linear (Pearson), verifica-se então que este é de 0.473. De uma maneira geral, um coeficiente dessa ordem permite classificar a correlação entre a densidade de ocorrências e a densidade de descargas atmosféricas como sendo Moderada.

4.15.) MAPAS DE ENERGIA

A fim de relacionar estas duas informações, confeccionou-se também um mapa de energia que permite analisar, graficamente e simultaneamente, a densidade de descargas atmosféricas e a densidade de ocorrências, estando este mapa registrado na Figura 64.

Figura 64: Mapa de energia “densidade de descargas” x “densidade de ocorrências”.

Em um sistema de distribuição, a degradação da vida útil dos equipamentos, redes e acessórios ocorre gradualmente e de forma proporcional aos esforços eletromagnéticos impostos ao sistema. Assim, o mérito de investigar a correlação entre a densidade de ocorrências e a energia relacionada às descargas atmosféricas existe. O cálculo do coeficiente de correlação linear (Pearson) resultou em 0.4926. Esse coeficiente é considerado Moderado. Adicionalmente, verificou-se a sensibilidade da rede em relação às descargas atmosféricas, tal como representada na Figura 65.

Figura 65: Mapa de sensibilidade.

4.16.) RELACIONAMENTO ENTRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E REDE PRIMÁRIA

As correlações encontradas para a densidade e para a energia motivaram a investigação de outras grandezas. Dentre as grandezas a serem avaliadas está a densidade de rede primária, ou seja, espera-se que quanto mais densa for a rede maior será então o número de ocorrências. Assim, é possível fazer uma análise de sensibilidade relacionando as ocorrências e a densidade de rede primária, a qual está registrada na Figura 66.

Figura 66: Densidade de rede primária.

Com base no que fora apresentado, torna-se então possível a confecção de um mapa que relaciona as descargas e a rede primária, tal como registrado na Figura 67.

Figura 67: Mapa de sensibilidade de descargas atmosféricas.

O relacionamento entre as grandezas analisadas fornece um panorama de curto para médio prazo acerca da sensibilidade da rede de distribuição frente às descargas atmosféricas. Contudo, os esforços eletromagnéticos que a rede, seus equipamentos e acessórios são submetidos não se resumem às descargas atmosféricas. Para uma avaliação mais precisa, e considerando-se as informações disponíveis, seria também necessário considerar os seguintes aspectos: Curva de demanda, sobrecorrentes decorrentes de partidas de motores, magnetização de transformadores e inserção de bancos de capacitores, curtos circuitos, descargas atmosféricas e características de projeto do elemento sob análise.

Capítulo 5. Conclusão

5.1.) CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todas as informações disponibilizadas nesta dissertação integram um projeto desenvolvido em conjunto com a EDP-SP com o objetivo de desenvolver uma metodologia fundamentada em análises de simulações computacionais, em resultados de experimentos em laboratório e em campo, que estabeleceu critérios de substituição preventiva de para-raios, a fim de assegurar a sua eficácia na proteção de redes de distribuição e equipamentos. Para tanto, a metodologia foi fundamentada na relação entre a quantidade de descargas e a intensidade das correntes de descargas atmosféricas a que são submetidos os para-raios da rede de distribuição.

Complementar a leitura e visando o entendimento total desta dissertação (e do projeto), recomenda-se a leitura das seguintes dissertações de mestrado já defendidas:

- Batista, Gabriel Henrique de Aguiar; Modelagem de Pára-Raios Baseada em Ensaaios Elétricos. São Carlos, 2019;

- Exedito Viana, Fabricio; Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas. São Carlos, 2019.

O produto final destes projetos foi a construção de um sistema de apoio à decisão que informa, com base no modelo de degradação dos para-raios, modelo esse produto alcançado no âmbito desse projeto, qual o tempo de vida remanescente para aqueles já instalados na rede de distribuição. Esse sistema fora estruturado na forma de uma plataforma computacional, denominada “EDP SIGPR – Sistema Inteligente de Apoio a Decisão Para Substituição Preventiva de Para-raios no Sistema de Distribuição da EDP”.

Assim, a substituição destes dispositivos poderá ser feita de modo preventivo, evitando-se interrupções, queima de equipamentos da rede e de consumidores, e de custos operacionais decorrentes. Dessa maneira, tem-se que os resultados possíveis de serem alcançados são orientados a uma melhoria dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica, bem como, a um melhor planejamento das atividades de manutenção preventiva no que tange à substituição de para-raios degradados.

Do ponto de vista da inovação, sob a ótica da técnica encontra-se na criação de uma plataforma computacional para gestão do ciclo de vida de para-raios do sistema de distribuição. A gestão desse elemento do sistema de distribuição leva em consideração as descargas atmosféricas e o modelo de degradação de para-raios, o qual fora desenvolvido no contexto desse projeto. Tendo como base as descargas atmosféricas, alimentando-se o modelo de cálculo de tensões induzidas

em sistemas elétricos radiais, o qual fora desenvolvido em Projetos de P&D anteriores, juntamente com o modelo de degradação de para-raios em sistema de distribuição, realiza-se então a estimativa da degradação da vida útil dos para-raios. Assim, tem-se a estimativa de ciclo de vida dos para-raios para toda a rede de distribuição, a qual considera o histórico de descargas atmosféricas, a topologia do sistema de distribuição e o modelo de degradação dos para-raios. Portanto, passa-se a ter um critério técnico que aponta o momento a partir do qual um determinado conjunto de para-raios deve ser substituído por outro em início de ciclo de vida. De maneira sumarizada, a substituição de para-raios deixa de estar em ações de manutenção corretiva para constar no plano de manutenções preventivas do sistema de distribuição.

Outro aspecto inovador é a gestão de estoque de para-raios. Uma vez que se tem um método para quantificar a degradação desses elementos do sistema de distribuição é viável de se pensar na simulação de cenários de ocorrências de descargas atmosféricas. Frente ao resultado dessas simulações é possível identificar quantos serão e quais serão os conjuntos de para-raios a serem substituídos nos períodos compreendidos nas simulações de cenários. Dessa forma, a elaboração de previsões orçamentárias para manutenção do sistema de distribuição passa-se a fundamentar em estimativas de cenários futuros e não mais em histórico prévio. Ainda, torna-se possível elaborar um planejamento plurianual de substituição de conjuntos de para-raios, o qual reflete de forma positiva nos aspectos de governança corporativa.

O âmbito de aplicação do produto principal desse projeto pode se dar em diferentes níveis. O primeiro deles encontra-se no planejamento de intervenções planejadas nos sistemas de distribuição com o objetivo de substituir para-raios próximo ao término de sua vida útil. Outro âmbito de aplicação reside na possibilidade de se ter significativo salto de qualidade no desempenho quanto à proteção de equipamentos e na redução das interrupções do serviço, com reflexos diretos na redução dos custos de operação e manutenção das redes. O sistema desenvolvido é aplicável diretamente às empresas de energia do grupo EDP-SP e, posteriormente, pode ser estendido ao setor elétrico nacional e internacional.

O destaque a seguir pode ser entendido como um ponto de atenção do projeto e ao mesmo tempo, uma oportunidade para a continuidade do projeto. Quando correlacionadas às informações das ocorrências na rede de distribuição, das descargas atmosféricas recebidas em uma determinada região e dos registros dos contadores de descargas atmosféricas tendo como referência um dispositivo de proteção (base fusível – BF 174) localizada no município de Suzano (SP), com registro de interrupção fornecido pela EDP-SP no dia 21/01/2018, a causa do desligamento foi definida como descarga atmosférica. No entanto, de acordo com os dados fornecidos pelo INPE, não há registros de descargas atmosféricas nas proximidades desta base fusível em data e horário

coincidentes com o atendimento emergencial feita pela EDP–SP para fins de restabelecimento do circuito. Portanto, da análise dos dados, não há como estabelecer nexos causal entre a interrupção e a referida causa de descarga atmosférica.

No desenvolvimento do projeto, alguns fatores externos, porém, inerentes ao sistema elétrico contribuíram para pequenos atrasos, mas que se mostraram oportunidades e enriqueceram este trabalho. Eventos como furtos de condutores e valores ôhmicos elevados nas estruturas dos transformadores surgiram no decorrer das ações e em relação ao aterramento dos equipamentos, percebendo-se que este não é um assunto prioritário das distribuidoras. Valores ôhmicos medidos nos equipamentos muito superiores aos sugeridos pelas literaturas para estações transformadoras e seus equipamentos de proteção, em especial o para-raios, tornam este equipamento um “adorno” na estrutura, pois não está cumprindo o seu papel de proteção.

5.2.) PROPOSTA DE CONTINUIDADE

Em continuidade a este trabalho e de posse de todas as informações produzidas, utilizando-se algoritmos, redes neurais e inteligência artificial, entre outros, há a possibilidade de criação de um sistema especialista para a classificação automática das ocorrências de desligamento da rede através de medidas de campo obtidas em religadores eletrônicos, sistemas supervisores SCADA, mapas de assinatura energética, etc. Atualmente, a classificação do que causou o desligamento de um dispositivo de proteção é definida por uma pessoa.

Além desse tipo de classificação que está sujeita a erros, os tipos de ocorrência “880” (Causas Não Classificadas) e “890” (Causas Não Determinadas), impedem uma atuação preventiva certa, seja por manutenção ou obras de melhoria da rede elétrica.

Capítulo 6. Referências Bibliográficas

- [1] SANTOS, E.A.D.B. Sistemas para detecção e localização de descargas atmosféricas e perdas de cabos para-raios por furto em linhas de transmissão de energia elétrica, 2013. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- [2] ARAUJO, M.A. Estudo de metodologia para modelagem e simulação de tensões induzidas de Origem atmosféricas em linhas de Distribuição protegidas por para-raios de ZnO. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, area de concentração em Sistemas Dinâmicos, 2013.
- [3] ANDERSON, J. G. Lightning Performance of Transmission Lines. Electric Power Research Institute, Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, 2 Ed., Chapter 12, California, United States of America, 1982.
- [4] BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H. Parameters of lightning flashes. Electra, nº 41, pp. 23-37, July, 1975.
- [5] BRAGA, J. L. P. V. Desempenho de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas: estudo e implementação do Guia IEEE Std 1410. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- [6] HEIDLER, F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP. Berechnung, Proceedings of 18th ICLP, Munique, 1995, pp.63-66.
- [7] CAMEROTA, William R.; ELISMÉ, Jean O.; UMAN, Martin A. Current Waveforms for Lightning Simulation. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 54, no. 4, 2012.
- [8] CIGRÉ, Working Group 33.01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination). Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. CIGRÉ Brochure 63, Paris, October, 1991.
- [9] ELAT, página inicial do site do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>, acessado em 09/07/2012.
- [10] IEEE, Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. IEEE Std 1410, 2004.
- [11] KINDERMANN, G. Descargas Atmosféricas. 1ª Ed, Sagra-DC Luzzatto Editores, Porto Alegre, RS, 1992.
- [12] NACCARATO, K. P.; ALBRECHT, R. I.; PINTO Jr, O. Cloud-to-ground lightning density over Brazil based on high-resolution lightning imaging sensor (LIS) data. XIV International Conference on Atmospheric Electricity - ICAE, Rio de Janeiro, Brazil, 2011.
- [13] NBR 5419: Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2005.
- [14] NOBLAT, B. M. Lightning and HV electrical installations. Cahier Technique Merlin Gerin nº 168, 1994.

- [15] PINTO Jr, O. Lightning in the Tropics: From a Source of Fire to a Monitoring System of Climatic Changes. Nova Science Publishers, New York, 2009.
- [16] SALARI, J. C. F. Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência. Dissertação de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [17] SARAN, M. A. M. Sobretensões de Origem Atmosférica em Linhas de Media Tensão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Fevereiro, 2009.
- [18] SILVEIRA, F. H. Modelagem para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica. Dissertação de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- [19] SOARES Jr, A. Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1996.
- [20] UMAN, M. A. Lightning. Ed. McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [21] VISACRO, S.; SOARES Jr., A. HEM: A Model for Simulation of Lightning Related Engineering Problems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, nº 2, 2005.
- [22] WAGNER, C. F.; MCCANN, G. D.; CLAYTON, J. M. Lightning Phenomena. Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, chapter 18, Fourth Edition, Pennsylvania, United States of America, 1950.
- [23] ZANETTA Jr, L. C. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Editora EDUSP, 2003.
- [24] ABB. High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide. Edition 9.1, English, February, 2012.
- [25] ALVES, L. C. Modelagem de Para-raios de ZnO para o Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas em Redes de Distribuição. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, Agosto, 2010.
- [26] BUENO, H.; MINETA, C. T. N.; MONTEIRO, A. J.; ALVES, J. M.; MENDONÇA, P. H.; BACHEGA, R. J.; MARTINEZ, M. L. B. Lightning Performance Improved Method Applied to AES – Eletropaulo Utility 13,8 kV Medium Voltage Distribution. Power Tech, IEEE Russian, 27-30 June, 2005.
- [27] CEPEL - ELETROBRAS, Curso sobre Para-raios de distribuição, Estação e Linhas de Transmissão. 53 p., 1977.
- [28] COLOMBO, E.; DE NIGRIS, M.; SIRONI, A. Failure Mode Tests for Distribution Type Metal-Oxide Surge Arresters with Polymeric Housing. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, nº 1, January, 1996.
- [29] D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; KASTRUP FILHO, O.; MORAIS, S. A. Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestação de alta tensão. Rio de Janeiro, Furnas, Universidade Federal Fluminense, 1985.
- [30] DE NIGRIS, M.; SIRONI, A.; BONFANTI, I.; GIORNELLI, F.; VALAGUSSA, C.; SHING, L. K.; Most Recent Developments in Surge Arresters Technology and Testing.

- POWERCON 98, International Conference on Power System Technology, Beijing, China, pp. 194-201, August, 1998.
- [31] DURBAK, D. W. Surge arrester modeling. Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, USA, Vol. 2, pp. 728-730, 2001.
 - [32] EPRI. Transmission Line Lightning and Grounding Reference Book. Gray Book, Electric Power Research Institute (EPRI), Power Delivery & Utilization, December, 2011.
 - [33] FERNANDEZ, F.; DIAZ, R. Metal oxide surge arrester model for fast transient simulations. International Conference on Power System Transients, Paper 144, IPST 01, June, 2001.
 - [34] FRANCO, J. L. Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de ZnO na Região de Baixas Tensões Aplicadas. Dissertação de Mestrado, Área de Processamento de Energia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Junho, 1993.
 - [35] FRANCO, J. L. Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão. Franco Engenharia, São Paulo, p. 174, 2001.
 - [36] FRANCO, J. L. Treinamento técnico: Aplicação de para-raios em subestações. ELETROSUL, Florianópolis, SC, Brasil, Outubro, 2008.
 - [37] FURTADO, J. G. M. Correlações entre Fenômenos de Grãos e de Contorno de Grãos e o Desempenho de Cerâmicas Varistoras. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Março, 2005.
 - [38] HINRICHSEN, V. Metal-oxide Surge Arrester, Fundamentals. 1 st Edition, Siemens AG, Berlin, Germany, 2001.
 - [39] IEEE, Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, nº 1, pp. 302-309, January, 1992.
 - [40] IEEE, Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Line. Transmission and Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society, IEEE Std 1410, 1997.
 - [41] IEEE, Working Group on the Lightning Performance of Distribution Lines. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines. IEEE Std 1410, 2004.
 - [42] IEEE, Power & Energy Society. IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating Current-Systems. Surge Protective Devices Committee, IEEE Standards Board, American National Standards Institute, New York, 2009.
 - [43] KIM, I.; FUNABASHI, T.; SASAKI, H.; HAGIWARA, T.; KOBAYASHI, M. Study of ZnO arrester model for steep Front Wave. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, nº 2, pp. 834-841, April, 1996.
 - [44] LAHTI, K.; KANNUS, K.; NOUSIAINEN, K. The Durability and Performance of polymer Housed Metal Oxide Surge Arrester. 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, June, 2001.
 - [45] LAT, M. V.; KORTSCHINSKI, J. Application Guide for Surge Arrester and Field Research of Lightning Effects on Distribution Systems. Ontario Hydro Research Division, Canadian Electrical Association, International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, 1989.

- [46] MAMEDE, J. F. Manual de Equipamentos Elétricos. Ed. Livros Técnicos e Científicos, Vol.1, 3ª edição, Rio de Janeiro, 2005.
- [47] MATSUOKA, M. Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 10, nº 6, pp. 736-746, 1971.
- [48] MATSUOKA, M. Progress in Research and Development of Zinc Oxide Varistors. Advances in Ceramics, Vol. 7, pp. 290-308, 1981.
- [49] MEISTER, A. Modelagem de Varistores de Óxido de Zinco para Estudos de Coordenação de Isolamento. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2005.
- [50] MELCHIOR, R. D. Fault testing of gapless zinc oxide transmission line arresters under simulated field conditions. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, nº 2, 2003.
- [51] MODRUSAN, M. Tests on High-Voltage Metal Oxide Surge Arresters with Impulse Currents. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, 1983.
- [52] MUNUKUTLA, K.; VITTAL, V.; HEYDT, G. T.; CHIPMAN, D.; KEEL, B. Practical Evaluation of Surge Arrester Placement for Transmission Line Lightning Protection. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 25, nº 3, July, 2010.
- [54] OLIVEIRA, M. J. Avaliação do efeito geográfico-termal na capacidade de absorção de energia em para-raios de ZnO. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- [55] PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, nº 2, 1999.
- [56] RINGLER, K. G.; KIRBY, P.; ERVEN, C. C.; LAT, M. V.; MALKIEWICZ, T. A. The Energy Absorption Capability and Time to Failure of Varistors Used in Station Class Metal Oxide Surge Arresters. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, nº 1, 1997.
- [57] SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. IEEE Power Engineering Review, Vol. 11, nº 8, p. 11-13, August, 1991.
- [58] SANTOS, P. H. M. Análise de desempenho frente a impulsos atmosféricos induzidos em circuitos de media tensão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- [59] SARAN, M. A. M. Sobreensões de Origem Atmosférica em Linhas de Media Tensão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Fevereiro, 2009.
- [60] SCHEI, A.; FRANCO, J. L. Experiência no Monitoramento de Para-raios de Óxido Metálico em Serviço. Anais do VIII ERLAC, Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ, Ciudad del Este, Paraguay, 1999.
- [61] THANASAKSIRI T. Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution Line. TENCON 2004, IEEE Region 10 Conference, Vol. 3, p. 369-372, 2004.
- [62] TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NICHIDA, S. Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic V-I characteristics. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, nº 6, November/December, 1979.
- [63] ZANETTA Jr, L. C. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Editora EDUSP, 2003.

- [64] RAKHOLIYA,V.R.; REDDY, H.R.S. Analysis of MOV Surge Arrester Models by using Alternative Transient Program ATP / EMTP, 2016.
- [65] VELEBA,V.J.; REDDY. Modelling of Metal Oxide Surge Arresters in Simulation Software DYNAST, 2017.
- [66] PENGFEI MENG ; SHUAI WAN ; JINLIANG HE ; XIAOLEI ZHAO ; HENG XU ; XIAO YANG ; JUN HU. High voltage gradient zinc oxide varistors for line surge arresters and GIS tank-type arresters,2019
- [67] IEEE PC62.11/D8.0 Draft Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV), 2019.
- [68] MOHAMMAD E. M. RIZK ; MATTI LEHTONEN ; YOSHIHIRO BABA ; ABDELHADY GHANEM. Protection Against Lightning-Induced Voltages: Transient Model for Points of Discontinuity on Multiconductor Overhead Line.2019
- [69] CHRISTOS A. CHRISTODOULOU ; VASILIKI VITA ; THEODOROS I. MARIS On the optimal placement of surge arresters for the efficient protection of medium voltage distribution networks against atmospheric overvoltages,2019
- [70] BATISTA, GABRIEL HENRIQUE DE AGUIAR; Modelagem de Pára-Raios Baseada em Ensaio Elétrico. São Carlos, 2019;
- [71] EXPEDITO VIANA, FABRICIO; Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas. São Carlos, 2019.

Apêndice A – Medição da Resistividade do Solo e Utilização do Alicate Terrômetro na Área Piloto

A.1. FINALIDADE

Este documento apresenta as seguintes orientações técnicas:

- ✓ Medição da resistividade do solo com terrômetro de quatro terminais;
- ✓ Medida da resistência de aterramento com o alicate terrômetro.

A.2. MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

A.2.1. A RESISTIVIDADE DO SOLO

Pode-se definir a resistividade elétrica do solo ρ como sendo a resistência elétrica R medida entre as faces opostas de um cubo de um metro de aresta preenchido com este solo, conforme a Figura 68.

Figura 68: Medição da resistividade do solo em laboratório.

A medição por amostragem do solo é feita em laboratório ensaiando-se uma amostra de solo coletado no local cuja resistividade deseja-se conhecer.

Para a determinação da resistividade de um tipo de solo em estudo para fins de aterramento elétrico, pode-se verificar a dificuldade encontrada para se conseguir uma amostra representativa do solo, com a composição e compactação idêntica, umidade, etc.

A.2.2. A MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO EM CAMPO

É possível identificar as características de um solo em termos de sua resistividade, através de medição no local, com a injeção de determinados sinais eletromagnéticos no solo através de eletrodos adequadamente posicionados e pela detecção simultânea dos potenciais que aparecem nos eletrodos devido à injeção do sinal eletromagnético.

Se a terra fosse um corpo de dimensões bem definidas, a medição da sua resistividade no local desejado poderia ser realizada com a injeção de corrente de valor conhecido e detectando-se a queda de tensão resistiva causada pelo solo.

Estabelecendo-se a relação entre a tensão e a corrente poder-se-ia obter a resistência R do solo. Conhecendo-se a resistência do solo e as suas dimensões lineares pode-se obter o valor da sua resistividade pela equação $\rho = R \times A \times L$ para uma configuração cilíndrica, onde:

ρ = resistividade do solo em $\Omega.m$;
 R = resistência em Ω ;
 A = área da seção reta em m^2 ;
 L = comprimento em m.

Porém, a terra é um corpo tridimensional que não apresenta dimensões definidas para o percurso da corrente.

A despeito dessas dificuldades, Frank Wenner desenvolveu um método simples de medição, no qual ele demonstra que a resistividade do solo ρ tem uma relação proporcional com o valor da resistência R medida no solo, através de uma constante geométrica determinada a partir da configuração de eletrodos de medição utilizada na implantação do método.

A.2.3. O MÉTODO DE FRANK WENNER

O método consiste na utilização de 4 hastes cilíndricas que devem ser cravadas no solo igualmente espaçadas e dispostas em linha. O diâmetro das hastes não deve exceder a um décimo do espaçamento e a profundidade atingida pelas hastes deve ser a mesma.

Figura 69: Disposição das hastes de prova para a medição da resistividade do solo.

Pelo terminal 1 injeta-se corrente no solo e o circuito será fechado com a fonte da corrente através do terminal 4. A queda de tensão é detectada pelos terminais internos 2 e 3.

Estabelecendo-se a relação entre a diferença de potencial detectada pelos terminais 2 e 3 e a intensidade da corrente injetada, obtém-se um valor da resistência entre os eletrodos 2 e 3.

Para a utilização deste método deve-se empregar o aparelho terrômetro com quatro terminais, sendo dois de corrente e dois de tensão. Os eletrodos devem ser cravados firmemente no solo, a uma mesma profundidade p de 30 cm igualmente espaçados entre si e posicionados simetricamente em relação ao aparelho de medição. Desse modo, o aparelho indicará um valor de resistência R em ohms, como apresentado na Figura 70 a seguir.

Figura 70: Esquema de ligação do terrômetro para medição da resistividade do solo.

O valor da resistência medido é aplicado nas equações a seguir resultando no valor de resistividade no ponto central da medição a uma profundidade igual ao espaçamento a entre os eletrodos.

Se $p \gg a$ o denominador se aproxima da unidade resultando em:

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{(a^2 + 4p^2)^{1/2}} - \frac{a}{(a^2 + p^2)^{1/2}}} \Omega.m$$

$$\rho = 4 \pi a R \Omega.m \quad (1)$$

Se $p \ll a$ o denominador tende a 2 resultando em:

$$\rho = 2 \pi a R \Omega.m \quad (2)$$

Adotando-se a profundidade p de 30 cm, para fins de estratificação do solo, a equação 2 pode ser usada para as medições com $a > 4$ metros.

Para espaçamentos iguais a quatro metros ou menores, procurando manter a profundidade de cravação das hastes igual a 30 cm, será obtida melhor precisão nos cálculos da estratificação do solo com a utilização da equação proposta em Earth Resistivity Measurements Using Cylindrical Electrodes at Short Spacings - R. Baishiki, C. Osterberg e F. Dawalibi – IEEE Transactions on Power Delivery, jan/ 87, transcrita a seguir:

$$\rho = \frac{4 \pi p R}{\frac{2 \ln \left[\frac{2 + (4 + a/p^2)^{1/2}}{1 + (1 + a/p^2)^{1/2}} \right] + 2 (1 + a/p^2)^{1/2} - (4 + a/p^2)^{1/2} - a/p}{1 + (1 + a/p^2)^{1/2}}} \Omega.m$$

Em sua formulação Wenner considera o solo homogêneo. Assim o produto entre o valor R medido pela aplicação do método e o fator geométrico k corresponde à resistividade do solo. O fator geométrico varia com o espaçamento, mas o produto deve permanecer constante e igual ao valor da resistividade do solo.

$$K = \frac{4 \pi a}{1 + \frac{2a}{(a^2 + 4p^2)^{1/2}} - \frac{a}{(a^2 + p^2)^{1/2}}}$$

Entretanto, o solo pode ser estratificado e, assim o valor do produto deve mudar também ao mudar-se o espaçamento. Logo, os dados obtidos a partir da aplicação do método não fornecem efetivamente o perfil do solo, mas são utilizados para alcançá-lo através de cálculos de estratificação.

Quanto maior o espaçamento, mais profundo é o caminho da corrente no solo e, maior é a influência da resistividade do solo das camadas mais profundas, nos resultados das medições.

Figura 71: Circulação da corrente em várias camadas do solo.

Portanto na elaboração de um projeto de aterramento há necessidade de se conhecer o valor de resistividade do solo em diversas profundidades, o que se consegue variando-se o valor da distância a entre os eletrodos. Os valores comumente utilizados para a medição da resistividade do solo para fins de projetos de sistemas de aterramento da rede de distribuição são: $a = 1\text{m}$; $a = 2\text{m}$; $a = 4\text{m}$; $a = 8\text{m}$; $a = 16\text{m}$ e $a = 32\text{m}$.

Normalmente, a medida de resistividade obtida com espaçamento de um metro dá uma boa informação sobre a resistividade superficial do solo no local pesquisado.

A.2.4. INTERPRETAÇÕES DAS CURVAS DE RESISTIVIDADE DO SOLO

Os valores das resistividades do solo obtidas de acordo com os espaçamentos citados e plotados em um gráfico de eixos $\rho \times a$ indicam a existência das várias camadas do subsolo do local e nos dão muitas informações sobre o perfil da resistividade em função da profundidade.

As curvas $\rho \times a$, a seguir, correspondem aos resultados de medições de resistividade do solo com diferentes tipos de estratificação e podem ser interpretadas.

A.2.4.1. Solo homogêneo

Difícilmente encontrado na prática.

A.2.4.2. Solo estratificado em duas camadas

A curva ascendente indica que a resistividade aumenta com a profundidade ($\rho_2 > \rho_1$).

A menor resistividade da primeira camada informa que os aterramentos em profundidade não são recomendados.

A.2.4.3. Solo estratificado em duas camadas

A curva descendente indica que a resistividade diminui rapidamente com a profundidade ($\rho_1 > \rho_2$).

A maior resistividade da primeira camada informa que os aterramentos em profundidade são os mais recomendados.

(c)

A.2.4.4. Solo estratificado em três camadas

A curva indica que a resistividade da camada intermediária é de maior resistividade ($\rho_1 > \rho_2$ e $\rho_1 > \rho_3$), e que o solo deve ter três ou mais camadas. O cálculo da estratificação do solo indicará a profundidade recomendada para a construção do aterramento.

(d)

A.2.4.5. Solo estratificado em três camadas

A curva indica que a resistividade da camada intermediária é de resistividade menor ($\rho_2 < \rho_1$ e $\rho_2 < \rho_3$), e que o solo deve ter três ou mais camadas.

A estratificação do solo indicará a profundidade recomendada para a construção do aterramento.

(e)

A.2.4.6. Medições errôneas

Mudanças bruscas nas curvas bem como nenhuma alteração em pelo menos três valores de “a” consecutivos, indicam a existência de interferências nas medições que podem ser causadas por: condutores enterrados no solo, sistemas de aterramento, cercas aterradas, torres de transmissão ou de comunicação, tubulações metálicas de água, gás, etc.

A.2.5. DIRETRIZES PARA A MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO (PASSO A PASSO)

As diretrizes a serem observadas para a execução das medições de resistividade do solo são:

- A.2.5.1. Verificação da calibração do aparelho. Para qualquer modelo de aparelho conecte em curto circuito os 4 terminais bornes **C₁**, **C₂**, **P₁** e **P₂**, conforme apresentado na Figura 72. Para o teste deve se acionar a escala que se deseja verificar. O resultado da resistência medida deve ser zero. Caso o aparelho forneça uma leitura diferente de ZERO o aparelho precisa ser calibrado.

Figura 72: Verificação da calibração do aparelho de medição

A.2.5.2. Pode-se também verificar a calibração com resistências, classe de precisão 1%, de valor conhecido conforme apresentado na Figura 73.

Figura 73: Verificação da calibração do aparelho de medição com inserção de resistor.

Exemplos:

Para o final de escala de $20\Omega \rightarrow R = 15\Omega$

Para o final de escala de $200\Omega \rightarrow R = 150\Omega$

Para o final de escala de $2000\Omega \rightarrow R = 1000\Omega$

Para o final de escala de $20k\Omega \rightarrow R = 10k\Omega$

A.2.5.3. As medições de resistividade devem ser efetuadas preferencialmente quando o solo se apresenta seco. Medições com o solo úmido podem gerar resultados falsos;

A.2.5.4. Os eletrodos devem estar isentos de óxidos e gorduras para possibilitar bom contato com o solo;

A.2.5.5. Os operadores do aparelho devem utilizar calçados e luvas de isolamento para efetuar as medições;

A.2.5.6. Devem ser evitadas as medições de resistividade do solo sob condições atmosféricas adversas, tendo em vista a possibilidade de ocorrência de descargas atmosféricas;

A.2.5.7. Não se deve tocar os eletrodos durante as medições e evitar que pessoas estranhas e animais se aproximem dos mesmos;

A.2.5.8. O local escolhido para a realização das medições deve preferencialmente ser exatamente onde se deseja executar o sistema de aterramento;

A.2.5.9. O local escolhido para a realização das medições deve também estar sempre distante pelo menos 12 metros de áreas sujeitas a interferência tais como:

- ✓ Torres metálicas de linhas de transmissão e respectivos contrapesos;
- ✓ Pontos de aterramentos de neutro multiaterrado;
- ✓ Torres de telecomunicações;
- ✓ Solos com condutores ou canalizações metálicas;
- ✓ Cercas aterradas;
- ✓ Outras construções que possam interferir nas medições.

A.2.5.10. A escolha do local de medição deve ser feita de modo a evitar os acostamentos de estradas, leitos de estradas rurais, pois são locais terraplenados e assentados.

A.2.5.11. As hastes de prova (eletrodos de tensão e de corrente) devem ser firmemente cravadas assegurando-se que a superfície condutora esteja com um bom contato com o solo em toda a sua extensão;

A.2.5.12. É importante denotar a influência das hastes no resultado da medição. Cada haste apresenta uma resistência própria de aterramento, cujo valor pode ser calculado pela equação da resistência

de uma haste vertical $R = \rho / (2\pi L) + \ln 4L/d$, onde ρ é a resistividade superficial do solo, L é o comprimento cravado da haste de prova e d é o diâmetro da haste de prova. Considerando-se uma haste de 5/8" e comprimento cravado de 0,3 m, típicos de hastes de medição, encontramos o resultado de $R = 1,76 \rho$. Isto significa que em solos de alta resistividade, a soma da resistência de aterramento das duas hastes de corrente C1 e C2 indicados na figura 3, que estão em série com a fonte do aparelho de medição, pode limitar o valor da corrente no solo e ocasionar a indicação de resultados falsos. As possíveis soluções para estes casos são o emprego de fontes de tensão de valor mais elevado, o umedecimento do solo em torno destas hastes, aumento do diâmetro das hastes de prova, ou ainda a utilização de métodos alternativos de medição.

- A.2.5.13. Os cuidados não são tão críticos com relação às hastes de potencial P1 e P2, pois estas não são percorridas pela corrente principal do circuito. Devido às altas impedâncias do circuito de medição de tensão, a corrente que circula por ele é muito reduzida e a queda de tensão no aterramento de cada haste é desprezível em relação àquela que ocorre no circuito de medição. Isto determina que as quedas de tensão nas duas hastes internas do circuito de medição não influenciam na tensão detectada por elas. A resistência interna dos medidores normalmente tem valor igual a 1 k Ω .

A.2.6. PASSO A PASSO PARA A MEDIÇÃO

- A.2.6.1. Instalar o aparelho de medição preferencialmente na posição onde estará o centro do sistema de aterramento que se deseja construir;
- A.2.6.2. Esticar os cabos que ligam o aparelho às hastes de prova de corrente e de tensão, de tal forma que os cabos fiquem alinhados na direção escolhida para a medição;
- A.2.6.3. Conectar as extremidades dos cabos ao aparelho nos bornes C1, P1 e C2, P2 conforme apresentado na Figura 74;

Figura 74: Conexões do terrômetro para medição da resistividade do solo.

- A.2.6.4. Cravar as hastes de prova em alinhamento a uma profundidade de 30 cm nas distâncias recomendadas entre hastes de $a = 1$ m; 2 m; 4 m; 8 m; 16 m e 32 m;
- A.2.6.5. Conectar as extremidades dos cabos nas respectivas hastes de prova;
- A.2.6.6. Executar a medição para cada uma das distâncias entre hastes recomendadas, retirando e cravando as hastes nas posições indicadas. O aparelho deve permanecer sempre no mesmo lugar escolhido como centro da medição;

A.2.6.7. Anotar os valores obtidos em uma tabela para utilização na montagem do gráfico $\rho \times a$ e na estratificação do solo.

Tabela 9: Dados da medição e determinação da resistividade aparente do solo

Distância entre hastes – a (m)	$2 \pi a$	Resistência medida (Ω)	$\rho = R 2 \pi a$
1	6,28	Valores medidos	Valores calculados
2	12,56		
3	25,12		
8	50,25		
16	100,50		
32	201,0		

A.3. MEDIDA DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM TERRÔMETRO TIPO ALICATE

A.3.1. APLICAÇÃO

Este método de medição permite medir-se a resistência de aterramento em sistemas primários a 3 fios com neutro secundário contínuo e multiaterrado e em sistemas primários a 4 fios sem a necessidade de se efetuar a desconexão da descida do aterramento do condutor neutro da rede.

Este tipo de medição também oferece a vantagem de incluir as resistências de interligação com a terra e da conexão do sistema de aterramento.

Sistemas primários a 3 fios com neutro contínuo e multiaterrado são aqueles em que o condutor neutro não é interligado à malha de aterramento da fonte de suprimento (subestação), ficando restrito ao sistema secundário correspondente (neutro de baixa tensão).

São considerados como de neutro secundário contínuo, aqueles em que o neutro de baixa tensão interliga todos os transformadores de distribuição.

Figura 75: Sistema primário a 3 fios com neutro secundário contínuo.

Sistemas primário a 4 fios são aqueles em que o condutor neutro, oriundo da malha de aterramento da fonte de suprimento (subestação), comum aos circuitos primário e secundário acompanha toda a rede, sendo regularmente conectado à terra, em pontos definidos de modo a constituir uma rede de terra contínua e de baixa impedância.

Esse condutor neutro é também interligado aos neutros de outros alimentadores, quando disponíveis, inclusive daqueles originários de outras subestações.

Figura 76: Sistema primário a 4 fios com neutro secundário contínuo.

Este método não se aplica ao sistema de terra isolado, pois neste caso não há o multi-aterramento e consequentemente não há o fechamento elétrico do circuito para possibilitar a execução da medição. Porém, para a sua adequada utilização e interpretação dos resultados obtidos é necessário observar-se alguns pontos que serão abordados a seguir.

A.3.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um sistema de aterramento de distribuição a três ou a quatro fios com neutro contínuo e multiaterrado comum pode ser representado conforme o circuito da Figura 77.

Figura 77: Representação de um sistema com neutro contínuo e multiaterrado.

Uma tensão E é aplicada em um ponto entre o aterramento a medir R_A e o neutro contínuo do sistema multiaterrado através de um transformador especial. Uma determinada corrente I circula através do circuito, sendo a resistência R_A em paralelo com as resistências dos demais aterramentos da rede $R_1, \dots, R_{N-1}$ e R_N . Assim podemos estabelecer a equação:

$$\frac{E}{I} = R_A + \frac{1}{\frac{1}{R_1} \pm \dots \frac{1}{R_{N-1}} + \frac{1}{R_N}}$$

Onde:

R_A – Resistência de aterramento em análise;

$R_1, \dots, R_{N-1}, R_N$ – Resistências de aterramento do sistema multiaterrado.

A parcela $\frac{1}{\frac{1}{R_1} \pm \dots \frac{1}{R_{N-1}} + \frac{1}{R_N}}$ é o erro do método de medição e corresponde à resistência

equivalente do sistema. Em sistema de aterramento de neutro contínuo e multiaterrado a resistência de aterramento equivalente tende a zero, permitindo afirmar que R_A é o valor real da resistência de aterramento.

A.3.3. MEDIDAS TÍPICAS EM CAMPO (PASSO A PASSO)

A.3.3.1. Equipamento de 15 kV Instalado em Poste de Madeira

- A3.3.1.1. Para a medição com a descida do aterramento externo ao poste, escolha um ponto de fácil acesso.
- A3.3.1.2. Retire qualquer proteção que cubra o condutor de terra e propicie espaço suficiente para as garras do medidor que devem ser capazes de fechar com facilidade ao redor do condutor.
- A3.3.1.3. As garras também podem ser colocadas ao redor da haste de terra.

- A3.3.1.4. O alicate terrômetro, conforme mencionado anteriormente deve ser posicionado de forma que as garras do aparelho estejam no caminho elétrico entre o neutro do sistema e o aterramento a ser medido.
- A3.3.1.5. Após seguir os procedimentos de utilização do aparelho meça a resistência.
- A3.3.1.6. A leitura obtida com o medidor indica a resistência não só da haste, mas também da conexão ao neutro do sistema e todas as conexões de interligação entre o neutro e a haste.

Figura 78: Esquema de medição quando a descida do aterramento é externa ao poste.

A.3.3.2. Equipamento de 15 kV Instalado em Poste de Concreto

- A3.3.2.1. Para a medição com a descida do aterramento interna ao poste, o medidor deve ser posicionado conforme apresentado na Figura 79.
- A3.3.2.2. Retire qualquer proteção que cubra o condutor de terra e propicie espaço suficiente para as garras do medidor que devem ser capazes de fechar com facilidade ao redor do condutor.
- A3.3.2.3. A seguir proceda à medição conforme indicado nos itens 4.3.1.4 e seguintes.

Figura 79: Esquema de medição quando a descida do aterramento é interna ao poste.

A.3.4. MEDIÇÕES NAS ET's TRIFÁSICAS PADRONIZADAS DA EDP

A sugestão do posicionamento do terrômetro alicate para as medições de resistência de aterramento estão definidas nas figuras Figura 80, Figura 81 e Figura 82.

A.3.4.1. Estação Transformadora Trifásica em Poste (padrão antigo)

Figura 80: Posicionamento do terrômetro em postes de 10,5 m e 12 m.

A.3.4.2. Estação Transformadora Trifásica em Poste – Rede Compacta

Figura 81: Posicionamento do terrômetro para estruturas CE – ET e CE3 – ET.

A.3.4.3. Estação Transformadora Trifásica PT.DT.PDN.03.05.017

Figura 82: Posicionamento do termômetro para transformador trifásico.

Apêndice B – Sistemática de Retirada, Transporte, Armazenamento e Envio dos Para-Raios Retirados da Rede Para Ensaios em Laboratório

B.1. Finalidade

Este procedimento técnico estabelece a sistemática a ser observada com relação ao para-raios retirados da rede de distribuição na área piloto do Projeto.

B.2. Atividades

B.2.1. Retirada dos Para-Raios

A retirada dos para-raios instalados na área piloto do Projeto deve ser efetuada com base na relação de ET's estabelecidas como integrantes do projeto.

Neste caso os para-raios devem ser retirados da rede de distribuição com o máximo cuidado evitando-se choques e impactos que possam danificar o seu invólucro ou mesmo o para-raios que será submetido a ensaios de laboratório.

Quando da retirada, deverá ser afixada etiqueta ao corpo do para-raios contendo as seguintes informações:

- ✓ Município,
- ✓ Alimentador,
- ✓ Data da retirada,
- ✓ ET da qual o para-raios foi retirado e
- ✓ Fase a qual ele estava conectado.

B.2.2. Embalagem para transporte

Cada para-raios deverá ser cuidadosamente embalado um a um e a embalagem a ser utilizada poderá ser :

- ✓ Plástico bolha ou,
- ✓ Caixa de papelão.

B.2.3. Transporte dos Para-Raios

Os para-raios após embalados devem ser transportados com cuidado de forma a evitar sua quebra ou danos ao seu corpo ou partes internas.

B.2.4. Armazenamento

Os para-raios retirados da área piloto devem ser armazenados em local específico, separados dos demais e identificado com sendo reservado aos para-raios utilizados no Projeto.

Tão logo as unidades estejam disponíveis na área de armazenamento a eles destinados, o Gerente do Projeto na EDP deverá ser informado para em seguida comunicar a equipe técnica da disponibilidade dos mesmos para serem enviados para ensaios elétricos.

B.2.5. Envio para Ensaios

As unidades retiradas da rede de distribuição localizada na área piloto e que já foram embaladas uma a uma, agora deverão ser embaladas para envio via serviço de entrega ou transportadora ao local de execução dos ensaios de laboratório a ser comunicado na época oportuna pela equipe técnica.

Na parte externa da embalagem deverá constar, no mínimo, o seguinte :

- ✓ Remetente,
- ✓ Destinatário,
- ✓ X unidades de para-raios retirados da área piloto para ensaios elétrico.

Em destaque deverá constar: CUIDADO EQUIPAMENTO FRÁGIL

Apêndice C – Tabelas com as informações coletadas em campo dos contadores de descargas atmosféricas

Tabela 10: Dados coletados durante 9 meses na ET 5333.

ET-5333								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
07/06/17	008	005	006	17,0	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	008	005	006	-	-	-	-	Sandro Santos
16/08/17	008	005	006	18,7	0,258	0,230	0,204	Sandro Santos
12/09/17	008	005	006	19,0	0,415	1,010	0,576	Sandro Santos
16/10/17	008	005	006	18,0	0,430	1,240	0,540	Sandro Santos
13/11/17	008	005	006	16,8	0,340	0,803	0,830	Sandro Santos
09/12/17	008	005	006	17,2	0,420	0,732	0,620	Sandro Santos
22/01/18	008	005	006	15,9	0,584	1,140	0,914	Sandro Santos
19/02/18	008	005	006	16,1	0,737	0,773	0,909	Sandro Santos

Tabela 11: Dados coletados durante 9 meses na ET 2718.

ET-2718								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
07/06/17	000	006	006	30,1	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	000	006	006	-	-	-	-	Sandro Santos
16/08/17	000	006	006	29,2	0,241	0,257	0,203	Sandro Santos
12/09/17	000	006	006	45,7	0,258	0,237	0,606	Sandro Santos
16/10/17	000	006	006	27,8	0,600	0,760	0,610	Sandro Santos
13/11/17	000	006	006	28,1	0,590	0,684	0,630	Sandro Santos
09/12/17	000	006	006	30,5	0,600	0,702	0,652	Sandro Santos
22/01/18	000	006	006	26,8	0,614	0,725	0,645	Sandro Santos
19/02/18	000	006	006	27	0,792	1,040	0,522	Sandro Santos

Tabela 12: Dados coletados durante 9 meses na ET 5412.

ET-5412								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
07/06/17	011	000	006	21,4	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	011	000	006	-	-	-	-	Sandro Santos
16/08/17	011	000	006	31,5	0,252	0,313	0,310	Sandro Santos
11/09/17	011	000	006	33,6	0,252	0,270	0,293	Sandro Santos
16/10/17	011	000	006	27,0	0,500	0,337	0,340	Sandro Santos
13/11/17	011	000	006	27,7	0,221	0,300	0,362	Sandro Santos
09/12/17	011	000	006	29,8	0,210	0,291	0,310	Sandro Santos
22/01/18	011	000	006	25,5	0,201	0,282	0,275	Sandro Santos
19/02/18	11	000	006	28,8	0,321	0,479	0,234	Sandro Santos

Tabela 13: Dados coletados durante 9 meses na ET 5413.

ET-5413								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
07/06/17	006	005	006	42,0	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	006	005	006	-	-	-	-	Sandro Santos
16/08/17	006	005	006	54,5	0,239	0,270	0,289	Sandro Santos
11/09/17	006	005	006	57,5	0,261	0,202	0,283	Sandro Santos
16/10/17	006	005	006	57,5	0,265	0,265	0,269	Sandro Santos
13/11/17	006	005	006	44,5	0,245	0,251	0,275	Sandro Santos
09/12/17	006	005	006	57,0	0,250	0,267	0,274	Sandro Santos
22/01/18	006	005	006	38,7	0,238	0,260	0,288	Sandro Santos
19/02/18	006	005	006	44,1	0,240	0,253	0,265	Sandro Santos

Tabela 14: Dados coletados durante 9 meses na ET 540673.

ET-540673								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
07/06/17	007	005	006	40,7	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	007	005	006	-	-	-	-	Sandro Santos
18/08/17	007	005	006	420 (*)	0,258	0,241	0,202	Sandro Santos
23/08/17	007	005	006	33,5	0,258	0,241	0,202	Sandro Santos
11/09/17	007	005	006	17,5	0,354	0,346	0,478	Sandro Santos
16/10/17	007	005	006	18,4	0,314	0,486	0,256	Sandro Santos
13/11/17	007	005	006	36,7	0,362	0,219	0,370	Sandro Santos
09/12/17	007	005	006	39,9	0,350	0,368	0,349	Sandro Santos
22/01/18	007	005	006	37,0	0,311	0,320	0,333	Sandro Santos
19/02/18	011	005	006	46	0,586	0,408	0,345	Leandro/Rogério

(*) - A medição realizada em 18/08/17 apresentou o valor de 420 Ω de resistência de aterramento, muito superior ao valor medido em 08/06/17 de 40,7 Ω . Em função deste fato, a equipe técnica da EDP São Paulo programou uma inspeção para regularização do aterramento da estrutura em 23/08/17. Após a manutenção no condutor de descida do aterramento, o valor medido foi de 33,5 Ω .

Tabela 15: Dados coletados durante 9 meses na ET 253

ET-253								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
08/06/17	000	000	006	56,5	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	000	000	006	-	-	-	-	Sandro Santos
16/08/17	000	000	006	58,0	0,208	0,423	0,324	Sandro Santos
12/09/17	000	000	006	59,5	0,239	0,515	0,403	Sandro Santos
16/10/17	000	000	006	56,0	0,280	0,450	0,390	Sandro Santos
13/11/17	000	000	006	52,5	0,370	0,825	0,831	Sandro Santos
09/12/17	000	000	006	52,9	0,293	0,510	0,400	Sandro Santos
22/01/18	000	000	006	47,7	0,214	0,640	0,595	Sandro Santos
19/02/18	000	000	006	49,2	0,469	0,890	0,821	Leandro/Rogério

Tabela 16: Dados coletados durante 9 meses na ET 3604.

ET-3604								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
08/06/17	000	000	006	99,5	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	000	000	006	-	-	-	-	Sandro Santos
18/08/17	000	000	006	143,0 (*)	0,246	0,240	0,276	Sandro Santos
23/08/17	000	000	006	27,0	0,246	0,240	0,276	Sandro Santos
11/09/17	000	000	006	37,4	0,272	0,254	0,256	Sandro Santos
16/10/17	000	000	006	36,0	0,230	0,330	0,237	Sandro Santos
13/11/17	000	000	006	31,9	0,247	0,240	0,236	Sandro Santos
09/12/17	000	000	006	29,9	0,240	0,241	0,237	Sandro Santos
22/01/18	000	000	006	27,5	0,211	0,215	0,213	Sandro Santos
19/02/18	000	000	006	29,1	0,231	0,262	0,232	Leandro/Rogério

(*) - A medição realizada em 18/08/17 apresentou o valor de 143 Ω de resistência de aterramento, muito superior ao valor medido em 08/06/17 de 99,5 Ω . Em função deste fato, a equipe técnica da EDP São Paulo programou uma inspeção para regularização do aterramento da estrutura em 23/08/17. Após a manutenção no condutor de descida do aterramento o valor medido foi de 27,0 Ω .

Tabela 17: Ddados coletados durante 9 meses na ET 1665.

ET-1665								
DATA	REGISTRO DO CICLOMETRO DO CONTADOR DE DESCARGAS			MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO TERRA (Ω)	MEDIÇÃO CORRENTE FUGA PARA-RAIOS (mA)			NOME DO RESPONSÁVEL
	50 Amperes	100 Amperes	200 Amperes		A	B	C	
08/06/17	006	007	006	18,0	-	-	-	Marco Aurélio
19/07/17	006	007	006	-	-	-	-	Sandro Santos
18/08/17	006	007	006	17,5	0,342	0,219	0,0	Sandro Santos
11/09/17	006	007	006	22,6	0,272	0,208	0,328	Sandro Santos
16/10/17	006	007	006	24,0	0,936	0,499	0,289	Sandro Santos
13/11/17	006	007	006	22,8	1180	0,281	0,238	Sandro Santos
09/12/17	006	007	006	19,8	0,240	0,206	0,265	Sandro Santos
22/01/18	006	007	006	18,1	0,302	0,338	0,425	Sandro Santos
19/02/18	006	007	006	19,1	0,334	0,214	0,301	Leandro/Rogério

Apêndice D – Gráficos de ocorrências para as causas vento, descargas atmosféricas, causas não determinadas e não classificadas das subestações estudadas

Figura 83: Ocorrências para BCU.

Figura 84: Ocorrências para BIR.

Figura 85: Ocorrências para BOI.

Figura 86: Ocorrências para BOM.

Figura 87: Ocorrências para BRR.

Figura 88: Ocorrências para CAC.

Figura 89: Ocorrências para CAR.

Figura 90: Ocorrências para CMB.

Figura 91: Ocorrências para CPA.

Figura 92: Ocorrências para CRU

Figura 93: Ocorrências para CSO.

Figura 94: Ocorrências para DUT.

Figura 95: Ocorrências para FER.

Figura 96: Ocorrências para GOP.

Figura 97: Ocorrências para GUE.

Figura 98: Ocorrências para GUL.

Figura 99: Ocorrências para GUR.

Figura 100: Ocorrências para INP.

Figura 101: Ocorrências para IPO.

Figura 102: Ocorrências para ITQ.

Figura 103: Ocorrências para JAC.

Figura 104: Ocorrências para JCE.

Figura 105: Ocorrências para JNO.

Figura 106: Ocorrências para LOR.

Figura 107: Ocorrências para MAP.

Figura 108: Ocorrências para MAS.

Figura 109: Ocorrências para MCI.

Figura 110: Ocorrências para MRE.

Figura 111: Ocorrências para PID.

Figura 112: Ocorrências para PIL.

Figura 113: Ocorrências para PME.

Figura 114: Ocorrências para POA.

Figura 115: Ocorrências para SAL.

Figura 116: Ocorrências para SBR.

Figura 117: Ocorrências para SJC.

Figura 118: Ocorrências para SKO.

Figura 119: Ocorrências para SLU.

Figura 120: Ocorrências para SSC.

Figura 121: Ocorrências para SUZ.

Figura 122: Ocorrências para TAU.

Figura 123: Ocorrências para UNA.

Figura 124: Ocorrências para VGA.

Figura 125: Ocorrências para VHE.

Figura 126: Ocorrências para VJS.

Figura 127: Ocorrências para VSL.

Apêndice E – Mapa de densidade de descargas atmosféricas por subestação e suas redes elétricas

Figura 128: Descargas atmosféricas para BCU.

Figura 129: Descargas atmosféricas para BIR.

Figura 130: Descargas atmosféricas para BOI.

Figura 131: Descargas atmosféricas para BON.

Figura 132: Descargas atmosféricas para BRR.

Figura 133: Descargas atmosféricas para CAC.

Figura 134: Descargas atmosféricas para CAR.

Figura 135: Descargas atmosféricas para CMB.

Figura 136: Descargas atmosféricas para CPA.

Figura 137: Descargas atmosféricas para CRU.

Figura 138: Descargas atmosféricas para CSO.

Figura 139: Descargas atmosféricas para DUT.

Figura 140: Descargas atmosféricas para FER.

Figura 141: Descargas atmosféricas para GOP.

Figura 142: Descargas atmosféricas para GUE.

Figura 143: Descargas atmosféricas para GUL.

Figura 144: Descargas atmosféricas para GUR.

Figura 145: Descargas atmosféricas para INP.

Figura 146: Descargas atmosféricas para IPO.

Figura 147: Descargas atmosféricas para ITQ.

Figura 148: Descargas atmosféricas para JAC.

Figura 149: Descargas atmosféricas para JCE.

Figura 150: Descargas atmosféricas para JNO.

Figura 151: Descargas atmosféricas para LOR.

Figura 152: Descargas atmosféricas para MAP

Figura 153: Descargas atmosféricas para MAS.

Figura 154: Descargas atmosféricas para MCI.

Figura 155: Descargas atmosféricas para MRE.

Figura 156: Descargas atmosféricas para PID.

Figura 157: Descargas atmosféricas para PIL.

Figura 158: Descargas atmosféricas para PME.

Figura 159: Descargas atmosféricas para POA.

Figura 160: Descargas atmosféricas para SAL.

Figura 161: Descargas atmosféricas para SBR.

Figura 162: Descargas atmosféricas para SJC.

Figura 163: Descargas atmosféricas para SKO.

Figura 164: Descargas atmosféricas para SLU.

Figura 165: Descargas atmosféricas para SSC.

Figura 166: Descargas atmosféricas para SUZ.

Figura 167: Descargas atmosféricas para TAU.

Figura 168: Descargas atmosféricas para UNA.

Figura 169: Descargas atmosféricas para VGA.

Figura 170: Descargas atmosféricas para VHE.

Figura 171: Descargas atmosféricas para VJS.

Figura 172: Descargas atmosféricas para VSL.