UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FABRICIO EXPEDITO VIANA

Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de
Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas Indiretas

São Carlos

2019

FABRICIO EXPEDITO VIANA

Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de
Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas Indiretas

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).

E112s Expedito Viana, Fabricio
 Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões
 Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às
 Descargas Atmosféricas Indiretas / Fabricio Expedito
 Viana; 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. Rede de Distribuição. 2. Sistema Especialista.
 3. Tensões Induzidas. 4. Descargas Atmosféricas. I.
 Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FABRICIO EXPEDITO VIANA.**

Título da dissertação: "Sistema especialista para cálculo de sobretensões induzidas em sistemas de distribuição frente às descargas atmosféricas indiretas".

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. **Ricardo Augusto Souza Fernandes**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Dr. **Claudionor Francisco do Nascimento**
(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 Livia e meu
filho Conrado pela compreensão, amor
e incentivo.*

AGRADECIMENTOS

Diante desta oportunidade em me dedicar ao mestrado nos últimos anos, foi possível absorver uma bagagem de conhecimentos extraordinários, tanto conhecimentos técnicos que me ajudaram a crescer profissionalmente quanto aos conhecimentos a respeito da vida, que me fizeram ser um ser humano melhor. Agradeço a todos que contribuíram para que eu pudesse concluir mais uma fase da minha vida, através de palavras de incentivo e ensinamentos técnicos.

Inicialmente agradeço a Deus por esta oportunidade única.

Aos Professores e Doutores Ivan Nunes da Silva e Rogério de Andrade Flauzino, orientador e co-orientador, respectivamente, pelo incentivo constante, enriquecidos e didáticos ensinamentos compartilhados e total dedicação em contribuir desde o início do mestrado até o último segundo.

Ao corpo de gestão da concessionária de energia EDP São Paulo, representada na figura do Gestores Walker Alexandre de Souza e Marcos Alexandre de Campos pela confiança, apoio e compreensão, permitindo que eu pudesse exercer horário flexível no trabalho, devido aos dias de aulas para obtenção do título de mestre.

Aos companheiros Luiz Antonio Pergentino e Gabriel Henrique de Aguiar Batista, “soldados” de estrada e amigos de empresa por horas e horas de viagem e estudo.

A equipe da empresa Sete Engenharia, representada por Eduardo Brasil e Marco Aurélio, pela dedicação a este projeto.

Ao Francisco A. Braga, grande amigo há quase três décadas, pelo incentivo a concluir este curso e pelo exemplo genuíno de ser humano, contribuindo para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

A minha esposa amada Livia Viana, companheira e mãe do meu filho amado Conrado Viana, pelo incentivo, pela compreensão das horas que dediquei a esta pesquisa. Por cuidar do nosso filho nos meus momentos ausentes. Você foi essencial para que eu pudesse conquistar esta medalha para a nossa vida.

Finalmente, não menos importante, a minha mãe Marcia e minha avó Luiza por terem me educado e mostrado o caminho que deveria traçar para que hoje pudesse chegar até aqui.

EPÍGRAFE

“Ou mandarás aos raios para que
saíam, e te digam: Eis-nos aqui?”

Bíblia Sagrada, Jó 38:35

RESUMO

VIANA, F. E. **Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas Indiretas**. Dissertação (Mestrado) apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Apesar das descargas atmosféricas (raios) serem um fenômeno natural de reconhecida importância para a manutenção do equilíbrio ambiental do planeta, as tensões por elas induzidas constituem-se em um dos mais importantes fenômenos causadores de danos operacionais e financeiros ao setor elétrico, especificamente à rede de distribuição de energia elétrica. Neste contexto se insere esta dissertação de mestrado, a qual tem como objetivo desenvolver uma metodologia para cálculo de sobretensões induzidas em sistemas de distribuição originadas por descargas atmosféricas indiretas, a qual foi implementada computacionalmente, originando um sistema especialista denominado “Franklin”. Para tanto, esta metodologia será aplicada para o cálculo das sobretensões induzidas em um modelo de degradação de para-raios de ZnO já conhecido, permitindo assim, estimar a redução de sua vida útil quando instalado em uma rede de distribuição na qual há incidências de descargas atmosféricas indiretas.

Palavras-chave: Rede de Distribuição, Sistema Especialista, Tensões Induzidas, Descargas Atmosféricas.

ABSTRACT

VIANA, F. E. **Expert System for Calculating Survival Induced in Distribution Systems Against Indirect Atmospheric Discharges.** Dissertation Master's Degree presented the School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

Although lightning strikes are a natural phenomenon of recognized importance for maintaining the planet's environmental balance, the stresses induced by them constitute one of the most important phenomena causing operational and financial damage to the electricity sector, specifically the grid of electricity distribution. Although lightning classified as direct causes overvoltages of higher amplitudes than those characterized as indirect, the probability of occurrence of this type is low when compared to indirect lightning, in which the distribution network is more vulnerable to being impacted. In this context is inserted this master's thesis, which aims to develop a methodology for calculation of induced overvoltages in distribution systems originated by indirect lightning, which was computationally implemented, originating a specialist system called "Franklin". To this purpose, this methodology is applied for the calculation of induced overvoltages in a known ZnO lightning arrester degradation model, thus allowing to estimate the reduction of its useful life when installed in a distribution network where there are indirect atmospheric discharges incidences.

Keywords: Distribution Network, Expert System, Induced Voltages, Atmospheric Discharges.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Evolução FEC das Distribuidoras de Energia no Brasil (2016-2018).....	28
Figura 1.2: Impacto das causas relacionadas às descargas atmosféricas (2018-2019).	29
Figura 1.3: Contribuição em % e por causa para os desligamentos não programados (2013-2019).	29
Figura 2.1: Distribuição das cargas nas nuvens e no solo [adaptada de (UMAN, 1984)].	37
Figura 2.2: Probabilidade da amplitude máxima de corrente em virtude da polaridade da descarga [adaptado de (NOBLAT, 1994)].	38
Figura 2.3: Representação da conexão entre os canais ascendentes e descendentes (VISACRO, 2005).....	39
Figura 2.4: 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)].	41
Figura 2.5: Mapa de curvas isoceraúnicas do Brasil (NBR 5419, 2005).	43
Figura 2.6: Taxa de relâmpagos nuvem-solo com dados obtidos pelo sensor de imagem de descarga nos últimos 13 anos (1998-2010) e corrigidos com resolução de 0.1° (NACCARATO, 2011).....	44
Figura 2.7: Linha de distribuição sem para-raios atingida por uma descarga atmosférica direta e indireta em um de seus condutores energizados [adaptada de (CAMPOS, 2012)].	47
Figura 2.8: Linha de transmissão atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica direta [adaptada de (VISACRO, 2005)].....	48
Figura 2.9: Representação da reflexão da onda de tensão e determinação da onda resultante no topo da torre [adaptada de (VISACRO, 2005)].	49
Figura 2.10: Descarga direta em um condutor de blindagem a meio vão entre duas torres de transmissão de energia [adaptada de (VISACRO, 2005)].	50
Figura 2.11: Comparação entre a curva de sobretensão com e sem a utilização do para-raios (SILVA, 2007).....	50
Figura 2.12: Representação de uma linha de distribuição afeta pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica indireta [adaptada de (VISACRO, 2005)].	51
Figura 3.1: Onda de corrente da descarga de retorno e da tensão induzida medidas em uma linha de distribuição experimental (BARKER <i>et al.</i> , 1996 <i>apud</i> VISACRO, 2005).	62
Figura 3.2: Passos iniciais da dinâmica de estabelecimento da corrente de retorno no canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].	64

Figura 3.3: Condição inicial para a representação do estabelecimento do acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].	68
Figura 3.4: Representação do estabelecimento dos quatro tipos de acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].	69
Figura 3.5: Disposição da rede e do canal de descarga em relação ao solo para a metodologia de cálculo de tensões induzidas pelo Modelo de Rusck com suas respectivas simplificações [adaptada de (MOTA, 2011)].	75
Figura 3.6: Disposição espacial dos condutores empregada para o desenvolvimento do Modelo de Rusck [adaptada de (SILVEIRA, 2006)].	75
Figura 3.7: Representação da onda da corrente utilizando a curva de Heidler (VISACRO, 2005).	84
Figura 3.8: Onda dupla exponencial (VISACRO, 2005).	84
Figura 3.9: Forma de onda de corrente para modelagem da descarga atmosférica (NERIVALDO, 2011).	84
Figura 3.10: Composição da tensão induzida em trecho da rede de distribuição [Adaptada de (SANTOS, 2011).]	85
Figura 4.1: Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D'AJUZ <i>et al.</i> , 1985).	91
Figura 4.2: Curvas de tensão e corrente de para-raios de ZnO, de SiC e ideal [adaptada de (MAMEDE, 2005)].	92
Figura 4.3: Característica de tensão e corrente para o carboneto de silício e o óxido de zinco (D'AJUZ <i>et al.</i> , 1985).	93
Figura 4.4: Curva característica de V versus I para um resistor não linear de ZnO [adaptada de (OLIVEIRA, 2004)].	96
Figura 4.5: Dependência do coeficiente não linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica [adaptada de (FURTADO, 2005)].	98
Figura 4.6: Característica potência consumida versus tempo para resistores de ZnO de primeira, segunda e terceira geração (SANTOS, 2007).	99
Figura 4.7: Curva característica típica de um varistor de ZnO (FRANCO, 2008).	102
Figura 4.8. Dimensões do para-raios PBP 10/10.	103
Figura 4.9: Modelo de degradação dos para-raios ensaiados.	104
Figura 5.1: Estrutura Básica de um Sistema Especialista (MENDES, 1997).	105
Figura 5.2:– Arquitetura do Sistema Especialista para Cálculo de sobretensão de origem atmosférica.	107
Figura 5.3: Mapa de variação da densidade de descargas atmosféricas 2014-2015	108

Figura 5.4: Trecho do alimentador SUZ 1306 sobreposto aos registros das descargas atmosféricas de 2014 e 2015.	109
Figura 5.5: Tela principal do sistema especialista.....	110
Figura 5.6: Importando a base de dados da rede de distribuição.	111
Figura 5.7: Selecionando o banco de dados da rede de distribuição.....	111
Figura 5.8: Dados da rede de distribuição importados atualizados no sistema.....	112
Figura 5.9: Selecionando o circuito e o tipo de equipamento.	113
Figura 5.10: Importando a base de dados das descargas atmosféricas na rede de distribuição. .	114
Figura 5.11: Selecionando o banco de dados das descargas atmosféricas.	114
Figura 5.12: Mapa georreferenciado das descargas atmosféricas.	115
Figura 5.13: Ampliação do mapa georreferenciado das descargas atmosféricas.	115
Figura 5.14: Selecionando o menu “Modelo de degradação de para-raios”.	116
Figura 5.15: Campos a serem preenchidos no menu “Modelo de degradação de para-raios”....	116
Figura 5.16: Campos preenchidos no menu “Modelo de degradação de para-raios”.	116
Figura 5.17: Acessando a guia “Avaliação de degradação de para-raios para o ativo selecionado”.	117
Figura 5.18: Tela com cálculo das sobretensões de origem atmosférica.	118
Figura 5.19: Tela com as correntes de descarga pelos para-raios.	118
Figura 5.20: Tela com a estimativa de vida útil dos para raios.	119
Figura 5.21: Acessando o menu “Análise de degradação de para-raios”.....	119
Figura 5.22: Selecionando o circuito no “mecanismo de análise”.....	120
Figura 5.23: Resultado após processamento do “mecanismo de análise”.....	120
Figura 5.24: Modelo do arquivo exportado com o resultado do sistema especialista.....	121
Figura 5.25: Níveis de sobretensões induzidas 95% (kV) por equipamento.	122
Figura 5.26: Níveis de sobretensões induzidas 5% (kV) por equipamento.	123
Figura 5.27: Correlação entre níveis de sobretensões induzidas (95%) e intensidade efetiva (kV).	123
Figura 5.28: Correlação entre níveis de sobretensões induzidas (95%) e densidade efetiva (descargas/km ² /ano).	124
Figura 5.29: Contribuição das sobretensões induzidas 95% (kV) para a taxa de degradação do para-raios instalados nas estações transformadoras do SUZ-1306.....	124
Figura 5.30: Sobretensões induzidas 95% (kV) e impacto nos desligamentos não programados.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros de frente da corrente [adaptada de (CIGRÉ, 1991)].....	42
Tabela 3.1: Constantes usada para simulação da corrente de descarga [adaptado de NERIVALDO, 2011)]	83
Tabela 4.1: Composição química clássica dos varistores de ZnO (OLIVEIRA, 2004).....	95
Tabela 4.2: Características dos óxidos mais utilizados na fabricação de varistores de ZnO (FRANCO, 1993).	95
Tabela 4.3. Classes e especificações mínimas dos para-raios (IEC 60099-4,2009).	102
Tabela 4.4. Características Elétricas.	103
Tabela 4.5. Características Mecânicas.	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BF	–	Base Fusível
BrasilDAT	–	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas
CF	–	Chave Fusível
CIGRÉ	–	International Council on Large Electric Systems
DEC	–	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
EDP	–	Energias de Portugal
ELAT	–	Grupo de Eletricidade Atmosférica
ET	–	Estação Transformadora
ETD	–	Estação Transformadora de Distribuição
FEC	–	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronic Engineers
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LD	–	Linha de Distribuição
LT	–	Linha de Transmissão
NBI	–	Nível Básico de Isolamento
PRODIST	–	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
RINDAT	–	Rede Nacional de Localização de Descargas Atmosféricas
SiC	–	Carboneto de Silício
SUZ	–	Subestação de energia localizada no município de Suzano-SP
ZnO	–	Óxido de Zinco

Índice

Capítulo 1. Introdução	27
1.1.) MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA.....	27
1.2.) OBJETIVO	32
1.3.) ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	32
1.4.) ATIVIDADES ACADÊMICAS.....	33
Capítulo 2. Conceitos Relacionados às Descargas Atmosféricas.....	35
2.1.) INTRODUÇÃO.....	35
2.2.) DEFINIÇÕES E CONCEITOS	36
2.3.) CONSTITUIÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS	37
2.4.) CONSTITUIÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	38
2.5.) CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DA ONDA DE CORRENTE DE DESCARGA.....	40
2.6.) INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	43
2.7.) TIPOS DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E RESPECTIVAS CONSEQUÊNCIAS.....	45
2.7.1.) Características Pertinentes à Incidência Direta de Descargas Atmosféricas	45
2.7.2.) Características Pertinentes à Incidência Indireta de Descargas Atmosféricas	51
Capítulo 3. Sobretensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas.....	53
3.1.) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	53
3.1.1.) A Utilização do Modelo de Sune Rusck.....	60
3.1.2.) Formação das Tensões Induzidas por Descargas Indiretas.....	61
3.1.3.) Corrente de Retorno no Canal de Descargas	63
3.1.3.1. Dinâmica de Estabelecimento da Corrente de Retorno	63
3.1.3.2. Modelos de Corrente de Retorno.....	66
3.2.) ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO ENTRE LINHA E CANAL DE DESCARGA.....	67
3.2.1.) Tipos de Mecanismos de Acoplamento Eletromagnético	67
3.2.2.) Modelos de Acoplamento Eletromagnético entre Rede e Canal de Descarga.....	69
3.3.) VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA AMPLITUDE E FORMA DAS TENSÕES INDUZIDAS	79
3.3.1.) Parâmetros de Descarga	80
3.3.2.) Parâmetros da Rede.....	80
3.3.3.) Parâmetros de Configuração entre Rede e Canal de Descarga.....	81
3.3.4.) Parâmetros Ambientais	81
3.4.) CONSIDERAÇÕES PARA APRIMORAMENTO AO MÉTODO PROPOSTO NO MODELO DE RUSCK	82
3.4.1.) Formas de Ondas Arbitrárias para as Correntes de Descargas Atmosféricas	82
3.4.2.) Sobretensões em Linhas de Distribuição Finitas	85
Capítulo 4. Aspectos Conceituais Relacionados aos Para-Raios	89
4.1.) INTRODUÇÃO.....	89
4.2.) PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS PARA-RAIOS	89
4.3.) HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO	90
4.4.) PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	94
4.4.1.) Características Construtivas dos Para-Raios de ZnO	94
4.4.2.) Fatores de Degradação dos Para-Raios de ZnO	98
4.4.3.) Especificações dos Para-Raios	100
4.4.4.) Modelo Matemático dos Para-raios de ZnO Utilizado para Implementação no Sistema Especialista de Cálculo de Sobretensão.....	102
Capítulo 5. Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas Indiretas	105
5.1.) INTRODUÇÃO.....	105

5.2.)	DEFINIÇÃO DE SISTEMA ESPECIALISTA	105
5.3.)	SISTEMA ESPECIALISTA PARA CÁLCULO DE SOBRETENSÃO INDUZIDA	107
5.4.)	ESCOLHA DO CIRCUITO PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	108
5.5.)	RECURSO E CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ESPECIALISTA.....	109
5.5.1.)	Configuração dos parâmetros de entrada do sistema especialista.	109
5.5.2.)	Efetuando os Cálculos das Sobretensões de Origem Atmosféricas	117
5.6.)	RESULTADOS CONSOLIDADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ESPECIALISTA.....	122
Capítulo 6.	Conclusão.....	127
6.1.)	CONSIDERAÇÕES FINAIS	127
6.2.)	PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	128
Capítulo 7.	Referências Bibliográficas.....	129
ANEXO I.	ENSAIOS – DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA DEGRADAÇÃO DOS PARA-RAIOS	135

Capítulo 1. Introdução

1.1.) MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

O raio é um fenômeno natural gerado durante uma tempestade por descargas eletrostáticas e subsequentemente produzindo a radiação eletromagnética (GOLSHANIRAD e RAZI-KAZEMI, 2019). Este fenômeno natural é de reconhecida importância para a manutenção do equilíbrio ambiental do planeta. Segundo informações disponibilizadas pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), o Brasil é um dos países com maior incidência de descargas atmosféricas devido a sua localização em relação aos trópicos e a sua dimensão territorial, em que aproximadamente 70 milhões de raios caem por ano no território brasileiro, ou seja, uma média de três descargas por segundo (BERARDO, 2011). Todavia, quando estas descargas atingem diretamente ou indiretamente o sistema de distribuição de energia, causam sobretensões transitórias de elevada amplitude.

Essas sobretensões se propagam pela rede de distribuição e seu efeito tem sido prejudicial, pois, dependendo das formas de onda e amplitudes das sobretensões geradas por este fenômeno, os limites de suportabilidades dielétricas dos equipamentos interligados a este sistema têm grande potencial de serem ultrapassados e descargas disruptivas podem ocorrer (SILVA, 2018), impactando em interrupções na continuidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores conectados à rede atingida, além de se constituírem em ameaça a segurança física da população. Particularmente, a sobretensão induzida causada por um raio nas linhas de distribuição é uma das razões mais importantes para uma falha na rede de distribuição (GOLSHANIRAD e RAZI-KAZEMI, 2019).

Estas falhas podem gerar interrupções que, por consequência, impactam diretamente na qualidade do fornecimento de energia elétrica das concessionárias de energia do Brasil, na visão da qualidade do produto, diretamente por contribuir para as variações de tensão de curta duração (VTCD) e da qualidade do serviço, através dos indicadores de continuidade de Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC) e Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC), regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio de limites pré-estabelecidos e que quando violados a concessionária de energia deve pagar multas pecuniárias em favor dos consumidores afetados. O propósito do estabelecimento de metas é possibilitar uma maior compatibilidade entre os limites de qualidade estabelecidos e os atributos físico-elétricos da localidade. Com base nos índices DEC e FEC, é publicado anualmente o “Indicador de Desempenho Global”, o qual permite a comparação entre

o desempenho das diferentes distribuidoras do país. Na Figura 1.1, baseado nos dados tabulares extraídos através do site da ANEEL (<http://www.aneel.gov.br/indicadores-coletivos-de-continuidade>) é apresentado um exemplo do indicador FEC oficial das concessionárias brasileiras que distribuem energia nas regiões norte, nordeste, centro-oeste, sul e sudeste do País em que o número de unidades consumidoras seja acima de 400.000.

Figura 1.1: Evolução FEC das Distribuidoras de Energia no Brasil (2016-2018).

Na Figura 1.1 verifica-se o indicador FEC oficial total apurado de cada concessionária ao longo dos anos de 2016, 2017 e 2018. Para apurar este indicador, cada concessionária, conforme Anexo II do documento emitido pela ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” – PRODIST, Módulo 8, Revisão de nº 10, deve registrar todas as interrupções em sua rede de distribuição, discriminando o tipo de causa por ocorrência dentre outros atributos, de acordo com as informações obtidas das equipes técnicas de campo no momento do atendimento à ocorrência.

Diante desta condição, cada concessionária pode apurar por tipo de causa os indicadores de continuidade. Na Figura 1.2 a seguir, por meio das informações disponibilizadas pela concessionária EDP-SP, a qual distribui energia para 28 municípios do estado de SP, nos últimos três anos as causas relacionadas diretamente às descargas atmosféricas (011 - Descargas Atmosféricas) ou as que têm grande potencial de terem sido influenciadas pelo efeito deste fenômeno (880 - Causas não Classificadas e 890 - Causas não Determinadas) representam em média 20% das interrupções no fornecimento de energia por ano.

Baseado em dados reais, conforme Figura 1.3, verifica-se que desde 2013 as ocorrências causadas diretamente devido às descargas atmosféricas (011 - Descargas Atmosféricas) estão entre as 10 principais causas que mais contribuíram para os desligamentos não programados na rede de distribuição.

Figura 1.2: Impacto das causas relacionadas às descargas atmosféricas (2018-2019).

Figura 1.3: Contribuição em % e por causa para os desligamentos não programados (2013-2019).

Estas interrupções encadeiam em impactos econômicos e sociais, pois, acarretam multas impostas pelo órgão fiscalizador, paralizações dos setores industriais e comerciais, indenizações

aos consumidores e paralização do funcionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos do setor de saúde.

Baseado nas informações disponibilizadas pela EDP-SP, devidamente autorizada para inclusão nessa dissertação, por meio de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) regulado pela ANEEL, durante o ano de 2018, os prejuízos financeiros medidos registraram em aproximadamente um “potencial” de R\$ 290.550,00 relacionados às transgressões de DIC (Duração de interrupção individual por unidade consumidora), FIC (Frequência de interrupção individual por unidade consumidora) e DMIC (Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão). Um consumo apenas em “material”, não considerando a mão de obra, de R\$ 325.467,84 para substituição de para-raios e R\$ 887.900,00 para substituição de transformadores de distribuição avariados por descargas atmosféricas.

Estes custos totalizaram em aproximadamente R\$ 1,5 milhão durante o ano de 2018. Ressalta-se que existem outros custos que aqui não foram avaliados, mas que também podem ser gerados, como por exemplo, pedidos à concessionária por ressarcimento de danos elétricos aos consumidores, conforme regra estabelecida pelo “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional” – PRODIST, Módulo 9, – Ressarcimento de Danos Elétricos regulado pela ANEEL.

Assim, as descargas atmosféricas contribuem diretamente para as interrupções do fornecimento de energia. Estas descargas atmosféricas podem ser caracterizadas como diretas, quando atingem diretamente um ativo da rede de distribuição, ou indiretas, quando há a indução de tensão pelo campo magnético criado pela corrente de descarga incidente em um ponto próximo a esta rede. Ambas os tipos de descargas citadas causam sobretensões transitórias na rede de distribuição, sendo que as descargas classificadas como diretas originam sobretensões de amplitudes mais elevadas do que as caracterizadas como indiretas; porém, para rede de distribuição, a probabilidade de ocorrência deste tipo é baixa. Portanto, por ser de maior relevância, o foco desta pesquisa é apresentar a metodologia de cálculo das sobretensões devido às descargas atmosféricas indiretas, na qual a rede de distribuição está mais vulnerável a ser impactada.

Neste sentido, as sobretensões induzidas por descargas atmosféricas se consolida em um fenômeno que necessita de uma avaliação criteriosa, pois por meio do conhecimento de seus aspectos é possível o desenvolvimento de soluções em proteções e manutenções mais robustas para limitar seus respectivos impactos ao setor elétrico. Devido a sua relevância, muitas pesquisas em diversas partes do mundo têm sido desenvolvidas com o objetivo de melhor entender este fenômeno e propor soluções técnicas.

Essas pesquisas, geralmente estão associadas ao monitoramento, por intermédio de medições reais de tensões induzidas, ao desenvolvimento de modelos computacionais para cálculo de sobretensões induzidas e a modelos computacionais para definição dos ajustes de parâmetros de proteção do sistema elétrico de distribuição.

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.

Por tal relevância deste tema, além desta dissertação, outras 2 dissertações de mestrado foram defendidas e que representam a totalidade dos trabalhos realizados nos anos de 2016 a 2018 no âmbito do projeto de P&D. A leitura das duas dissertações citadas é de especial interesse para a compreensão total desse projeto, sendo:

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

- Pergentino Antonio, Luiz; Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a Partir de Medidas em Campo. São Carlos, 2019.

O projeto foi dividido em 6 etapas, sendo que esta dissertação focou nas etapas 1, 5 e 6. Todas as etapas são sintetizadas a seguir:

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 de sua degradação.

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 para cálculo de sobretensões induzidas frente as descargas atmosféricas fornecendo apoio à decisão para substituição preventiva de para-raios em sistemas de distribuição.

É neste contexto que se localiza esta dissertação de mestrado que objetiva desenvolver um sistema especialista, baseado no Método do Rusck com aprimoramentos, devido ao fato de este ter sido amplamente utilizado na literatura, apesar de suas limitações para a análise de situações de interesse prático. A maioria dessas limitações foi superada com sua versão aprimorada (PIANTINI, 2017).

Este sistema especialista poderá calcular as sobretensões induzidas frente às descargas atmosféricas na rede de distribuição em classe de tensão de 13,8 kV, com foco em verificar o impacto na redução da vida útil de para-raios de ZnO.

1.2.) OBJETIVO

O objetivo desta dissertação consiste em apresentar uma metodologia para o cálculo de sobretensões induzidas em sistemas de distribuição originadas por descargas atmosféricas indiretas, a qual foi implementada computacionalmente, originando um sistema especialista denominado “Franklin”. Para tanto, esta metodologia será aplicada para o cálculo das sobretensões induzidas em um modelo de degradação de para-raios de ZnO já conhecido, permitindo assim, estimar a redução de sua vida útil quando instalado em uma rede de distribuição de 13,8 kV na qual há incidências de descargas atmosféricas indiretas.

1.3.) ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Quanto à organização deste trabalho, para alcançar o objetivo proposto, a presente dissertação está estruturada em 7 capítulos e 1 Anexo, incluindo este que é o primeiro capítulo onde é feita uma abordagem introdutória ao tema da dissertação e os outros 6 descritos a seguir.

No **Capítulo 2**, a princípio são apresentados conceitos e definições essenciais tocantes às descargas atmosféricas, a respeito do que são, de como se originam as cargas nas nuvens, do raio e das descargas de origem negativas. Neste capítulo também é apresentado as peculiaridades e os parâmetros da corrente de descarga, as quantidades de descargas atmosférica de forma geral no Brasil, na região sudeste e na área que o estudo deste trabalho se baseia. Também são apresentados os tipos de incidência e seus respectivos impactos para o sistema elétrico de distribuição.

Na sequência, após esta introdução sobre as descargas atmosféricas, no **Capítulo 3** será elaborada uma revisão bibliográfica sobre os principais estudos e pesquisas relacionadas às

tensões induzidas, evidenciando a motivação dessa pesquisa por se embasar o método de Rusck. No decorrer, serão sintetizados os conceitos a respeito da corrente de retorno e seus modelos de maior impacto, bem como os mecanismos de estabelecimento do acoplamento entre linha e canal de descarga e seus principais modelos. Na sequência, serão comentados os parâmetros centrais que influenciam a amplitude e a forma de onda da tensão induzida, enfatizando e aprimorando o Modelo de Rusck.

No **Capítulo 4** são apresentados os aspectos conceituais e aprofundados relacionados aos para-raios de óxido de zinco (ZnO), com o objetivo de entender como a degradação do para-raios está correlacionada às sobretensões induzidas por descargas atmosféricas.

No **Capítulo 5** é apresentado o conceito de sistemas especialistas e seus benefícios. De forma detalhada, na sequência é apresentado o sistema especialista desenvolvido para efetuar o cálculo das sobretensões de origem atmosférica para estimação da redução de vida útil do para-raios de uma rede de distribuição. Na sequência, serão também apresentados alguns resultados dos estudos obtidos por intermédio do sistema especialista desenvolvido.

Por fim, no **Capítulo 6** são realçadas as conclusões e proposta de continuidade deste trabalho.

As referências bibliográficas citadas ao longo do texto, as quais alicerçam esta pesquisa são encontradas no **Capítulo 7**.

O **Anexo I** constitui dos ensaios realizados para definição do modelo matemático de degradação dos para-raios, o qual foi implementado no sistema especialista.

1.4.) ATIVIDADES ACADÊMICAS

Através dos estudos elaborados para o desenvolvimento desta dissertação, em razão da relevância deste tema na atualidade, no decorrer do período de mestrado alguns trabalhos foram elaborados e publicados em meios de grande importância científica, ou seja:

- ✓ VIANA, F. E.; SILVA, I. N.; FLAUZINO, R. A. Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas Frente às Descargas Atmosféricas em Para-Raios de ZnO do Sistemas de Distribuição. *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.

Capítulo 2. Conceitos Relacionados às Descargas Atmosféricas

2.1.) INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas caracterizam-se por ser um fenômeno aleatório, ainda que complexo de ser analisado, de grande importância para o setor elétrico. Isso é devido à possibilidade da ocorrência de danos permanentes ou não nos dispositivos elétricos utilizados no sistema de distribuição, causadores de distúrbios eletromagnéticos, resultando em desligamentos não programados em equipamentos da rede de distribuição. Em adição, as equipes de manutenção dificilmente conseguem identificar a origem do defeito no local quando do atendimento a uma ocorrência desta natureza. Estes desligamentos acarretam prejuízos para os consumidores residenciais, industriais, comerciais e público em geral.

Nos últimos anos, devido ao processo de aquecimento e grandes alterações climáticas pelo qual o planeta passa, a quantidade de vapor presente na atmosfera vem aumentando. Este vapor é o “combustível” das descargas atmosféricas e 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). Segundo o estudo desenvolvido pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em dezembro de 2018, aponta que, no verão dos anos de 2018/2019 no Brasil, haverá um aumento na incidência de raios nas regiões Sul (cerca de 50%) e Sudeste do país (em torno de 20% a 30%). Para uma parte do Centro-Oeste, a estimativa de aumento também é de 20% a 30%.

Neste contexto, na conjuntura deste trabalho serão apresentados conceitos e definições sobre a constituição, o desenvolvimento, e algumas características e parâmetros das descargas atmosféricas, pois o 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 sobre a rede, tais como as tensões induzidas, o que torna essencial para a determinação da proteção mais adequadas possível.

Dessa forma, no parágrafo a seguir serão descritos os conceitos básicos sobre descargas atmosféricas, como ocorre à constituição das cargas nas nuvens e dos raios, como se desenvolvem as descargas entre nuvem e o solo, a qual se observa de maior incidência

volumétrica, e quais as principais características e parâmetros da corrente de descarga. Também serão realizadas considerações sobre os mecanismos de estabelecimento de sobretensões por incidência direta e indireta de descargas atmosféricas em redes de energia elétrica.

Diante do conhecimento a respeito das descargas atmosféricas e suas contribuições para as tensões induzidas, na sequência será elaborada uma revisão bibliográfica sobre os principais estudos e pesquisas relacionadas às tensões induzidas, detalhando o modo de formação das mesmas. Por fim, serão comentados de forma resumida os parâmetros centrais que influenciam a amplitude e forma de onda da tensão induzida.

2.2.) DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Para poder entender os diferentes processos envolvendo o fenômeno das descargas atmosféricas, algumas definições e conceitos se tornam essenciais, os quais serão definidos abaixo (VISACRO, 2005).

A descarga elétrica é o 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. Quando há descarga elétrica de 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, esta se denomina então de descarga atmosférica.

O canal de descarga é o canal ionizado que liga nuvem e solo e por meio do qual evolui a corrente de retorno de descarga. A corrente que flui por este canal ionizado formado pelo canal de descarga em seguida ao fechamento é denominada corrente de retorno. A seguir serão apresentadas as definições a respeito de raio, trovão, relâmpago, índice ceraúnico e isoceraúnicas:

- **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.

2.3.) CONSTITUIÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS

Mesmo com diversos estudos, a constituição 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).

Desse modo, 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 2.1. 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 então uma concentração de cargas positivas no solo com comprimento equivalente ao da nuvem, como também se vê na Figura 2.1. 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.

Figura 2.1: Distribuição das cargas nas nuvens e no solo [adaptada de (UMAN, 1984)].

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).

2.4.) CONSTITUIÇÃO 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 então 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.

Esta pesquisa terá maior enfoque nas descargas mais severas aos estudos de proteção de sistemas elétricos, ou seja, descargas entre nuvens e o solo, e aquelas 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 2.2.

Figura 2.2: 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).

Diante disto, 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 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (UMAN, 1984).

Figura 2.3: Representação da conexão entre os canais ascendentes e descendentes (VISACRO, 2005).

A partir deste momento fica estabelecido um canal condutor ionizado ligando uma região carregada de uma nuvem à 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. Ademais, 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.

2.5.) 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 as seguintes (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 severa será então 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.

Neste âmbito, a Figura 2.4 representa uma onda característica de corrente de descarga ao longo do tempo para uma descarga nuvem-solo negativa, em que a 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 serão demonstrados a seguir.

Figura 2.4: 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)].

Ademais, na Tabela 2.1 são mostrados os dados estatísticos levantados pelo CIGRÉ (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 2.4.

- **Amplitude máxima [kA]:**

- I_{10} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 10% do valor de I_f ;
- I_{30} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 30% do valor de I_f ;
- I_{90} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 90% do valor de I_f ;
- I_{100} – ponto no qual o módulo da corrente alcança 100% do valor de I_f .

- **Tempo de frente de onda [μs]:**

- T_{10} – duração da frente expressa como o intervalo entre os instantes correspondentes a 10 % e 90 % do valor da primeira crista (o tempo de frente equivalente é igual a $T_{10}/0,8$);
- T_{30} – duração da frente expressa como o intervalo entre os instantes correspondentes a 30 % e 90 % do valor da primeira crista (o tempo de frente equivalente é igual a $T_{30}/0,6$);

- **Derivadas da corrente em relação ao tempo [kA/μs]:**

- TAN_{10} – tangente à frente no ponto correspondente a 10% do valor da primeira crista;

- S_{10} – taxa de crescimento entre os pontos correspondentes a 10 % e 90 % do valor da primeira crista;
- S_{30} – taxa de crescimento entre os pontos correspondentes a 30 % e 90 % do valor da primeira crista;
- TANG – máxima taxa de crescimento na frente.

Tabela 2.1: Parâmetros de frente da corrente [adaptada de (CIGRÉ, 1991)].

PARÂMETRO	Número de dados	Unidade	Percentagem de casos que excedem o valor da tabela		
			95 %	50 %	5 %
“Return Stroke”					
T ₁₀	80	μs	1,8	4,5	11,3
T ₃₀	80	μs	0,9	2,3	9,8
TAN ₁₀	75	kA/μs	0,6	2,6	11,8
S ₁₀	75	kA/μs	1,7	5,0	14,1
S ₃₀	73	kA/μs	2,6	7,2	20,0
TANG	75	kA/μs	9,1	24,3	65,0
P ₁ (1ª crista)	75	kA	12,9	27,7	59,5
Crista (P)	80	kA	14,1	31,1	68,5
“Strokes” Subseqüentes					
T ₁₀	114	μs	0,1	0,6	2,8
T ₃₀	114	μs	0,1	0,4	1,8
TAN ₁₀	108	kA/μs	1,9	18,9	187,4
S ₁₀	114	kA/μs	3,3	15,4	72,0
S ₃₀	114	kA/μs	4,1	20,1	98,5
TANG	113	kA/μs	9,9	39,9	161,5
P ₁ (1ª crista)	114	kA	4,9	11,8	28,6
Crista (P)	114	kA	5,7	12,3	29,2

Assim, a partir dos dados da Tabela 2.1 e de estudos específicos sobre os parâmetros das correntes de descarga, pode-se então 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 (2.1) (ANDERSON, 1982). Esta função traduz a probabilidade de I ser maior ou igual a um determinado valor i_0 em kA.

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (\frac{i_0}{31})^{2.6}} \quad (2.1)$$

2.6.) INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O conhecimento da distribuição e incidência de descargas atmosféricas em determinada região é essencial para a predição da severidade de surtos em pontos específicos do sistema elétrico de distribuição. Um meio de obterem-se tais informações é pela análise de mapas isoceraúnicos, os quais ilustram o número de dias de trovoada por ano (T_d) em uma região específica. Na Figura 2.5 são apresentados estes dados por meio das curvas isoceraúnicas para todo território.

Figura 2.5: Mapa de curvas isoceraúnicas do Brasil (NBR 5419, 2005).

Por meio deste mapa é possível obter a densidade de descargas atmosféricas para a terra (N_g), definida como o número de raios para a terra por quilômetros quadrados por ano. Sendo assim, o valor de N_g pode ser calculado para uma determinada região pela equação (2.2):

$$N_g = 0,04 \times T_d^{1,25} \text{ [km}^2\text{/ano]} \quad (2.2)$$

Neste contexto, em meio às pesquisas desenvolvidas mediante a coleta de dados de descargas atmosféricas nuvem-solo nos últimos 13 anos (1998-2010) destaca-se o mapa da Figura 2.6, sendo um dos mais atualizados da área, contendo a taxa de relâmpagos nuvem-solo no Brasil neste período (NACCARATO, 2011).

Em uma conjuntura mais atual, dentre os fenômenos averiguados pelo ELAT se sobressai o registro da formação de três raios ascendentes partindo de uma torre de transmissão de 130 metros no Pico do Jaraguá, no fim de janeiro de 2012, durante uma tempestade. Este tipo de evento nunca havia sido registrado pelos pesquisadores brasileiros, e se origina em estruturas elevadas, como torres de telecomunicação ou para-raios de edifícios altos.

Figura 2.6: Taxa de relâmpagos nuvem-solo com dados obtidos pelo sensor de imagem de descarga nos últimos 13 anos (1998-2010) e corrigidos com resolução de 0.1° (NACCARATO, 2011).

Valem ressaltar que 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 solo e 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).

2.7.) 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 será o foco principal deste trabalho.

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.

2.7.1.) Características Pertinentes à 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.

a) 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, não operando de forma correta. 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 distribuição para proteção contra o *flashover* são os para-raios, os quais são diretamente ligados às estruturas a serem protegidas e ao solo por meio dos sistemas de aterramento.

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 esta, dada pela equação (2.3).

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.3)$$

Na qual L e C representam a indutância e a capacitância da linha, respectivamente. Desse modo, como ilustrado na Figura 2.7, considerando apenas a descarga direta em uma rede de distribuição que não possui para-raios e com impedância de surto de $300 \, \Omega$, cuja corrente de descarga tenha valor de pico de $40 \, \text{kA}$ e sua onda viajante de corrente se divida em duas parcelas no momento da incidência, tem-se um valor de $6 \, \text{MV}$ para a amplitude da sobretensão (VISACRO, 2005).

Figura 2.7: Linha de distribuição sem para-raios atingida por uma descarga atmosférica direta e indireta em um de seus condutores energizados [adaptada de (CAMPOS, 2012)].

b) 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 demonstrado na Figura 2.8, 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 2.8: 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 2.8, 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 pelas equações (2.4) e (2.5) (ZANETTA, 2003).

$$\Gamma_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.4)$$

$$V_r = \Gamma_r V_i \quad (2.5)$$

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 como ilustrado na Figura 2.9. 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 2.9: 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).

c) Incidência Direta em Condutores Fase da Rede de Distribuição

Outro mecanismo de ruptura do isolamento relacionado à incidência de uma descarga atmosférica direta ocorre quando há incidência nos condutores fase, como ilustra a Figura 2.10. Neste tipo de situação é gerada uma sobretensão nos condutores fase energizados muito superior a sobretensão nas cadeias de isoladores devido à incidência direta.

Sobretensão esta, a qual pode ser de três a quatro vezes maiores que a sobretensão na cadeia de isoladores, causando a ruptura do isolamento do ar entre os condutores fase e os de blindagem.

Figura 2.10: Descarga direta em um condutor de blindagem a meio vão entre duas torres de transmissão de energia [adaptada de (VISACRO, 2005)].

O valor de amplitude da sobre-tensão 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 sobre-tensão 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 sobre-tensão estabelecida. A onda de sobre-tensão é igual ao produto da corrente que se propaga na rede pela impedância de surto da rede de distribuição.

A medida mais adequada para amenizar o surgimento das sobre-tensões é a instalação de para-raios ao longo da rede de distribuição, em média a cada 300 metros com sua respectiva instalação de condutor e malha de aterramento. Na Figura 2.11 é feita a comparação do nível de sobre-tensão em uma rede com para-raios e a outra sem para-raios (SILVA, 2007).

Figura 2.11: Comparação entre a curva de sobre-tensão com e sem a utilização do para-raios (SILVA, 2007).

2.7.2.) 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 2.12, 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.

Figura 2.12: Representação de uma linha de distribuição afeta pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica indireta [adaptada de (VISACRO, 2005)].

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

Posto isto, no contexto das análises pleiteadas por esta pesquisa a respeito das tensões induzidas por descargas indiretas, no próximo capítulo será realizado um estudo aprofundado sobre estas tensões, bem como dos fenômenos relacionados ao seu estabelecimento.

Capítulo 3. Sobreensões Induzidas Por Descargas Atmosféricas

3.1.) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos parágrafos a seguir são apresentados de forma sintetizada os trabalhos considerados mais importantes quanto aos modelos de cálculo de tensões induzidas na rede elétrica conforme alguns marcos no cronograma apresentado na Figura 3.

Figura 3.: Cronograma da revisão bibliográfica [Elaborado pelo Autor].

Ao se iniciar por Wagner (1908) no qual é apresentado um dos modelos com o objetivo de calcular as tensões induzidas em redes de energia elétrica por descargas atmosféricas. O principal parâmetro deste modelo é que as tensões induzidas são causadas pela propagação de cargas elétricas induzidas nos condutores da rede elétrica durante o processo de eletrificação das nuvens, onde seu cálculo é feito mediante a multiplicação da distância vertical da rede em relação ao solo pelo campo elétrico vertical antes das descargas, já os seus tempos de cauda e de frente são determinados pela taxa de fluxo do campo elétrico vertical.

Após 21 anos da publicação do modelo proposto por Wagner, Bewley (1929) propõe ajuste no modelo por meio da introdução do tempo de liberação das cargas elétricas, no qual os tempos de cauda e de frente da tensão induzida tem um delta maior.

No ano de 1942, aproximadamente uma década depois, Wagner & Mccann (1942) propõem um novo modelo, no qual a tensão induzida é calculada a partir do campo elétrico gerado pelas cargas no canal de descarga de retorno aplicando as equações de Maxwell. A forma de onda da corrente é adotada como um degrau, considerando o canal de descarga carregado com densidade de carga uniforme, admitindo-se a velocidade constante da descarga de retorno. Este modelo serviu de base para os modelos atuais.

Anos depois este modelo é aprimorado por meio das contribuições feita em Golde (1954) com o objetivo de maximizar as características do modelo em relação às condições reais da rede elétrica, implementando a redução exponencial da densidade de cargas ao longo do canal de descarga com a distância em relação ao solo e considera a velocidade de propagação da descarga de retorno com o tempo.

Dois anos após a contribuição de Golde (1954), Sune Rusck em sua tese de doutorado, Rusck (1957), propõe uma expressão analítica para o cálculo da tensão induzida, baseado no modelo de Mccann e Wagner. Esta expressão analítica origina-se um novo modelo, conhecido até hoje como o Modelo de Rusck, a qual considera a corrente de retorno, a qual flui pelo canal de descarga, ser a única fonte da tensão induzida. O modelo proposto por Rusck utiliza o cálculo da integral do campo elétrico devido ao anulamento progressivo das descargas estáticas armazenada no canal de descarga (potencial elétrico), chamado aqui de potencial escalar, e no fluxo da corrente de retorno pelo canal, inteirando o vetor potencial, assumindo algumas simplificações quanto à condutividade do solo e a descontinuidade da rede. Além disso, mesmo empregando algumas simplificações e embora tenham sido desenvolvidos outros trabalhos com ajustes e melhoras a partir deste, o mesmo continua sendo bem aceito e bastante utilizado. Associações renomadas como o CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems) (CIGRÉ, 1991) e o IEEE (IEEE, 2004) o adotam como método para o cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas.

Em Taylor, Satterwhite & Harrison (1965) é desenvolvido um modelo para cálculo da tensão induzida no domínio da frequência para linhas compostas por dois condutores a partir da influência entre campos eletromagnéticos incidentes e as redes de energia elétrica. Porém, para sistemas aéreos, o mesmo se aplica apenas às linhas monofásicas com retorno pela terra, a qual deve ser considerada um dos condutores do sistema neste caso. Em Chowdhuri & Gross (1967) é apresentada outra formulação para o cálculo de tensões induzidas por descargas indiretas no

domínio do tempo expressa em função das tensões induzida e indutora na rede elétrica, ao invés de se basear nos potenciais escalares totais induzidos e indutores, como havia sido feito por Rusck.

Ademais, em Agrawal, Price & Gurbaxani (1980) é equacionado um modelo no domínio do tempo para calcular as tensões induzidas em linhas aéreas com múltiplos condutores sob influência de um campo eletromagnético não uniforme.

Em Eriksson, Stringfellow & Meal (1982) são expostos os resultados de estudos de medições de sobretensões induzidas realizadas em uma linha trifásica experimental instalada na África do Sul, segundo os quais no transcorrer de dois anos de medição foram aferidas 300 sobretensões superiores a 12 kV e foram identificadas mais de 20 descargas diretas. Além disso, de acordo com os autores, somente em uma situação as sobretensões induzidas na linha ultrapassaram o valor máximo de 300 kV, o que indicava que a uso de níveis de isolamento superiores a 300 kV praticamente anularia o acontecimento de disrupções devido à sobretensões induzidas em redes com características similares à avaliada.

Ao mesmo tempo, em Anderson (1982) são apresentados no capítulo 12 os resultados de seus estudos sobre desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, sendo este um dos mais importantes documentos da área, intitulado “*Transmission Line Reference Book*”, o qual foi publicado pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*).

Em Yokoyama *et al.* (1986) são evidenciados os resultados de três anos de medição de tensões induzidas em uma linha experimental com dois condutores fase e um cabo de blindagem. Como resultados, foram identificadas vinte e quatro formas de onda de tensões induzidas geradas por descargas incidindo em duas torres próximas a linha. Também foi avaliada a influência que o aterramento do cabo de blindagem poderia causar nas tensões induzidas nos demais condutores, e foi analisada a relação entre o aterramento e a magnitude das tensões induzidas em diferentes pontos da linha.

Em CIGRÉ (1991) é publicado um relatório elaborado durante seis anos pelo Grupo de Trabalho 33.01, responsável pela área de descargas atmosféricas, pertencente à Comissão de Estudos 33, que desenvolve pesquisas na área de sobretensões e coordenação de isolamento. Este documento é um dos mais completos da área e é composto por dados de medição e parâmetros de descargas; avaliação da densidade e incidência de descarga, e da blindagem de linhas; e ainda contém representações de modelos e estudos sobre *backflashover* em linhas de transmissão.

Em Rachidi (1993) é divulgado um novo modelo para cálculo da tensão induzida no domínio da frequência cuja formulação é bastante semelhante à apresentada por Taylor *et al.* (1965) e Agrawal *et al.* (1980), mas que possuía funções forçantes definidas em termos do

campo de excitação magnético. Ressalta-se que as funções denominadas forçantes representam fatores que afetam os componentes de um determinado modelo em que são empregadas, mas não são afetadas por eles, simulando um fluxo ou estoque externo impulsionador do sistema com o qual se relaciona, sendo concebidas geralmente na forma de equações.

Concomitantemente, em Barker *et al.* (1993) é desenvolvido um estudo de monitoramento das tensões e correntes de origem atmosféricas incidentes sob os para-raios de uma rede de distribuição por meio da instalação de registradores digitais, com os quais foram coletadas mais de 1300 amostras da forma de onda da corrente e da tensão. Dentre as ondas de corrente registradas, aproximadamente 90% apresentaram valores de pico entre 0,3 e 2,6 kA, sendo a maior amplitude de corrente medida de 28 kA. Também, notou-se que nenhum dos para-raios monitorados registrou algum tipo de falha e não excedeu seu valor máximo de energia absorvida, delimitado em 12,6 kJ, registrando um valor inferior a 1 kJ em 98% dos casos.

Em Paulino (1994) é apresentada uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas em redes de distribuição aplicando o Modelo de Rusck (1957), validando seus resultados a partir da comparação com dados obtidos por medições reais. Além disso, em sua tese é estimado o desempenho de uma linha frente às tensões induzidas e é exposto um estudo de melhoria considerando a instalação de para-raios ao longo da rede elétrica, a adoção de cabos para-raios, o nível de isolamento das estruturas, e o aterramento do neutro.

Em Barker *et al.* (1996) são mostrados os resultados de uma pesquisa com o intuito de medir simultaneamente as correntes de descarga e as tensões induzidas em uma linha experimental empregando a técnica *Rocket-Triggered Lightning* para simular descargas atmosféricas próximas a linha sob análise. Neste estudo também foram aferidos os campos elétricos e magnéticos gerados e o tempo de frente das correntes de descarga, e ainda foram coletados dados de 63 correntes de descarga e de tensões induzidas. Com estes dados concluiu-se que o valor de pico das tensões induzidas era 63% maior do que o previsto pela teoria de Rusck, e os valores de pico das tensões medidas situaram-se na faixa entre 8 kV e 100 kV, correspondendo a correntes de descarga com valores máximos entre 4 kA e 44 kA, respectivamente.

Aproximadamente um ano depois, o trabalho produzido em conjunto pelo CIREN/CIGRÉ (1997) (*Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution / International Council on Large Electric Systems*) sobre proteção de redes de média e baixa tensão contra descargas atmosféricas analisa a ocorrência de sobretensões em redes secundárias devido às descargas diretas e indiretas utilizando para as simulações o programa LIOV/EMTP (*Lightning Induced Over-Voltage / Electromagnetic Transients Program*). Por meio do mesmo

averigua-se que as tensões induzidas em redes de baixa tensão apresentam valores mais baixos que aqueles encontrados na rede primária devido à presença do condutor neutro, o qual é aterrado em vãos regulares. Também se constata que a tensão induzida no condutor neutro é limitada pelo aterramento e que a mesma atinge seu valor de pico a meio vão, já que os aterramentos se localizam nas extremidades da linha. Ademais, verifica-se que a tensão induzida no condutor fase é igualmente restringida em valores baixos devido ao elevado acoplamento entre os condutores e o neutro.

Em Nucci & Rachidi (1999) é apresentada uma pesquisa com os principais questionamentos relacionando tensões induzidas por descargas atmosféricas e suas respectivas conclusões até aquele momento, segundo diversos trabalhos existentes na literatura correlata. As mais importantes conclusões apresentadas indicam que a primeira corrente de retorno é a maior responsável pela tensão induzida por causa de sua maior irradiação eletromagnética, e que a magnitude desta tensão depende expressivamente dos parâmetros da corrente de retorno, da distância, da posição relativa e da configuração da linha. Ainda apontam que a distância de abrangência em que pode haver desligamentos por tensões induzidas depende da severidade da descarga, da configuração da linha, da condutividade do solo e do nível de isolamento, e que a instalação de cabos para-raios pode reduzir a magnitude da tensão induzida de 20 a 40 %.

Em Martinez, Gonzalez-Molina & Chowdhuri (2000) são expostos os resultados da comparação de vários métodos utilizados para cálculos de taxas de desligamentos de linhas de distribuição frente às descargas atmosféricas diretas e indiretas. São analisadas a presença e ausência de cabos blindados admitindo-se a resistividade do solo ideal, e é demonstrado que a velocidade da corrente de retorno também pode influenciar no desempenho de linhas de distribuição.

A seguir, em Silva (2001) é implementada uma rotina para cálculo de tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas por meio do programa de cálculo de transitórios eletromagnéticos EMTP baseada no Modelo de Rusck por meio da utilização de fontes de corrente distribuídas ao longo da linha sob análise. Além disso, com a finalidade de validar seus resultados, foram realizadas simulações empregando o modelo desenvolvido e comparadas com dados obtidos por Yokoyama *et al.* (1985) e Barker *et al.* (1996).

Em Piantini & Janiszewski (2003) é desenvolvida uma nova metodologia para cálculo de tensões induzidas baseada no Modelo de Rusck com alguns ajustes, denominada Modelo de Rusck Estendido. Em sua formulação é considerado o efeito do comprimento finito do canal da descarga e da linha sob análise no cálculo dos campos eletromagnéticos, além de ser possível o

estudo de descargas ascendentes com sua aplicação, mas ainda se admite o solo como um condutor perfeito.

Em Pokharel, Ishii & Baba (2003) é mostrado um modelo para estimação da tensão induzida empregando o código NEC (*Numerical Electromagnetic Code*). Com o mesmo se pode assumir o solo como um condutor perfeito ou como um meio de condutividade finita, calculando-se a distribuição de corrente e o acoplamento eletromagnético entre canal e linha em conjunto e trabalhando-se com os parâmetros no domínio da frequência.

Em Thomazella (2004) apresenta-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para análise e estimação de tensões induzidas em linhas de distribuição, empregando o software ATP (*Alternative Transients Program*) em conjunto com uma rotina desenvolvida em Visual Basic. Para tanto, foi implementado o Modelo de Rusck no ATP fazendo uso da subrotina existente na versão MICROTRAN (MICROTRAN, 1991) do EMTP denominada de CONNEC, pois com a mesma foi possível usar o método da compensação para tratar os elementos não lineares.

Logo após, em Visacro & Soares Jr. (2005) é exposta a formulação do modelo HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) por eles elaborado para cálculo de tensões induzidas no domínio da frequência. Este modelo foi estabelecido a princípio para análise de aterramentos, mas foi aprimorado para ser capaz de reproduzir a evolução do envelope de corona, calcular o acoplamento eletromagnético nos trechos de linha, e variar a velocidade de propagação da onda de corrente no canal de descarga.

Em Conti (2006) é apresentado um novo modelo de corrente de retorno chamado de DNUTL (*Dynamic Non-Uniform Transmission Line Model*), que é capaz de representar o canal de descarga como uma linha de transmissão não uniforme com parâmetros variáveis no tempo. Com este modelo foram realizadas análises a fim de identificar a influência da variação temporal e espacial da resistência e da capacitância do canal na propagação da corrente de retorno nos campos eletromagnéticos associados e em tensões induzidas em linhas aéreas. Além disso, em sua dissertação foi implementada uma metodologia para o cálculo de tensões induzidas no domínio do tempo adotando o modelo de acoplamento de Taylor/Agrawal e empregando o software ATP, com a finalidade de estimar a influência de diversos parâmetros nas tensões e correntes resultantes em um sistema de distribuição típico. Através dos resultados obtidos foram analisados os efeitos de descargas diretas e indiretas no sistema avaliado e foi feita uma caracterização do desempenho de para-raios de média tensão em termos da corrente e energia associadas.

A seguir, em Silva Neto & Piantini (2007) é desenvolvido um estudo sobre as características das sobretensões geradas por descargas atmosféricas próximas a uma linha de distribuição de baixa tensão, utilizando o modelo ERM (*Extended Rusck Model*) para cálculo das tensões induzidas. Além disso, foi avaliada a influência de alguns parâmetros sobre a amplitude e forma de onda da tensão induzida, tais como: altura do condutor fase, posição do ponto de incidência da descarga e do ponto de medição da tensão induzida, distância entre os pontos de aterramento do condutor neutro, e o comprimento do ramal de ligação.

Ao mesmo tempo, em Borghetti, Nucci & Paolone (2007) é demonstrado um procedimento para avaliação de desempenho de linhas aéreas de distribuição definido a partir da estimativa do número anual de descargas induzidas por flashovers em relação à tensão crítica de flashovers nos isoladores da linha, comparando o método proposto com o adotado pelo Guia IEEE Std. 1410 (IEEE, 2004). Observa-se neste trabalho que os dois processos se diferem principalmente nos modelos adotados para avaliar as tensões induzidas e na aproximação estatística da corrente de pico de descarga. Também é notado que o procedimento do IEEE usa a fórmula simplificada de Rusck, enquanto a metodologia proposta emprega um método denominado LIOV-MC, que se baseia na aplicação do método de Monte Carlo e do programa LIOV.

Concomitantemente, em Barbosa & Paulino (2007) é proposta uma melhoria ao Modelo de Rusck ao implementar em sua formulação a consideração da condutividade finita do solo, resultando em uma expressão no domínio do tempo que possibilita o cálculo do campo elétrico radial devido à descarga de retorno. Além disso, em virtude desta formulação se basear em funções elementares, o campo elétrico pode ser calculado de maneira relativamente simples em diferentes pontos ao longo da linha, o que a torna uma ferramenta muito conveniente para o cálculo de tensões induzidas. Os resultados obtidos com a aplicação desta metodologia confirmam-se em comparações com dados obtidos em estudos desenvolvidos por Rubinstein (1996).

Em Paulino *et al.* (2010) é apresentada uma formulação para estimação da tensão induzida em uma linha infinita considerando a influência da resistividade do solo, baseando-se em Rusck (1957) para computar o campo elétrico vertical, em Barbosa (2007) e Barbosa *et al.* (2008) para calcular o campo elétrico horizontal, e em Agrawal (1980) para avaliar o acoplamento eletromagnético. Ademais, os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais expostos em Barker *et al.* (1996) para fins de validação. Também é apresentada uma extensão da metodologia proposta no Guia IEEE Std. 1410 (IEEE, 2004) para incluir o

efeito da condutividade finita do solo na avaliação do desempenho de linhas de distribuição devido à incidência de descargas próximas.

Em Paulino *et al.* (2011) é exposta uma nova formulação aproximada com ajustes e melhorias para estimar o valor de pico da tensão induzida por descargas atmosféricas em linhas infinitas. Para este fim, considera-se a resistividade do solo e adota-se a corrente de retorno em uma forma trapezoidal com tempo de frente de 3,8 s e velocidade de propagação de 120 m/s. A nova fórmula é utilizada em uma abordagem probabilística e seus resultados são comparados com dados teóricos e experimentais disponíveis em Borghetti *et al.* (2007) e Eriksson *et al.* (1982), os quais mostram sua concordância e eficiência na aplicação da forma de onda trapezoidal.

Em Mota (2011) é apresentada uma metodologia para cálculo das sobretensões induzidas baseada no Modelo de Rusck (RUSCK, 1957), a qual é implementada no software ATP e seus resultados são comparados com medições realizadas por Barker *et al.* (1996) a fim de validá-los. Além disso, são realizadas análises da propagação da tensão induzida por uma linha de transmissão e da influência de alguns parâmetros em sua amplitude e forma de onda.

Em Andreotti, Pierno & Rakov (2015) é desenvolvida uma ferramenta para cálculo de tensões induzidas por raios em sistemas de potência, no qual foi validado o modelo com dados experimentais e resultados de procedimentos analíticos encontrados na literatura, também utilizando o embasamento do método de Rusck.

Em Piantini (2017) é proposto um procedimento para estender o modelo de Rusck ao caso de uma condutividade finita do solo, de modo a permitir o cálculo de transientes induzidos por raios em linhas aéreas, levando em consideração os parâmetros elétricos do solo. A validade do modelo é demonstrada por meio de comparações de resultados de simulação com tensões e correntes induzidas por raios obtidas a partir de modelos em escala e experimentos com raios desencadeados por foguetes.

Em Silva (2018) é desenvolvido um estudo para avaliar o comportamento de isoladores de distribuição de média tensão quando sujeitos às sobretensões atmosféricas bipolares oscilatórias. Nesse estudo as simulações para cálculo de sobretensão é feita baseada no modelo de Rusck, porém também aprimorado.

3.1.1.) A Utilização do Modelo de Sune Rusck

No item 3.1.) foram apresentadas enriquecidas contribuições para a metodologia de cálculo de sobretensões devido às descargas atmosféricas, entretanto essa pesquisa se baseará no modelo de cálculo de sobretensão proposto por Sune Rusck em 1957, porém com aprimoramento, pois o modelo de Rusck tem sido amplamente utilizado na literatura, apesar de

suas limitações para a análise de situações de interesse prático. A maioria dessas limitações foi superada com sua versão aprimorada (PIANTINI, 2017). Após a contribuição feita por Sune Rusck, outras pesquisas foram desenvolvidas, e em sua maioria, alicerçadas na teoria de Rusck, porém aprimoradas para cada necessidade específica.

3.1.2.) Formação das Tensões Induzidas por Descargas Indiretas

O processo de formação de tensões induzidas por descargas indiretas, segundo Visacro (2005) se inicia com a conexão dos canais ascendente e descendente da descarga, a partir da qual passa a fluir uma corrente pelo canal de descarga gerando um campo eletromagnético que atinge a rede elétrica e demais obstáculos próximos ao seu ponto de incidência. Ressalta-se que a distribuição desta corrente pela extensão do canal de descarga e seu desenvolvimento no tempo estão sujeitos a vários fatores, que incluem as características do canal nos períodos que antecedem esta conexão e de aspectos dinâmicos. Além disso, a princípio, somente os elementos do canal de descarga adjacentes ao ponto de acoplamento contribuem com a intensidade do campo eletromagnético estabelecido. Entretanto, à medida que a corrente se desloca pela linha novos elementos passam a contribuir para o mesmo, observando-se, contudo, os atrasos em virtude do tempo de propagação entre a localização do elemento no canal e a linha. Dessa forma, o campo formado passa a atingir toda a linha com o transcorrer do tempo, estabelecendo em cada ponto da mesma uma sobretensão que se propaga em conjunto com uma sobrecorrente adjunta. Posto isto, a tensão induzida em cada ponto da linha pode ser definida de forma simplificada como a solução do cálculo da integral do campo elétrico em um percurso vertical entre os condutores e o solo ou entre condutores. Pode-se também fixá-la como o resultado, em determinado ponto, da superposição entre a onda de tensão originada pela influência direta da descarga neste ponto e a onda conduzida por propagação na linha a partir de outros pontos anteriormente irradiados pelo canal de descarga para o ponto em questão.

Ainda a partir de Visacro (2005) depreende-se que a onda de tensão induzida possui tempo de crescimento de frente diretamente relacionado ao tempo de crescimento da onda de corrente da descarga de retorno. Isto se deve ao fato de que após terem atingido seus valores de pico aproximadamente ao mesmo tempo, em seguida a amplitude da variação da corrente decresce substancialmente em comparação com os instantes iniciais da descarga e a tensão induzida decresce rapidamente se anulando depois de um curto período. A Figura 3.1 demonstra a ocorrência deste acontecimento e evidencia a ampla influência do campo eletromagnético originado durante o intervalo de tempo de frente da onda de corrente.

Figura 3.1: Onda de corrente da descarga de retorno e da tensão induzida medidas em uma linha de distribuição experimental (BARKER *et al.*, 1996 *apud* VISACRO, 2005).

Cabe enfatizar que as sobretensões geradas por descargas indiretas possuem intensidade menor que as causadas por descargas diretas e tempo de subida ao pico de tensão também menor, porém, mesmo assim são capazes de atingir à ordem de centenas de kV em poucas dezenas de microssegundos. Além, pode-se destacar que a aproximação do solo como um condutor perfeito implica em menores níveis de sobretensões, ou seja, quanto menor a condutividade do solo, maior será a magnitude da sobretensão.

Para estudos e análises de engenharia, as etapas de estabelecimento das tensões induzidas de maior relevância são a fase a partir da qual passa a fluir a corrente de retorno pelo canal de descarga e o momento em que ocorre o acoplamento entre rede e o canal de descarga. Logo, o entendimento da ocorrência desse fenômeno requer o estudo da distribuição temporal e espacial da corrente de retorno ao longo do canal de descarga e do acoplamento eletromagnético entre tal canal e os condutores da rede elétrica a ser analisada.

Para descrever os parâmetros e características destes dois fatores relacionados à corrente de retorno, foram desenvolvidos por diferentes pesquisadores os modelos de corrente de retorno. Os mesmos definem, a princípio, a variação da amplitude e da forma de onda de corrente ao longo do canal de descarga, e terão seus pormenores comentados na seção a seguir, bem como, igualmente, serão apresentados os conceitos sobre a dinâmica de estabelecimento da corrente de retorno.

Conhecidos os aspectos relativos à corrente de retorno se faz necessário determinar o campo eletromagnético gerado ao redor do canal de descarga, e para tanto se considera o canal como uma composição de elementos filamentosos de corrente. Nesta configuração cada um destes elementos é considerado uma fonte de campo que ao ter seus efeitos superpostos delimitam a região de abrangência do campo eletromagnético incidente estabelecido.

Assim, havendo corpos condutores, como redes de distribuição, nas adjacências do ponto de incidência da descarga, o acoplamento eletromagnético entre as redes energizadas e o canal de descarga passa a ser o responsável pela influência mútua entre os mesmos. O campo eletromagnético gerado leva ao surgimento das tensões induzidas nestes corpos, e consequentemente define a amplitude e forma da tensão induzida originada pela descarga indireta.

Deste modo, devido à sua grande importância para o desenvolvimento de estratégias de simulações de tensões induzidas, os tipos e modelos de acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga serão demonstrados a seguir.

3.1.3.) Corrente de Retorno no Canal de Descargas

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. Dessa maneira, devido à importância da corrente de retorno no processo de assentamento da tensão induzida, o seu método de estabelecimento será apresentado a seguir, bem como sua distribuição ao longo do canal de descarga por meios dos modelos de corrente de retorno.

3.1.3.1. Dinâmica de Estabelecimento da Corrente de Retorno

O entendimento dos procedimentos físicos envolvidos no estabelecimento da corrente no canal de descarga e dos acontecimentos posteriores à conexão dos canais ascendentes e descendentes é fundamental para formulação dos modelos de corrente de retorno, mas para tanto são necessárias algumas simplificações que serão mencionadas no decorrer desta seção, fundamentadas em Visacro (2005).

A explicação deste processo se baseará na Figura 3.2, que ilustra de maneira simples a dinâmica do estabelecimento da corrente de retorno depois da conexão entre os canais ascendentes e descendentes de uma descarga atmosférica negativa descendente. Segundo a mesma, admite-se o canal como sendo uma linha de transmissão vertical onde é injetada uma corrente impulsiva no ponto de conexão entre os canais, e em que o condutor da linha é composto por um núcleo condutivo de plasma que está envolto em uma camada de corona. Esta camada de corona é gerada pela alta densidade de cargas acumuladas ao longo do canal de descarga envolvendo o núcleo do mesmo, “alimenta” a corrente de retorno promovendo a sua gradual neutralização, e é também denominada de envelope de corona.

Figura 3.2: Passos iniciais da dinâmica de estabelecimento da corrente de retorno no canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].

O processo se inicia com a formação de duas ondas de corrente de amplitude positiva no ponto de conexão, uma ascendente (onda A) e outra descendente (onda B), as quais se deslocam em direções opostas ao longo do canal, como se vê pelo primeiro passo da Figura 3.3. Cabe lembrar que neste caso admite-se a corrente no sentido do solo para a nuvem como sendo positiva, ou de forma equivalente, assume-se elétrons fluindo para o solo.

Além disso, conforme mostrado pelo primeiro passo, a onda A tem um longo caminho a percorrer até chegar à nuvem, enquanto a onda B percorre um caminho menor já que o ponto de conexão geralmente ocorre próximo ao solo. Contudo, ambas se deslocam com uma velocidade relativamente reduzida devido à fraca ionização do núcleo do canal e porque o mesmo ainda se encontra envolto pelo envelope de corona.

Já de acordo com o segundo passo, ao incidir no solo, uma parte da onda B é transmitida, sendo esta dissipada na terra, ao passo que a outra parte é refletida dando origem a uma onda C ascendente positiva, assim como a onda A. Esta onda C se propagará ao longo do canal defasada no tempo em relação à onda A, mas com velocidade maior, uma vez que parte do envelope de corona se dissipou e o núcleo do canal já se encontra mais ionizado. Isto acontece porque com o fluxo das ondas A e B ocorre a drenagem das cargas previamente aglomeradas no envelope de corona e a consequente elevação no nível de ionização do núcleo do canal.

Em virtude da diferença de velocidade entre as ondas A e C as mesmas se encontraram em um ponto acima do ponto de conexão, no qual a onda C sofre reflexão, sendo apenas parcialmente transmitida, originando uma nova onda descendente, onda D. A onda D se propaga com sentido para baixo no canal e depois de um determinado intervalo de tempo atinge o solo,

sofrendo nova reflexão positiva de corrente e transmissão parcial, como pode ser visto pelo terceiro passo.

A reflexão da onda C e o surgimento da onda D acontecem porque as regiões do canal abaixo e acima desse ponto de encontro da onda A com a onda C apresentam características distintas. Este fato ocorre uma vez que o canal da parte superior ainda está sob grande influência do envelope de corona, que possui um raio com valor significativo, além de apresentar uma ionização ainda inicial, enquanto o canal da parte inferior encontra-se com núcleo bastante ionizado e seu raio de envelope de corona reduzido.

Estas etapas de reflexão, transmissão e propagação de onda vão se desenvolvendo sucessivamente até que ocorra a extinção da corrente, ficando estabelecida dessa maneira a distribuição da corrente de retorno ao longo do canal de descarga. Cabe destacar que a onda de corrente resultante pode possuir forma e amplitude variadas em função do seu tempo de tráfego, sendo a mesma composta pela superposição das ondas viajantes descritas em qualquer ponto do canal de descarga.

O processo descrito anteriormente é característico da primeira descarga, e para as descargas subsequentes o mesmo se verifica de forma um pouco diferente, pois nestas condições a conexão entre os canais ascendente e descendente acontece muito próxima ao nível do solo. Isto faz com que o canal ascendente praticamente não exista, o que torna bastante simplificada a dinâmica de estabelecimento da onda de corrente de retorno de descargas subsequentes, uma vez que apresentam somente uma onda ascendente e, conseqüentemente, não há reflexões. Ademais, em virtude de já ter havido um fluxo de corrente de retorno pelo canal, a nova corrente se propaga pelo mesmo em função do elevado nível de ionização e com reduzido valor para o raio do envelope de corona. Tal fato ocorre devido à menor concentração de cargas em relação à primeira descarga, fazendo-se com que a velocidade de propagação desta corrente seja maior e mais próxima da velocidade da luz.

Dentre as simplificações adotadas no processo acima descrito, destaca-se a consideração da injeção de uma onda de corrente no ponto de conexão entre os canais ascendente e descendente. Isto porque, esta onda que se propaga ao longo do canal de descarga é, na verdade, consequência do descarregamento das cargas acumuladas no envelope de corona ao redor do canal, e não de uma fonte de corrente.

Por fim, outra simplificação importante refere-se à adoção do canal de descarga como um condutor de uma linha de energia elétrica, quando, na realidade, o mesmo é formado por um núcleo de boa condutividade e raio reduzido, envolto pelo envelope de corona. Contudo, este

canal possui condutividade bem menor que dos condutores de redes de energia e apresenta um comportamento dinâmico no tempo dado pelo nível de ionização do núcleo do canal.

3.1.3.2. Modelos de Corrente de Retorno

Os modelos de corrente de retorno descrevem a distribuição de corrente ao longo do canal de descarga com a finalidade de estimar a influência da mesma nos sistemas elétricos de potência, e habitualmente são classificados em quatro categorias (RAKOV, 2001), a saber:

- Modelos físicos;
- Modelos de engenharia;
- Modelos eletromagnéticos;
- Modelos de circuitos a parâmetros distribuídos.

Os modelos físicos são fundamentados em equações dinâmicas de gases, as quais representam a conservação da massa, do momento e da energia no canal de descarga. Utilizam como principais parâmetros de entrada e saída a pressão, a temperatura e a resistência do canal, e distinguem-se por serem os modelos mais complexos dentre os quatro citados (RAKOV; UMAN, 1998).

Os modelos de engenharia se caracterizam pela simplicidade adotada em sua formulação e por serem os mais empregados em estudos de modelagem da corrente de retorno. Também se distinguem por definir a forma da mesma em qualquer ponto do canal de descarga e em qualquer instante de tempo de maneira diretamente relacionada à corrente injetada na base do canal através da utilização de funções analíticas (NUCCI *et al.*, 1990; RAKOV; UMAN, 1998). Nestes modelos é analisada a concordância entre os aspectos eletromagnéticos gerados pela distribuição de corrente sem detalhamentos dos aspectos físicos envolvidos e são adotadas simplificações. Dentre estas simplificações destacam-se a consideração da velocidade de propagação da frente de onda da corrente como constante, a adoção da redução da amplitude da onda de corrente de retorno de forma exponencial, e em alguns casos a desconsideração da atenuação de tal amplitude ao longo do canal.

Os modelos eletromagnéticos caracterizam-se por representarem o canal de descarga como uma antena com perdas formada por um conjunto de dipolos, nos quais a propagação da corrente de retorno ao longo do canal é modelada por meio da solução numérica das equações de Maxwell a partir do início do fluxo de corrente. Estes modelos também se diferenciam dos demais por terem maior generalidade de aplicação e por sua aplicação não necessitar da adoção de circuitos equivalentes para descrição do complexo processo das descargas atmosféricas (BABA; ISHII, 2001).

Os modelos de circuitos a parâmetros distribuídos, em sua grande maioria, adotam o canal de descarga como uma linha de transmissão vertical uniforme em sua modelagem. Entretanto, em alguns casos representam o canal como uma linha não uniforme, composta por uma sequência de circuitos cujos parâmetros por unidade de comprimento variam com a altura ao longo do canal (ALMEIDA, 2002; RODÓN *et al.*, 2002). Além disso, nestes modelos são atribuídos valores por unidade de comprimento da linha para alguns parâmetros, tais como resistência, indutância, capacitância e condutância, em função de perdas e da geometria assumida. Utilizando-se os mesmos, calcula-se a distribuição da corrente ao longo do canal em função do tempo e da altura, empregando-se a teoria de ondas guiadas em linhas de transmissão.

Posto isto, conhecidos o processo de formação da corrente de retorno e seus modelos, cabe agora partir para a análise do acoplamento eletromagnético entre linha e canal e de seus modelos empregados em estudos envolvendo o fenômeno das tensões induzidas.

3.2.) ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO ENTRE LINHA E CANAL DE DESCARGA

Após o estabelecimento da corrente de retorno ao longo do canal de descarga surge um campo eletromagnético que origina ondas de tensão e de corrente, em linhas próximas ao ponto de incidência da descarga, a partir do mecanismo de interação entre linha e canal denominado acoplamento eletromagnético.

Dessa forma, os tipos de mecanismo de acoplamento entre linha e canal de descarga e os principais modelos de acoplamento para cálculo da tensão induzida empregados em implementações e simulações presentes na literatura são apresentados nas seções seguintes.

3.2.1.) Tipos de Mecanismos de Acoplamento Eletromagnético

Para análise e tipificação dos mecanismos de acoplamento é necessário assumir a segmentação do canal e da linha durante o fluxo de corrente ao longo do canal como mostrado na Figura 3.3, na qual o *j-ésimo* segmento se refere ao canal de descarga e o *i-ésimo* segmento à linha, considerada nesta situação como um condutor metálico isolado do solo.

Figura 3.3: Condição inicial para a representação do estabelecimento do acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].

Dessa forma, baseando-se em Visacro (2005), a seguir, serão descritos os quatro tipos de mecanismo de acoplamento envolvendo campos elétricos e magnéticos entre linha e canal associados à ocorrência de tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas, os quais são expostos na Figura 3.4 e subdivididos em:

- (i) **Acoplamento Elétrico:** este mecanismo se forma entre o *j-ésimo* e o *i-ésimo* segmentos de duas formas, uma de natureza capacitiva e outra resistiva, porém no ar há ampla predominância do efeito capacitivo.
- (ii) **Acoplamento Magnético:** este tipo de conexão ocorre devido ao fluxo de corrente de retorno pelo canal de descarga fazendo surgir um campo magnético induzido, cujas linhas enlaçam os percursos fechados pelos condutores da linha e da superfície do solo ao seu redor.
- (iii) **Acoplamento Irrradiado:** este processo de ligação acontece em virtude da variação muito rápida da corrente de retorno no tempo, o que promove o efeito de irradiação associado à propagação de uma onda eletromagnética a partir do canal, a qual ao atingir uma linha induz tensão na mesma.
- (iv) **Acoplamento Condutivo:** por meio do desenvolvimento do fluxo da corrente de retorno pelo canal acontecem quedas de tensão de caráter resistivo e indutivo, e institui uma continuidade elétrica entre canal e solo promovendo o surgimento do acoplamento condutivo associado ao efeito longitudinal no canal e divergente no solo.

Figura 3.4: Representação do estabelecimento dos quatro tipos de acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].

3.2.2.) Modelos de Acoplamento Eletromagnético entre Rede e Canal de Descarga

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.

Dentre os modelos mais conhecidos e há mais tempo desenvolvidos destacam-se os modelos de Rusck (RUSCK, 1957), Taylor (TAYLOR *et al.*, 1965), Agrawal (AGRAWAL *et al.*, 1980), Rachidi (RACHIDI, 1993) e Chowdhuri (CHOWDHURI; GROSS, 1967). Os mesmos possuem formulações semelhantes, mas diferem quanto a algumas simplificações adotadas e à forma como são representadas suas funções a partir das componentes do campo eletromagnético.

Uma característica comum a estes cinco modelos é que eles adotam o modo de propagação TEM (*Transverse Electromagnetic*) para as ondas de tensão e de corrente induzidas na linha, o que reduz o emprego dos mesmos a situações em que os condutores são horizontais e paralelos ao plano do solo. Além disso, ao aplicar o modelo TEM deve-se admitir que as

dimensões transversais da linha sejam inferiores ao menor valor do comprimento de onda do fenômeno sob análise. Isto implica em considerar a linha composta por vários segmentos ligados em cascata e atingidos progressivamente pelo campo eletromagnético incidente a fim de calcular as tensões induzidas na linha.

Ainda neste contexto, foram criados os modelos HEM (VISACRO; SOARES Jr., 1996) e NEC-2 (POKHAREL *et al.*, 2003), os quais foram formulados por meio de soluções numéricas baseadas nas equações de Maxwell. Tal fato lhes permite considerar condutores com orientação espacial arbitrária no cálculo de tensões induzidas, não se limitando a situações em que os condutores são horizontais e paralelos ao plano do solo.

Recentemente, um novo modelo intitulado ERM (PIANTINI, JANISZEWSKI; 2003) foi desenvolvido a partir do Modelo de Rusck, porém sua formulação apresenta algumas modificações para que seja possível considerar o tamanho finito do canal e da linha, e o formato da linha sob estudo.

Desse modo, a seguir serão apresentadas de forma sucinta descrições e definições dos modelos Taylor, Agrawal, HEM, NEC-2, ERM e Rusck, utilizando para isto, além das referências dos respectivos modelos, as pesquisas publicadas por Silveira (2001, 2006) e Felipe (2007).

a) Modelo de Taylor

O modelo de Taylor (TAYLOR *et al.*, 1965) foi desenvolvido no domínio da frequência com a finalidade de calcular a tensão induzida a partir do equacionamento da influência entre campos eletromagnéticos incidentes e linhas compostas por dois condutores. Entretanto, no caso de sistemas aéreos de transmissão, a formulação proposta por este modelo se reduz à aplicação para linhas monofásicas com retorno pela terra, e neste caso deve-se considerar a terra como um dos condutores do sistema.

Desse modo, por meio das particularidades deste modelo, as características elétricas do solo podem ser incluídas em estudos que o empreguem desde que se utilizem parâmetros variáveis na frequência, ainda que a resistividade do solo em questão não seja nula.

b) Modelo de Agrawal

O modelo proposto por Agrawal (AGRAWAL *et al.*, 1980) calcula, no domínio do tempo, as tensões induzidas em linhas aéreas com múltiplos condutores situadas em um meio homogêneo e excitadas por um campo eletromagnético não-uniforme. Para tanto, foi adotado a integral de linha do campo elétrico entre dois pontos em um plano transversal independente do caminho com a finalidade de expressar o campo elétrico transversal como o gradiente do potencial escalar. Também se admitiu o fluxo magnético por meio de uma faixa de uma

superfície cilíndrica passando por dois pontos em qualquer plano z constante e independente do contorno da faixa.

Além disso, o modelo de Agrawal constituindo-se de forma semelhante ao modelo de Taylor, uma vez que suas formulações e grandezas são bastante parecidas, ao mesmo tempo, difere-se por trabalhar com parâmetros concentrados, enquanto Taylor emprega parâmetros distribuídos em sua modelagem.

c) Modelo HEM

O modelo HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) (VISACRO; SOARES Jr., 2005) foi desenvolvido a princípio com o intuito de avaliar o comportamento de sistemas de aterramento, e posteriormente por meio de novos estudos foi incrementado e passou a ser empregado em análises de distúrbios em sistemas elétricos frente à ocorrência de descargas atmosféricas.

Para estudos de tensões induzidas, este modelo assume um condutor decomposto em diversos segmentos, os quais possuem uma componente de corrente transversal (I_T) e uma componente longitudinal (I_L), consideradas constantes para um determinado segmento e podendo apresentar variação de um segmento para o outro. O mesmo ainda é capaz de reproduzir os desdobramentos do envelope de corona por meio do incremento do raio do canal para a corrente transversal, e calcular o acoplamento eletromagnético para cada par de segmentos com inserção do efeito de propagação de ondas e da influência do solo em relação aos condutores avaliados. Igualmente, está apto a modificar a velocidade de propagação da onda de corrente no canal por meio da alteração dos valores de permissividade elétrica e permeabilidade magnética do meio que circunda o canal.

Este modelo trabalha com parâmetros no domínio da frequência, mas suas tensões e correntes resultantes podem ser obtidas no domínio do tempo por meio da aplicação da Transformada de Inversa de Fourier. Uma de suas grandes vantagens consiste no fato de computar a distribuição de corrente ao longo do canal de descarga ao mesmo tempo em que define o acoplamento eletromagnético entre linha e canal.

Entretanto, o modelo HEM tem uma limitação quanto à representação do desempenho dinâmico do canal, pois foi desenvolvido no domínio da frequência, o que compromete sua capacidade em simular características como a variação temporal da resistência do canal e a diminuição do raio de corona à medida que a corrente se propaga ao longo do canal.

Segundo o modelo HEM, a propagação da corrente de retorno ao longo do canal de descarga cria um campo elétrico conservativo relacionado à corrente transversal de natureza divergente e um campo elétrico não conservativo relativo à corrente longitudinal, os quais originam as tensões induzidas nas linhas de transmissão e distribuição. Estas tensões, por sua

vez, são calculadas pela integral do campo elétrico total estabelecido, ou seja, pela soma das parcelas do campo elétrico conservativo e não conservativo, Modelo NEC-2

Inicialmente a modelagem NEC (*Numerical Electromagnetic Code*) foi desenvolvida por Burke E Poggio (1977) para a avaliação dos campos eletromagnéticos gerados em torno de segmentos condutores, sobretudo em estudos relacionados a antenas. Mas devido a seu código ser de domínio público, novos modelos foram implementados e aplicados a outros problemas a partir do modelo original, como o modelo de interesse da presente pesquisa, o qual se relaciona a aplicações para cálculo de tensões induzidas como empregado em Pokharel *et al.* (2003) e Baba & Ishii (2001, 2003).

Neste contexto, destaca-se o modelo NEC-2 (POKHAREL *et al.*, 2003), o qual trabalha no domínio da frequência e pode representar o solo como um condutor perfeito ou como um meio de condutividade finita. O mesmo ainda é capaz de computar de forma integrada a distribuição de corrente ao longo do canal de descarga e o acoplamento eletromagnético, entre canal e linha, sem a necessidade de usar um modelo de acoplamento específico, assim como o modelo HEM. Além disso, para este modelo é preciso determinar a resistência e indutância por unidade de comprimento do canal para calcular a distribuição da corrente ao longo do mesmo. E assim empregar o Método dos Momentos (HARRINGTON, 1968) em equações integrais para os campos elétricos e magnéticos com a finalidade de determinar os campos eletromagnéticos gerados.

Para a implementação deste modelo são usadas fontes de tensão para promover a excitação do sistema, obtendo-se as correntes induzidas para cada segmento da estrutura sob análise e, conseqüentemente, calculam-se suas respectivas tensões induzidas.

d) Modelo ERM

O modelo ERM (*Extended Rusck Model*) foi idealizado por Piantini e Janiszewski (2003) a partir de um estudo realizado por ambos e apresentado em Piantini e Janiszewski (1996). Segundo o mesmo, analisando diferentes teorias para cálculo de tensões induzidas, conclui-se que o Modelo de Rusck, embora alcance resultados consistentes, possui algumas restrições em virtude das simplificações que são assumidas em sua modelagem e que necessitam ser melhoradas.

O modelo ERM foi desenvolvido a partir do Modelo de Rusck para superar estas restrições, permitir a avaliação da incidência de descargas em objetos elevados e em componentes metálicos, e considerar a presença de condutor neutro ou multi-aterrado e de equipamentos como transformadores e para-raios nas linhas sob análise. Ao mesmo tempo, este modelo admite estudos envolvendo linhas com várias secções de diferentes direções,

consideradas por meio da evolução dos atrasos de propagação para os componentes elementares de tensão, que determinam a tensão induzida em um dado ponto da linha.

O cálculo de tensões induzidas pelo modelo ERM baseia-se na determinação dos potenciais elétrico e magnéticos gerados pelas cargas e corrente ao longo do canal de descarga. O potencial elétrico, associado com as cargas, atua como uma fonte distribuída e é responsável pela geração de ondas que se propagam ao longo dos condutores. Por outro lado, o potencial magnético, relativo às correntes, contribui com seu derivativo de tempo do total da tensão induzida em cada ponto da linha (PIANTINI, 2008).

Desse modo, como exposto em Piantini (2008), considerando uma descarga em uma estrutura metálica elevada, pelo modelo ERM assume-se que a corrente na estrutura e no canal de descarga possui mesma magnitude e polaridade, mas diferentes velocidades e direções de propagação. Isto se deve ao fato de a corrente através da estrutura se propagar a uma velocidade muito próxima à da luz no espaço livre, enquanto no canal sua velocidade é uma fração desse valor. Sendo assim, a tensão induzida em uma linha nas proximidades de uma estrutura metálica é obtida pela soma da componente eletrostática com a componente magnética, como mostrado pela equação (3.1).

$$U(x, t) = V(x, t) + \int_0^h \frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t} dz + \int_0^h \frac{\partial A_{it}(x, t)}{\partial t} dz \quad (3.1)$$

Nesta equação $V(x, t)$ representa o potencial escalar induzido, $A_i(x, t)$ o vetor potencial eletrostático, $A_{it}(x, t)$ o vetor potencial magnético, e h a altura da linha. Devido à complexidade do procedimento para obtenção de $A_i(x, t)$ e de $A_{it}(x, t)$ e da dificuldade do entendimento de suas expressões, sem uma descrição cuidadosa e criteriosa suas equação não serão expostas nesta seção, mas são encontradas em Piantini & Janiszewski (1998).

e) Modelo de Rusck

O modelo desenvolvido por Rusck (1957) constitui-se em um dos primeiros equacionamentos do fenômeno das tensões induzidas por descargas atmosféricas, o qual ainda hoje é bastante empregado em estudos relativos a este tema. Este modelo foi embasado no desenvolvimento de expressões analíticas para o cálculo do valor de pico da tensão induzida em linhas aéreas infinitas mediante a apresentação de formulações para o acoplamento entre linha e canal, e propôs as bases de um modelo de corrente de retorno.

A teoria de Rusck foi considerada em algumas premissas e simplificações de fundamental importância para o seu desenvolvimento, as quais são:

- O canal de descarga é assumido como ionizado, carregado, e disposto verticalmente sem ramificações ou tortuosidades;

- A rede é considerada como sendo infinita e sem descontinuidades, sendo esta hipótese a mais discutida dentre as adotadas no equacionamento de Rusck. Isto se deve porque ao assumi-la não será avaliado o efeito das ondas viajantes, que podem fazer com que a onda de tensão analisada diminua ou aumente consideravelmente, e consequentemente as tensões induzidas, dependendo dos parâmetros da linha;
- A onda de corrente de retorno é considerada em forma de degrau, deslocando-se do solo em direção à nuvem com velocidade constante, e como se estivesse sendo injetada na base do canal de descarga;
- O solo é adotado com resistividade nula como um plano condutor perfeito, o que possibilita a utilização do método das imagens para o cálculo dos campos associados à corrente do canal de descarga. Porém, esta definição não se torna real, pois para alguns casos há a necessidade da utilização de artifícios, tais como a bentonita a fim de atingir este objetivo.
- O campo no solo é tomado como sendo o mesmo que nos condutores da rede, pois a distância entre solo e linha é pequena quando comparada ao comprimento do canal de descarga;
- A distribuição de cargas no canal de descarga é admitida uniforme, uma vez que em pequenas altitudes esta distribuição varia pouco devido a sua proximidade com o solo. Sendo nesta faixa de altitude que a mesma tem maior influência na amplitude do pico da onda de tensão induzida bem como em sua taxa de variação.

Por meio de seus estudos, Rusck concluiu que a tensão induzida em uma rede devido às descargas atmosféricas indiretas é diretamente dependente da taxa de variação do campo elétrico produzido, ou seja, varia com a derivada do campo elétrico no tempo. Assim, para o cálculo das mesmas faz-se necessário determinar o potencial escalar e o vetor potencial magnético que compõem os campos eletromagnéticos produzidos pela incidência da descarga, os quais serão determinados no decorrer desta seção.

Partindo das considerações acima e das simplificações descritas, ilustradas na Figura 3.5, e utilizando as equações de Maxwell em um sistema de coordenadas retangulares XYZ, como o da Figura 3.6, Rusck obteve expressões analíticas para a interação entre os campos gerados pelas descargas atmosféricas e as linhas em sua vizinhança, e consequentemente as fórmulas para o cálculo da tensão induzida.

Na Figura 3.5 L_0 indica a distância entre a rede e o ponto do canal de descarga sob análise, h a altura da linha, e y a distância entre a linha e o ponto de incidência da descarga atmosférica no solo.

Figura 3.5: Disposição da rede e do canal de descarga em relação ao solo para a metodologia de cálculo de tensões induzidas pelo Modelo de Rusck com suas respectivas simplificações [adaptada de (MOTA, 2011)].

Já na Figura 3.6, em uma rede trifásica, o arranjo espacial considerado por Rusck para o desenvolvimento de sua modelagem, lembrando que o equacionamento por ele proposto abrange redes polifásicas. Nesta representação o plano XY refere-se à superfície do solo, em que uma linha infinita e isolada é posicionada paralelamente ao eixo X, e seus condutores a , b , e c se situam a alturas h_a , h_b e h_c em relação ao solo e possuem espaçamento y_{ab} , y_{bc} e y_{ac} entre si, respectivamente.

Figura 3.6: Disposição espacial dos condutores empregada para o desenvolvimento do Modelo de Rusck [adaptada de (SILVEIRA, 2006)].

A partir destas configurações, as cargas q_a , q_b e q_c presentes no canal de descarga e sua corrente de retorno induzem as correntes I_a , I_b e I_c e os potenciais escalares Φ_a , Φ_b e Φ_c nos condutores da rede. Admitindo que as distribuições de correntes e cargas presentes nos condutores da rede não modificam as distribuições de correntes e cargas do canal de descarga, o potencial escalar na superfície destes condutores pode ser expresso pela equação (3.2).

$$[\Phi_n] = [\Phi_{in}] + [k_{nn}].[q_n] \quad (3.2)$$

Na qual Φ_n representa o potencial escalar induzido no n -ésimo condutor, Φ_{in} o potencial escalar indutor no n -ésimo condutor, k_{nn} os elementos da matriz de coeficientes de potencial, e q_n a carga induzida no n -ésimo condutor. Os coeficientes de potencial são definidos pelas equações (3.3) e (3.4):

$$K_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h_a}{r_a}\right) \quad (3.3)$$

$$K_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{d'_{ab}}{d_{ab}}\right) \quad (3.4)$$

Em que h_a indica a altura de um condutor específico a , r_a o raio do condutor a , d_{ab} a distância entre os condutores a e b , d' a distância entre o condutor a e a imagem do condutor b , e ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo.

O vetor potencial na direção da linha, ou seja, na direção X , é determinado pela corrente induzida ao longo dos condutores, já que o vetor potencial indutor associado à corrente de retorno do canal de descarga é perpendicular à direção dos condutores, e é expresso pela equação (3.5):

$$[A_{xn}] = [L_{nn}].[I_n] \quad (3.5)$$

Na qual A_{xn} remete ao vetor potencial do n -ésimo condutor na direção X , e L_{nn} e I_n a indutância e a corrente induzida no n -ésimo condutor, respectivamente.

A intensidade do campo elétrico ao longo da superfície do condutor é determinada pela equação (3.6), a qual ao ser substituída na equação (3.5) e ao considerar a condutividade infinita dos condutores expressa pela equação (3.7) resulta na equação (3.8), como mostrado a seguir:

$$\vec{E}_r = -\vec{\nabla}\Phi_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \rightarrow (\sigma = \infty) \therefore \vec{E} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -[L] \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (3.8)$$

Em que E_r é campo elétrico resultante, Φ_i o potencial escalar, A_i o vetor potencial magnético, σ a condutividade dos condutores, J a densidade de corrente, e $[L]$ a matriz de indutâncias. A matriz

$[L]$ é definida por (3.9) na qual v_0 é a velocidade da luz no vácuo e $[Z]$ é a matriz de impedâncias de surto, expressa em (3.10).

$$[L] = \frac{1}{v_0} \times [Z] \quad (3.9)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & \cdots \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & \cdots \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Baseando-se na equação da continuidade indicada por (3.11), a qual define que a corrente em um ponto é igual à variação da densidade de carga neste mesmo ponto, Rusck admitiu a relação de condição entre a variação da corrente e a variação das cargas como apresentado pela equação (3.12). Substituindo (3.2) em (3.12) obteve a equação (3.13).

$$\vec{\nabla} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{1}{[K]} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \frac{1}{[K]} \left(\frac{\partial \Phi_j}{\partial t} \right) \quad (3.13)$$

$$[K] = v_0 \times [Z] \quad (3.14)$$

Em que ρ representa a densidade de cargas, I a corrente em um condutor, e $[K]$ a matriz de coeficientes de potencial de Maxwell.

Posto isto, substituindo (3.13) em (3.14) e (3.14) em (3.13) obtém-se (3.15) e (3.16) respectivamente, que formam um sistema de equações com o qual se alcançam as correntes e potenciais escalares nos condutores em análise.

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = - \frac{1}{v_0} \times [Z] \times \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{1}{v_0 \times [Z]} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \frac{1}{v_0 \times [Z]} \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} \right) \quad (3.16)$$

A partir de algumas simplificações e da resolução do sistema acima mencionado pode-se determinar o potencial escalar dado pela equação (3.17), na qual ε_0 é a permissividade elétrica do vácuo, t o tempo decorrido a partir do início da corrente de retorno e L_0 a distância da linha até o ponto do canal de descarga sob análise, como indicado na Figura 3.5.

$$\Phi_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q\left(s, t - \frac{L_0}{v_0}\right)}{L_0} ds \quad (3.17)$$

Retomando à equação (3.2) cabe agora determinar o vetor potencial magnético a partir das correntes nos condutores também definidas pela resolução do sistema anteriormente citado. Este vetor é chamado de conservativo porque sua força sobre uma carga depende da velocidade

da mesma e do ângulo que ela faz com as linhas do campo, e pode ser definido pela equação (3.18), em que μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

$$\vec{A}t = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I \left(s, t - \frac{L_0}{v_0} \right)}{L_0} ds \quad (3.18)$$

Relacionando as equações de linha de transmissão com o campo elétrico total na superfície do condutor e seus potenciais escalar e vetor magnético, as equações de linha do Modelo de Rusck são (3.19) e (3.20).

$$\frac{\partial u^\varphi(x,t)}{\partial x} + iR + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (3.19)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial u^\varphi(x,t)}{\partial t} = C \frac{\partial \Phi^i(x,h,t)}{\partial t} \quad (3.20)$$

Nas quais u^φ é a tensão induzida na linha associada ao potencial escalar do campo incidente, e R , L e C a resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento da linha, respectivamente.

Nesta conjuntura, Rusck definiu a tensão induzida em uma linha por uma descarga indireta como apresentado na equação (3.21).

$$u(x,t) = \Phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,z,t)}{\partial t} dz \quad (3.21)$$

Substituindo (3.17) e (3.18) em (3.21) obtém-se a expressão da tensão máxima induzida considerando a incidência de uma descarga indireta próxima ao centro da linha dada por (3.22).

$$U_{max} = \frac{Z_0 I h}{y} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2}} \right) \quad (3.22)$$

Nesta equação U_{max} é máxima tensão induzida no condutor, I o valor de pico da corrente de descarga, h a altura da linha em relação ao solo, y a distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha, v a velocidade de propagação da onda de corrente de descarga, v_0 a velocidade da luz no vácuo, e Z_0 a impedância característica da linha expressa por (3.23), em que μ_0 é a permeabilidade do vácuo e ε_0 a permissividade elétrica do vácuo.

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (3.23)$$

Contudo, para implementar computacionalmente o método de Rusck é preciso representar sua máxima tensão induzida (U_{max}) no domínio do tempo, o que pode é possível por meio da equação (3.24).

$$U(x,t) = Z_0 I h \beta \frac{(ct-x)}{y^2 + \beta^2 (ct-x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2 (ct-x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (1 - \beta^2)(x^2 + y^2)}} \right] \quad (3.24)$$

Em que x é um ponto ao longo do trecho da rede, t é um determinado intervalo de tempo, c é a velocidade da luz no vácuo, I , h , y e Z_0 são variáveis definidas do mesmo modo como foi feito para a equação (3.22). Já β é a razão entre a velocidade de propagação da onda de corrente de descarga (v) e a velocidade da luz no vácuo (c), ou seja, $\beta = v/c$.

Posto isto, a tensão induzida total no domínio do tempo em um ponto x ao longo da rede é dada pela equação (3.25).

$$V(x, t) = U(x, t) + U(-x, t) \quad (3.25)$$

Além disso, para situações em que se deseja calcular o valor de pico da tensão induzida para pontos na rede relativamente distantes do canal de descarga, pode-se então desconsiderar a velocidade de propagação da corrente no canal e adotar a equação (3.26), cujas variáveis são as mesmas da equação (3.22).

$$U_{max} = \frac{Z_0 I h}{y} \quad (3.26)$$

Diante disto, terminada a exposição dos modelos de acoplamento, serão apresentadas as variáveis que mais influenciam a amplitude e forma de onda das tensões induzidas.

Ao analisar as expressões vista até o momento é possível admitir que as mesmas fornecem uma expressão analítica para o cálculo de tensão induzida em uma rede de distribuição, enquanto as demais teorias existentes fornecem expressões repetidas e de alto esforço computacional para resultar em estimações semelhantes.

3.3.) VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM NA AMPLITUDE E FORMA DAS TENSÕES INDUZIDAS

Há diversas variáveis que podem influenciar a amplitude e a forma de onda das tensões induzidas por descargas atmosféricas diretas e indiretas, relacionadas a diferentes fatores como:

- Formação do canal de descarga;
- Corrente desenvolvida ao longo do canal;
- Acoplamento entre rede e canal;
- Características da rede;
- Parâmetros ambientais;
- Estabelecimento do campo eletromagnético entre solo e condutor ou entre condutores.

Dessa maneira, podem definir-se os fatores de maior relevância para a determinação da amplitude e a forma de onda da tensão induzida como: parâmetros de descarga, parâmetros da rede, parâmetros de configuração entre rede e canal de descarga, e parâmetros ambientais.

Sendo assim, fundamentando-se em Visacro (2005) e Silveira (2001, 2006), estes parâmetros serão descritos, cabendo à ressalva de que se poderia realizar um estudo específico a respeito da influência dos mesmos sobre as tensões induzidas devido à complexidade e relevância por eles apresentadas.

3.3.1.) Parâmetros de Descarga

O principal parâmetro de descarga que altera de forma aproximadamente proporcional à amplitude da tensão induzida é a taxa de crescimento da corrente de retorno, a qual influencia o valor de pico e o tempo de frente da corrente de descarga e é definida como o valor médio da derivada da frente de onda da corrente em relação ao tempo. Neste contexto, resultados de simulações e medições demonstram que a amplitude da tensão induzida é proporcional ao valor do pico de corrente e inversamente proporcional ao tempo de frente da onda de corrente.

Analisando a ocorrência das descargas atmosféricas verifica-se que as descargas subsequentes possuem valor de amplitude de corrente aproximadamente igual a um terço do valor das primeiras descargas, e tempo de frente aproximadamente seis vezes menor do que das primeiras descargas. Tal fato leva a uma perspectiva de que as amplitudes das tensões induzidas oriundas de descargas subsequentes possuam valores aproximadamente iguais ao dobro dos proporcionados pelas primeiras descargas, quando analisadas descargas negativas. Esta situação não ocorre com as descargas positivas por estas possuírem tempo de frente muito elevado e valor mediano da amplitude pouco superior aquele das primeiras descargas, implicando em amplitudes de tensão induzida diminutas.

A altura do ponto de conexão entre os canais ascendente e descendente também pode influenciar na amplitude da tensão induzida implicando geralmente na redução da mesma, embora em determinadas situações possa ocasionar o seu aumento. Isto se explica, pois na ocorrência de uma primeira descarga negativa este ponto ocorre a uma altura considerável do solo levando à formação de uma onda ascendente e de uma descendente que podem somar-se ou subtrair-se.

A atenuação da amplitude da corrente ao longo do canal de descarga, o processo de formação do envelope de corona, as perdas no núcleo do canal, a velocidade de propagação da corrente de retorno, e as tortuosidades ao longo do canal, são parâmetros de descarga relevantes, mas que acarretam menor influência sobre a amplitude e forma de onda da tensão induzida.

3.3.2.) Parâmetros da Rede

Dentre os parâmetros de rede relacionados com a determinação das tensões induzidas destaca-se a altura, a qual contribuiu com o percurso de integração do campo elétrico formado

entre a linha e o solo, influenciando de maneira aproximadamente proporcional a amplitude das mesmas, assim como ocorre com a distância entre os condutores fase e neutro.

Já os cabos de blindagem e de aterramento promovem uma discreta redução da tensão induzida devido ao acoplamento eletromagnético entre tais cabos e os condutores fase da rede, sendo esta redução expressiva somente quando os cabos aterrados estão muito próximos do condutor energizado e conectados a aterramentos adjacentes ao ponto sob análise.

Na ocorrência de pequenos espaçamentos entre os aterramentos de neutro ou do cabo de blindagem, acontecem então alterações das ondas de tensão e corrente no cabo aterrado devido a reflexões do surto induzido no solo, o que em conjunto com o acoplamento entre os cabos promove a redução das tensões induzidas nas fases. Ainda nesta conjuntura, a resistência de aterramento das terminações à terra dos cabos de blindagem e dos cabos neutros acarreta diminuta influência na amplitude da tensão induzida, e o aumento do número destas terminações implica na redução das amplitudes das mesmas no condutor fase.

Ressalta-se que os cabos para-raios, usualmente empregados na proteção de linha contra descargas diretas, também promovem alterações nas tensões induzidas por meio do acoplamento entre seus componentes e os cabos fase, e pela sua atuação drenando as correntes induzidas nas linhas ao oferecer um caminho preferencial de baixa resistência às mesmas.

3.3.3.) Parâmetros de Configuração entre Rede e Canal de Descarga

Dentre as configurações de estabelecimento do acoplamento entre rede e canal de descarga se destaca a posição relativa entre a linha e o canal, pois quanto menor a distância entre os mesmos maior o campo eletromagnético incidente sobre a linha e, portanto, maior a amplitude de tensão induzida.

Outro parâmetro importante é a inclinação do canal em relação à linha, uma vez que à medida que esta característica aproxima ou afasta os elementos de corrente geradores do campo eletromagnético, promove, respectivamente, o aumento ou diminuição da amplitude da tensão induzida.

Por fim, a altura do ponto de conexão entre os canais ascendente e descendente e a localização do mesmo em relação à linha também se caracteriza como um parâmetro de configuração entre linha e canal e influencia a tensão induzida.

3.3.4.) Parâmetros Ambientais

Os parâmetros ambientais de maior relevância no contexto de tensões induzidas são relevo e resistividade do solo. O primeiro está associado à maneira com a qual o campo eletromagnético atinge os condutores da linha, pois dependendo da disposição e inclinação do

solo pode ocorrer aumento ou diminuição da intensidade de campo sobre a linha, e consequentemente acréscimo ou redução da tensão induzida.

Já a resistividade do solo afeta a tensão induzida mediante a alteração do campo eletromagnético ao longo do percurso de propagação entre o ponto de incidência da descarga e os pontos atingidos da linha. Do mesmo modo, influencia na determinação dos parâmetros longitudinais e transversais da linha, podendo acarretar o aumento ou a diminuição da amplitude da tensão induzida em virtude do ponto de incidência e de análise.

3.4.) CONSIDERAÇÕES PARA APRIMORAMENTO AO MÉTODO PROPOSTO NO MODELO DE RUSCK

3.4.1.) Formas de Ondas Arbitrárias para as Correntes de Descargas

Atmosféricas

O modelo proposto por Sune Rusck admite que as correntes das descargas atmosféricas sejam representadas em forma de onda degrau. Entretanto, através de pesquisas realizadas (NERIVALDO, 2011), no qual por meio de medições reais, demonstram que o aspecto da forma de onda de corrente influencia na sobretensão induzida nas redes de distribuição próximas ao ponto de uma descarga atmosférica. Neste sentido, o aspecto que diretamente influencia a tensão induzida refere-se à correlação entre o tempo de subida e ao tempo de frente da corrente da descarga. Para poder implementar esta forma de onda no sistema especialista, será então utilizada a forma de onda da corrente de descarga atmosférica mais próxima do local em que a mesma ocorreu, baseada nas informações coletadas pela empresa Clima Tempo (através de contrato com a EDP-SP). Neste sentido, foi utilizada a função de Heidler (HEIDLER, 1995), conforme (3.27).

$$i(t) = i_{h1}(t) + i_{h2}(t) + i_{de}(t) \quad (3.27)$$

onde:

$$i_{h1}(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n1}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{12}}\right) \quad (3.28)$$

$$i_{h2}(t) = \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n2}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{22}}\right) \quad (3.29)$$

$$i_{de}(t) = [(1 - \exp(\alpha)) - (1 - \exp(\beta))] \quad (3.30)$$

e que:

$$\eta_1 = \exp \left[- \left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}} \right) \left(n1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}} \right)^{\frac{1}{n1}} \right] \quad (3.31)$$

$$\eta_2 = \exp \left[- \left(\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}} \right) \left(n2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}} \right)^{\frac{1}{n2}} \right] \quad (3.32)$$

Com as seguintes constantes estabelecidas na Tabela 3.1 a seguir.

Tabela 3.1: Constantes usada para simulação da corrente de descarga [adaptado de NERIVALDO, 2011)]

I_{01}	$10,7 \times 10^3$
I_{02}	$6,5 \times 10^3$
$n1$	2
$n2$	2
α	5×10^4
β	3×10^5
τ_{11}	$0,25 \times 10^{-6}$
τ_{12}	$2,5 \times 10^{-6}$
τ_{21}	$2,1 \times 10^{-6}$
τ_{21}	230×10^{-6}

A modelagem por meio da descarga atmosférica utilizando as duas funções de Heidler, demonstradas anteriormente e representada de forma gráfica por meio da Figura 3.7, se aproximam mais do fenômeno real do que a utilização da modelagem da descarga atmosférica utilizando a onda dupla exponencial, esboçada na Figura 3.. Isto se deve a dois aspectos, o primeiro está na natureza côncava da frente de onda real nos instantes iniciais, em que não se observa na onda dupla exponencial. O segundo aspecto, não menos importante é que a derivada máxima da onda dupla exponencial fica próxima ao pico, ao passo que ao utilizar as funções de Heidler a derivada máxima fica exatamente no pico da curva.

Figura 3.7: Representação da onda da corrente utilizando a curva de Heidler (VISACRO, 2005).

Figura 3.8: Onda dupla exponencial (VISACRO, 2005).

Na Figura 3.9 é apresentada a forma de onda da corrente que possui tempo de pico de $0,81 \times 10^{-6}$ s e aproximadamente 12kA de valor de pico.

Figura 3.9: Forma de onda de corrente para modelagem da descarga atmosférica (NERIVALDO, 2011).

Assim, modelos computacionais que utilizam o perfil de corrente da onda dupla exponencial poderão resultar em resultados divergentes do caso real. Como o objetivo desta pesquisa visa à utilização do sistema especialista para casos reais, faz-se necessário o

aprimoramento da metodologia utilizada por Rusck utilizando a função analítica de Heidler, a qual converge para o modelo mais realista.

3.4.2.) Sobretensões em Linhas de Distribuição Finitas

A rede elétrica de distribuição considerada neste estudo possui em média 1,5 km de extensão para a rede primária e 0,35 km para a rede secundária por equipamento. Diante deste fato, é necessário que o Método de Rusck seja aprimorado, para que os cálculos de sobretensões induzidas se aproximem do caso mais real possível.

A expressão para o cálculo da tensão induzida em linhas de distribuição exposta por Rusck é estruturada em duas parcelas, sendo a primeira parcela, a tensão induzida devido à contribuição das cargas à direita do ponto de estudo x_E e a segunda, devido à contribuição das cargas a esquerda do ponto de estudo, conforme equação (3.49) e ilustrada na Figura 3.10.

Figura 3.10: Composição da tensão induzida em trecho da rede de distribuição [Adaptada de (SANTOS, 2011).]

$$V(x_e, t) = U(x_e, t) + U(-x_e, t) \quad (3.33)$$

onde:

$U(x_e, t)$: contribuição das cargas à direita do ponto de estudo;

$U(-x_e, t)$: contribuição das cargas à esquerda do ponto de estudo.

Considerando um caso real, no qual normalmente a rede de distribuição é finita e que sempre termina em um ponto no qual há uma determinada impedância Rx , o modelo proposto por Rusck pôde ser reformulado, diante da premissa que não haverá contribuição das cargas de um determinado lado do ponto de estudo. Para tal demonstração, será admitido que ao lado esquerdo do ponto de estudo x_e não há trecho de rede, ou seja, possui apenas uma impedância.

Desta forma, a tensão no ponto de estudo pode ser calculada da seguinte forma:

$$V(x_e, t) = U(x_{0,t}) + \Gamma U(-x_{0,t}) \quad (3.34)$$

onde Γ é denominado de coeficiente de reflexão, no qual pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{Rx - |Z_l|}{Rx + |Z_l|} \quad (3.35)$$

sendo Z_l a impedância característica da rede de distribuição, definida por:

$$Z_l = 138 \log \left(2 \frac{h}{r} \right) \quad (3.36)$$

onde h é a altura da rede de distribuição e r é o diâmetro do condutor desta rede.

$$V(x_e, t) = U(x_0, t) + \Gamma U(-x_0, t) \quad (3.37)$$

Por outro lado, supondo que a continuidade no ponto (x_e, t) fosse uma fonte de compensação, a expressão seria formulada conforme (3.38), ou seja:

$$V(x_e, t) + \Delta V = U(-x_e, t) + \Gamma U(-x_e, t) \quad (3.38)$$

$$U(x_e, t) + U(-x_e, t) + \Delta V = U(-x_e, t) + \Gamma U(-x_e, t) \quad (3.39)$$

$$\Delta V = \Gamma U(-x_e, t) - U(-x_e, t) \quad (3.40)$$

Ainda que o ponto x_E receba a fonte de compensação ΔV , todo o trecho é afetado pela propagação da fonte compensadora, alterando assim os valores de tensão induzida em todo o trecho.

Com a demonstração das possibilidades para cálculo de sobretensão, considerando a linha infinita e a fonte compensadora x_1 , pode-se então calcular a tensão induzida em um ponto x_e qualquer. Entretanto, a tensão da fonte terá um atraso de tempo no percurso entre o ponto x_e e a fonte compensadora x_1 , como demonstrado em (3.41):

$$V(x_e, t) = U(x_e, t) + U(-x_e, t) + [\Gamma U(-x_1, t) - U(-x_1, t)]u(t - t_f) \quad (3.41)$$

Sendo $u(t - t_f)$, uma função degrau unitário:

$$u(t - t_f) = \begin{cases} 0, & \text{se } t < t_f \\ 1, & \text{se } t \geq t_f \end{cases} \quad (3.42)$$

Em que t_f , é o tempo de trânsito entre o ponto x_e e x_1 :

$$t_f = \frac{|x_e - x_1|}{c} \quad (3.43)$$

Nesta pesquisa admitiu-se c , a velocidade de propagação, sendo exatamente como a velocidade da luz.

Outra possibilidade de se efetuar o cálculo é considerando a rede finita com sua impedância no final, iniciando no ponto x_0 e terminando em x_f , a tensão induzida no ponto x_e ao longo do trecho da rede será estimada conforme a equação (3.60).

$$V(x_e, t) = U(x_e, t) + U(-x_e, t) + [\Gamma U(-x_f, t) - U(-x_f, t)]u(t - t_f) + \dots \quad (3.44)$$

$$\dots + [\Gamma U(-x_0, t) - U(-x_0, t)]u(t - t_0)$$

É notório que tais aprimoramentos se configuram como um dos aspectos inovadores desta pesquisa. Visto que estes aprimoramentos se fazem necessário, pois o sistema especialista que será desenvolvido neste trabalho será utilizado para casos reais.

Ressalta-se que nesta pesquisa não está sendo consideradas as diferentes características da resistividade do solo.

Capítulo 4. Aspectos Conceituais

Relacionados aos Para-Raios

4.1.) INTRODUÇÃO

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica, os para-raios de óxido de zinco (ZnO), devido à sua eficiência, praticidade de instalação e custo são equipamentos muito utilizados para proteção contra sobretensões. A sua construção visa proteger o sistema de sobretensões originadas por distúrbios no próprio sistema, por indução devido às descargas indiretas ou pela incidência direta de descargas atmosféricas.

Para que seja possível aplicar a metodologia de cálculo de sobretensão devido à tensão induzida por descargas atmosféricas indiretas nos para-raios e determinar a sua respectiva redução de vida útil, o qual faz parte do objetivo deste trabalho, é de suma importância conhecer sucintamente o comportamento deste dispositivo. Para tanto, na sequência deste capítulo será apresentado seus princípios de funcionamento, suas características construtivas, e modelo de degradação.

4.2.) PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS PARA-RAIOS

Os para-raios atuam como agentes limitadores, impedindo que tensões acima de um determinado nível pré-estabelecido possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção (D'AJUZ *et al.*, 1985; MAMEDE, 2005). Atualmente, há diversos tipos de para-raios disponíveis para proteção de redes de distribuição, transformadores, banco de capacitores, reguladores, e para linhas de distribuição em média tensão, como foi empregado nesta pesquisa, dependendo de suas características construtivas e de sua classe de tensão.

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, aproximando-os do ideal, como será visto a seguir.

4.3.) HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO

O primeiro dispositivo desenvolvido para proteção contra sobretensões foi o centelhador, ilustrado na Figura 4.1(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 4.1(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 4.1(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 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 4.1, e dispensam a utilização de centelhadores porque seu comportamento $V \times I$ resulta em correntes mínimas, da ordem de dezenas de miliampères, para sua tensão de operação.

Figura 4.1: Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D'AJUZ *et al.*, 1985).

Como se observa na Figura 4.1, 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 miliampères, 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 4.2 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 drenado 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 4.2: 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 (4.1), que representa a característica não linear dos resistores a ZnO e SiC, verifica-se que o SiC tem expoente n de ordem 4 enquanto o ZnO apresenta um expoente n de ordem 25, demonstrando à alta não linearidade do ZnO.

$$I = kV^n \quad (4.1)$$

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), pode-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:

- 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 4.2, como já foi exposto anteriormente, e através da Figura 4.3, que expõem as características não lineares entre tensão e corrente para o ZnO e o SiC em diferentes temperaturas. Na Figura 4.3 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.

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 então abordados com mais detalhes a seguir.

Figura 4.3: Característica de tensão e corrente para o carboneto de silício e o óxido de zinco (D'AJUZ *et al.*, 1985).

4.4.) 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.

4.4.1.) Características Construtivas dos Para-Raios de ZnO

Os para-raios de ZnO são constituídos basicamente por blocos de 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 sobre pressão;
- Elementos de vedação;
- Duto de ventilação;
- Terminal de linha;
- Flange;
- Suporte de fixação.

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 4.1.

Tabela 4.1: 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 4.2 são apresentadas as particularidades dos principais componentes empregados na fabricação dos varistores de ZnO produzidos hoje em dia.

Tabela 4.2: 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 4.4, 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 4.4: 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 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 a 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 (4.2).

$$\alpha = \frac{d[\log(I)]}{d[\log(V)]} \quad (4.2)$$

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 decresce com o aumento da densidade de corrente, como mostrado pela Figura 4.5. 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 4.5: Dependência do coeficiente não linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica [adaptada de (FURTADO, 2005)].

4.4.2.) 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).

A vida operacional do óxido de zinco pode ser decomposta em três regiões, as quais são demonstradas na Figura 4.6 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*.

Figura 4.6: 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 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 ao número de descargas.

4.4.3.) Especificações 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 um parâmetro de referência para a especificação das características de proteção e operação do para-raios. É definida como a tensão eficaz, na frequência industrial, que pode ser aplicada ao para-raios sem que o mesmo perca sua estabilidade térmica ou deixe de operar corretamente, quando submetido a uma sobretensão por 10 segundos depois de ter sido aquecido a 60 °C, e após absorver uma energia prévia definida no ensaio de ciclo de operação.
- **Tensão Residual:** é o máximo valor da tensão que se estabelece entre os terminais do para-raios quando este é atravessado por uma corrente de descarga na forma 8x20µs. Seu valor é determinado em função da forma, amplitude e taxa de crescimento da corrente de impulso a qual o para-raios é submetido.
- **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 µs.
- **Máxima Tensão Contínua de Operação (MCOV):** é a máxima tensão eficaz em frequência industrial para a qual o para-raios é projetado e que pode ser aplicada continuamente aos seus terminais sem que altere suas propriedades elétricas ou térmicas.
- **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 a corrente impulsiva que flui pelo para-raios quando o mesmo é submetido a uma sobretensão, e cujo valor nominal é determinado como o valor de crista da corrente na forma de impulso 8/20 μ s utilizado para classificar o para-raios.
- **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 4.7 mostra o esboço de uma curva característica de um varistor de ZnO com alguns dos valores típicos das especificações descritas anteriormente, sendo que a Tabela 4.3 descreve as classes e as especificações mínimas dos para-raios

Figura 4.7: Curva característica típica de um varistor de ZnO (FRANCO, 2008).

Tabela 4.3. Classes e especificações mínimas dos para-raios (IEC 60099-4,2009).

Classe	Tensão nominal (kV)		Corrente de Impulso Atmosférico (kA)	Corrente de Impulso de Chaveamento (A)	Corrente Alta de Curta Duração (kA)	Corrente Baixa de Longa Duração (A, μ s)
	De Operação	MCOV				
Subestação	3-48	2,55-39	10	500	65	-
	54-312	42-245	10	500-1000	65	-
	396-564	318-448	15	2000	65	-
	576-612	462-485	20	2000	65	-
Intermediário	3-144	2,55-115	5	500	65	-
Distribuição	3-36	2,55-29	10	-	100	250,2000
	3-36	2,55-29	5	-	65	75,2000
	3-36	2,55-29	5	-	40	75,2000

4.4.4.) Modelo Matemático dos Para-raios de ZnO Utilizado para Implementação no Sistema Especialista de Cálculo de Sobretensão

Para implementação computacional no sistema especialista de cálculo de sobretensão foi utilizado o modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas dos para-raios tipo PBP 10/10, conforme Figura 4.8, em que PBP designa “Para-raios Balestro Poliméricos” e “10” se refere à Tensão Nominal do Para-raios (10 kV) e Corrente de Descarga Nominal (10 kA), cujas características elétricas e mecânicas são apresentadas na Tabela 4.4 e Tabela 4.5

Figura 4.8. Dimensões do para-raios PBP 10/10.

Tabela 4.4. Características Elétricas.

Modelo	Tensão Nominal U_r (kV rms)	Tensão de Operação Contínua U_c (kV rms)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500 A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
PBP 10/10	10	8,4	36,6	27	31	33	37,4

Tabela 4.5. Características Mecânicas.

Modelo	A (mm)	B (mm)	C (mm)	Distância de arco (mm)	Distância de escoamento (mm)	Peso (kg)
PBP 10/10	208	98	115	180	335	3,1

Este modelo foi determinado por meio da realização de ensaios em laboratório, tendo-se uma amostra de 10 para-raios novos que são atualmente utilizados pela concessionária EDP–SP.

Foram realizados ensaios submetendo os para-raios a diferentes valores de corrente, tensão e temperatura, para que se pudessem medir seus parâmetros de operação. Adicionalmente, foram também feitas imagens térmicas dos para-raios no início e no término dos ensaios para análise do seu desempenho. Os para-raios foram submetidos a diferentes valores de corrente, tensão e temperatura, para que se pudessem medir os seguintes parâmetros de operação:

- Tensão na corrente de operação contínua.
- Máxima tensão residual para impulso de corrente íngreme.
- Máxima tensão residual para corrente de impulso de manobra 500 A.

- Máximas tensões residuais.

Além disso, foi realizada uma análise comparativa do comportamento da relação “corrente” x “tensão” dos para-raios frente ao modelo matemático dos mesmos e para um intervalo de confiança de 90%. Também foram feitas imagens térmicas dos para-raios no início e no término dos ensaios para análise do seu desempenho. Todo este ensaio é possível verificar no Anexo I.

Com relação ao modelo matemático do para-raios, os seus parâmetros são degradados em função de altas temperaturas e em função das descargas atmosféricas. A literatura técnica sobre os resistores de óxido de zinco fornece o seguinte comportamento:

- A cada dia que um para-raios opera à temperatura de 65 °C tem-se a redução de aproximadamente 9 dias em sua vida útil.
- A cada dia que um para-raios opera à temperatura de 95 °C tem-se a redução de aproximadamente 5 meses em sua vida útil. Neste ensaio, definiu-se que o modelo mais apropriado é o polinomial, ou seja:

$$V_{Para-raio} = V_{\infty} - R \cdot I_{Para-raio}^{-b} \quad (4.3)$$

No qual V_{PR} é a tensão no para-raios, V_{∞} é uma tensão residual no para-raios devido à passagem de corrente de alta intensidade, R é a resistência, $I_{(Para-raio)}$ é a corrente e b é o expoente responsável pela representação da não-linear relação entre tensão e corrente. Baseado nos ensaios realizados, o modelo de degradação dos para-raios testados está ilustrado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Modelo de degradação dos para-raios ensaiados.

Capítulo 5. Sistema Especialista para Cálculo de Sobretensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas Indiretas

5.1.) INTRODUÇÃO

A fim de se demonstrar o sistema especialista desenvolvido para cálculo de sobretensão induzida devido às descargas atmosféricas indiretas, objetivo desta pesquisa, inicialmente é necessário conhecer o que é um sistema especialista. Posto isto, no parágrafo a seguir será apresentado de forma sucinta a sua definição, seu objetivo e seus benefícios.

5.2.) DEFINIÇÃO DE SISTEMA ESPECIALISTA

Os sistemas especialistas são softwares criados com o objetivo de solucionar problemas que requer domínio especializado, no qual a solução necessita da tomada de decisão que implique em ações que otimize o desempenho do sistema, podendo tomar decisões, tal qual, um especialista de determinada área de conhecimento poderia manualmente tomar (FEIGENBAUM, 1971).

Os benefícios advindos na utilização da técnica de sistema especialista são diferentes daqueles obtidos pelos sistemas tradicionais, por se tratar de sistemas dotados de inteligência, conhecimento sobre o domínio da aplicação e interface com o usuário (MENDES, 1997).

Na Figura 5.1 é ilustrada a estrutura básica de um sistema especialista, na qual é constituída por três elementos essenciais:

Figura 5.1: Estrutura Básica de um Sistema Especialista (MENDES,1997).

- **Base de conhecimento:** A base do conhecimento não é uma simples coleção de informações. A tradicional base de dados com arquivos, registros e seus relacionamentos estáticos é aqui substituída por uma base de regras e fatos e heurísticas que correspondem ao conhecimento do especialista, ou dos especialistas no domínio sobre o qual foi construído o sistema.
- **Motor de inferência:** O motor de inferência é um elemento essencial para a existência de um sistema especialista (MENDES, 1997). É por intermédio dele que os fatos e regras e heurística que compõem a base de conhecimento são aplicados no processo de resolução do problema. A capacidade do motor de inferência é baseada em uma combinação de procedimentos de raciocínios.
- **Interface com o usuário:** Esta base de regras e fatos interage com o usuário e com o motor de inferência, permitindo identificar o problema a ser resolvido, as possibilidades de solução e o processo de raciocínio e inferência que levam a conclusões sobre o problema submetido ao sistema. Na interação com a base de fatos e regras e com o usuário, obtêm-se as informações necessárias para a resolução do problema.

No ano de 1965 foi desenvolvido na Universidade de Stanford, o primeiro sistema especialista. Conhecido como “DENDRAL”, criado por Edward Feigenbaum, Lenderberg e Buchanan, este sistema especialista buscava inferir estrutura molecular de componentes desconhecidos dadas a massa espectral e a resposta nuclear magnética.

Outro exemplo que inclusive contribuiu para a biblioteca acadêmica, por meio de sua tese de doutorado, Edward Shortliffe da Universidade de Stanford, em meados de 1970 desenvolveu um sistema especialista conhecido como MYCIN capaz de diagnosticar rapidamente a meningite e outras infecções bacterianas, além de apresentar como resultado a prescrição do possível tratamento médico. Ao decorrer dos anos, até os dias atuais, outros sistemas especialistas foram desenvolvidos sempre com um único objetivo, o auxílio na tomada de decisão acerca de determinados problemas.

No cenário atual do mercado de trabalho, a implementação de sistemas especialistas tem se tornado essencial, pois reduzem o grau de dependência que as organizações mantêm quando se encontram em situações críticas, como por exemplo a falta de um especialista, além de ser possível a utilização por qualquer usuário. Ademais, sistemas especialistas permitem velocidade de processamento para obtenção da resposta solicitada e que quando bem fundamentados, agregam segurança na solução para o qual foi designado, mitigando a possibilidade de erro nas soluções propostas.

5.3.) SISTEMA ESPECIALISTA PARA CÁLCULO DE SOBRETENSÃO INDUZIDA

O sistema especialista que foi estruturado para o cálculo das sobretensões induzidas devido às descargas atmosféricas indiretas no para-raios de ZnO foi desenvolvido computacionalmente utilizando o programa Visual Studio.

A linguagem de programação utilizada para aquisição da base de dados foi o SQL (*Structured Query Language*) e C++ para implementação da lógica especialista. Esta linguagem foi escolhida, pois permite a estruturação e o paradigma de sistema orientado a projetos, permitindo assim maior flexibilidade de integração com outras ferramentas computacionais, disponibilidade de recursos gráficos, velocidade de processamento e portabilidade de execução em diversos ambientes operacionais.

Na arquitetura, conforme ilustrada na Figura 5.2, é possível verificar as três bases de informações que constituem o sistema especialista, as quais são formadas por bancos de dados que armazenam as características e parâmetros do sistema de distribuição de energia das concessionárias. A seguir é detalhada cada informação contida nos respectivos bancos de dados.

Figura 5.2:– Arquitetura do Sistema Especialista para Cálculo de sobretensão de origem atmosférica.

- **Rede de Distribuição:** armazenamento dos dados referente aos parâmetros dos circuitos de distribuição, contendo seus respectivos trechos de rede em barras, equipamentos de média tensão, altura da rede em relação ao solo e coordenadas em Universal Transversa de Mercator (UTM).
- **Descargas Atmosféricas:** armazenamento dos dados referentes às características das descargas atmosféricas que incidem nas áreas de concessão da distribuidora de energia. Neste banco dentre as informações, as essenciais são a intensidade da corrente da descarga, as coordenadas geográficas de cada descarga, o tempo de subida, o valor de crista, o tempo de meia onda e a frequência de ocorrência. Nesta

pesquisa a fonte destes dados foram disponibilizadas pela empresa CLIMA TEMPO através de contrato com a concessionária EDP-SP.

- **Modelo de Degradação de Para-raios:** armazenamento dos dados referentes às propriedades e características do modelo matemático de degradação do para-raios já desenvolvido conforme Anexo I.

Estas bases de dados são utilizadas pelo sistema especialista com o objetivo de produzir como resposta o cálculo de sobretensão induzida nos para-raios, podendo assim estimar a sua vida-útil, frente às descargas atmosféricas.

5.4.) ESCOLHA DO CIRCUITO PARA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

A escolha do circuito para aplicação da metodologia foi baseada na região com maior índice de descargas atmosféricas e correlação com a maior quantidade de ocorrências de interrupções relacionada às descargas atmosféricas. Na Figura 5.3 é demonstrada a densidade de descargas atmosféricas por quadriculas de 1 km², na área de concessão da EDP-SP. Nesta figura é possível identificar que a região com a maior quantidade de descargas atmosféricas por quadricula se localiza na região do Alto Tietê, região geográfica localizada no entorno da nascente do rio Tietê.

Figura 5.3: Mapa de variação da densidade de descargas atmosféricas 2014-2015

Aprofundando a análise, com a base de dados fornecida pela concessionária EDP-SP, a qual detém o contrato com a empresa Clima Tempo que disponibiliza os registros de descargas

atmosférica no sistema de distribuição, foi possível então quantificar o número de registros de descargas atmosféricas com as suas respectivas intensidades de corrente em kA por km² em todos os circuitos que suprem o fornecimento de energia na região do alto tietê.

Com o resultado obtido nessa análise, concluiu-se que o circuito no qual há a maior quantidade de descargas atmosféricas e de intensidade de corrente de pico por km² é o SUZ-1306, sendo que a sigla “SUZ” significa o município no qual se predomina a extensão de rede deste circuito e seu respectivo atendimento às cargas do sistema e o algarismo “1306” referencia o nível de tensão “13,8kV” e o número do circuito “06”. Neste caso, o município atendido é o de Suzano/SP. Na Figura 5.4 é apresentada o diagrama do trecho do circuito SUZ-1306 e cada quadrícula significa a densidade de descargas atmosféricas por km².

Figura 5.4: Trecho do alimentador SUZ 1306 sobreposto aos registros das descargas atmosféricas de 2014 e 2015.

5.5.) RECURSO E CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA ESPECIALISTA

5.5.1.) Configuração dos parâmetros de entrada do sistema especialista.

O sistema especialista desenvolvido tem por objetivo ser uma ferramenta computacional eficiente no cálculo de sobretensão induzida para determinação da redução da vida útil dos para-raios frente às descargas atmosféricas. A seguir será apresentada a interface entre usuário e sistema, de forma a identificar passo a passo o processo para que o sistema seja inicialmente configurado com os dados de entrada, primordiais para que o sistema possa efetuar o cálculo das sobretensões induzidas.

Figura 5.5: Tela principal do sistema especialista.

Na Figura 5.7: Selecionando o banco de dados da rede de distribuição. Figura 5.7 é apresentada a tela principal do sistema, na qual são apresentados todos os menus (guias) que o usuário terá acesso no sistema especialista, sendo eles os seguintes:

- **Banco de dados da rede de distribuição:** menu no qual o usuário escolhe a base de dados contendo as informações da rede de distribuição do estudo. Neste banco de dados estão tabulados todos os trechos de rede georeferenciado e parâmetros operacionais nominais da distribuição de energia. Iniciando pelos ativos de todas as subestações da concessão, dispositivos da rede de distribuição até os trechos de rede do secundário do transformador de distribuição.
- **Banco de dados da rede de descargas atmosféricas:** menu no qual o usuário escolhe a base de dados contendo as informações das descargas atmosféricas por coordenadas da região alvo de estudo. Esta base de dados é disponibilizada para concessionária EDP-SP por meio de um contrato firmado com a empresa Clima Tempo, empresa brasileira que oferece serviços de Meteorologia.
- **Modelo de degradação de para-raios:** menu no qual o usuário informa os parâmetros e características do modelo de degradação dos para-raios na rede de distribuição alvo de estudo. Neste menu os parâmetros a serem fornecidos tratam dos nominais e de ensaios, os quais serão detalhados nos parágrafos a seguir.

Para se iniciar o processamento do cálculo de sobretensões é necessário que o usuário importe a rede de distribuição de estudo com todas as suas informações características, os dados

de descargas atmosféricas e forneça a parametrização do modelo de degradação do para-raios que existe na rede de estudo.

Baseado na análise feita no item 5.4.), serão utilizados os equipamentos e trechos da rede de média tensão do circuito SUZ-1306.

Nesta etapa, no menu banco de dados da rede de distribuição localizada na parte superior direita da tela principal do sistema, conforme Figura 5.6. Ao clicar no botão “Configurar banco de dados”, será necessário que o usuário aponte o diretório no qual se encontra o banco de dados com extensão “.mdb”. Nesta pesquisa todos os inputs de banco de dados estão configurados nesta extensão por preferência.

Figura 5.6: Importando a base de dados da rede de distribuição.

Após definição do diretório, o usuário deve selecionar o banco de dados contendo a rede de distribuição a ser estudada, conforme ilustrado na Figura 5.7.

Figura 5.7: Selecionando o banco de dados da rede de distribuição.

Após a seleção do arquivo contendo a rede de distribuição, o sistema é atualizado com a segmentação dos circuitos contido na base e seus respectivos equipamentos, conforme a Figura 5.8.

	TRANSFORMADOR
+ MRE (MARESIAS)	155BF000006239
+ MRM (MIRIM)	155BF005455389
+ PED (PEDREIRA)	155BF005251559
+ PID (PINDAMONHANGA)	155BF000001629
+ PIL (PARQUE INDUSTRIAL)	155FF000704719
+ PME (PIMENTAS)	155BF000023709
+ PNO (PORTO NOVO)	155CF005225739
+ POA (POA)	155BF005266889
+ PTE (PARQUE TECNOLÓGICO)	155BF000001829
+ SAL (SALESOPOLIS)	155BF000016849
+ SAT (SATÉLITE)	155BF000002969
+ SBR (SANTA BRANCA)	155BF000006909
+ SJC (SAO JOSE DOS CAMPOS)	155RL000716939
+ SKO (SKOL)	155BF000021369
+ SLU (SAO LUIZ)	155BF000006029
+ SSC (SAO SEBASTIAO -	155CF005293899
- SUZ (SUZANO)	155BF000016519
RSUZ 1308	155BF005491409
RSUZ 1303	155BF005203519
RSUZ 1390	155BF000021359
RSUZ 1311	155BF000002689
RSUZ 1310	155BF005137049
RSUZ 1391	155BF000001639
RSUZ 1309	155BF000023719
RSUZ 1307	155CF000704659
RSUZ 1306	155BF000021289
RSUZ 1304	155BF005456019
RSUZ 1302	155BF005456029
RSUZ 1301	155BF005456039
RSUZ 1305	155BF005456049
+ TAU (TAUBATÉ)	155BF005314489
+ UBA (UBATUBA)	155BF000016539
+ UNA (BARRA DO UNA)	155BF000002249
+ URB (URBANOVA)	155BF000006589
+ USS (USSU)	155BF000001689
+ VGA (VILA GALVAO)	155CF005393779
+ VHE (VILA HERMINIA)	155BF005225669
+ VJS (VALTER JOSE DOS	155BF000023739
+ VSL (VALE DO SOL)	155BF000006189
	155CF000714789
	REGULADOR
	CAPACITOR
	CHAVE

Figura 5.8: Dados da rede de distribuição importados atualizados no sistema.

Nesta etapa, fica então a critério do usuário selecionar o circuito no qual pretende realizar o estudo. Neste caso foi selecionado o circuito SUZ-1306, conforme ilustrado na Figura 5.8.

Selecionando-se o circuito e o tipo de equipamento, automaticamente a lista com todos os equipamentos é carregada e apresentada na tela para que usuário possa escolher o equipamento da rede a ser analisado.

Nessa lista de equipamento, cada código do equipamento é composto por “Código do Município” – “Tipo de equipamento” – “Numeração de Cadastro”, a exemplo da Figura 5.10, no qual foram selecionados os equipamentos catalogados como “Chave” do circuito SUZ-1306, em

que todas as chaves pertencem à cidade de Suzano-SP, código admitido como 155. Já o tipo de equipamento, está categorizado da seguinte forma:

- **BF:** Chave tipo Base-Fusível;
- **CF e FF:** Chave tipo Chave-Faca;
- **RL:** Chave tipo Religador Automático.

Os últimos 9 dígitos são referentes aos códigos sequenciais de cadastro dos equipamentos na base de ativos da concessionária.

Local	Código	Seleção
CAC (CACAPAVA)	155BF000006239	
CAR (CARAGUATATUBA)	155BF005455389	
CMB (CUMBICA)	155BF005251559	
COL (COLORADO)	155BF000001629	
CPA (CACHOEIRA PAULI)	155FF000704719	
CRU (CRUZEIRO)	155BF000023709	
CSO (CESAR DE SOUZA)	155CF005225739	
DUT (DUTRA)	155BF005266889	
FER (FERRAZ)	155BF000001829	
GOP (GOPOUVA)	155BF000016849	
GUE (GUARAREMA)	155BF000002969	
GUL (GUARULHOS)	155BF000006909	
GUR (GUARATINGUETÁ)	155RL000716939	
INP (INDEPENDENCIA)	155BF000021369	
IPO (IPORANGA)	155BF000006029	
ITQ (ITAQUAQUECETUBA)	155CF005293899	
JAC (JACAREI)	155BF000016519	
JAM (JAMBEIRO)	155BF005491409	
JAR (JARDIM)	155BF005203519	
JCE (JOSE CENTRO)	155BF000021359	
JNO (JOAO NOVAES)	155BF000002689	
KMA (KIDA MACEDO)	155BF005137049	
LOR (LORENA)	155BF000001639	
MAP (MANUEL AREIAS F)	155BF000023719	
MAS (MASSAGUACU)	155CF000704659	
MCI (MOGI CIDADE)	155BF000021289	
MRE (MARESIAS)	155BF005456019	
MRM (MIRIM)	155BF005456029	
PED (PEDREIRA)	155BF005456039	
PID (PINDAMONHANGAI)	155BF005456049	
PIL (PARQUE INDUSTRIAL)	155BF005314489	
PME (PIMENTAS)	155BF000016539	
PNO (PORTO NOVO)	155BF000002249	
POA (POA)	155BF000006589	
PTE (PARQUE TECNOLÓGICO)	155BF000001689	
SAL (SALESOPOLIS)	155CF005393779	
SAT (SATÉLITE)	155BF005225669	
SBR (SANTA BRANCA)	155BF000023739	
SJC (SAO JOSE DOS CAMPOS)	155BF000006189	
SKO (SKOL)	155CF000714789	
SLU (SAO LUIZ)	155BF005225659	
SSC (SAO SEBASTIAO - SP)	155RL000700459	
SUZ (SUZANO)	155BF000006089	
RSUZ 1308	155BF000002379	
RSUZ 1303	155BF000001849	
RSUZ 1390	155BF000022319	
RSUZ 1311	155BF005225679	
RSUZ 1310	155BF000001549	
RSUZ 1391	155BF000016469	
RSUZ 1309	155BF000006109	
RSUZ 1307	155BF000016529	
RSUZ 1306	155CF005393339	
RSUZ 1304	155CF000722739	
RSUZ 1302	155BF005217159	
RSUZ 1301	155BS005448799	
RSUZ 1305	155BF000002069	
TAU (TAUBATÉ)	155BF000016479	

Figura 5.9: Selecionando o circuito e o tipo de equipamento.

A seleção dos equipamentos é necessária, pois, através destes equipamentos é possível identificar os para-raios neles instalados.

De forma semelhante o usuário deve escolher o diretório do arquivo contendo os dados referentes às ocorrências das descargas atmosféricas, por meio do menu “Banco de dados de descargas atmosféricas”, conforme Figura 5.10.

Figura 5.10: Importando a base de dados das descargas atmosféricas na rede de distribuição.

Assim que definido o diretório, o usuário deve selecionar o banco de dados contendo as informações das descargas atmosféricas que ocorreram na rede de distribuição, conforme ilustrado na Figura 5.11.

Figura 5.11: Selecionando o banco de dados das descargas atmosféricas.

Assim que definido o diretório, o usuário deve selecionar o banco de dados contendo as informações das descargas atmosférica registradas na rede de distribuição, conforme ilustrado na Figura 5.11.

Selecionando-se o banco das descargas atmosféricas, de acordo com o circuito selecionado, a tela de mapa georreferenciado é exibida ao usuário contendo todos os pontos de descargas atmosféricas nas suas respectivas coordenadas geográficas.

Na Figura 5.12 e Figura 5.13 cada ponto na cor vermelha representa os pontos onde ocorreram as descargas, já as linhas na cor azul referem-se ao traçado do circuito selecionado.

Figura 5.12: Mapa georreferenciado das descargas atmosféricas.

Figura 5.13: Ampliação do mapa georreferenciado das descargas atmosféricas.

Após a seleção dos bancos relacionados à rede de distribuição e descargas atmosféricas é necessário que o usuário cadastre o parâmetro do modelo de degradação dos para-raios instalados na rede importada.

Para que este cadastro seja feito, o usuário deve selecionar o menu “Modelo de degradação de para-raios” conforme é ilustrado na Figura 5.14.

Figura 5.14: Selecionando o menu “Modelo de degradação de para-raios”.

No menu “Modelo de degradação de para-raios” são apresentados os campos que o usuário deverá preencher com os parâmetros nominais e de ensaios do para-raios, conforme a Figura 5.15. Assim, preenchendo os campos, com as informações coletadas através do ensaio conforme Anexo I, o usuário deve confirmar a configuração dos parâmetros inseridos, conforme a Figura 5.16.

Parâmetros do modelo de degradação de para-raios									
Parâmetros nominais									
Modelo	<input type="text"/>								
Tensão nominal (kVrms)	<input type="text"/>								
Tensão de operação contínua (kVrms)	<input type="text"/>								
Máxima tensão residual para impulso de corrente íngreme (kVpico)	<input type="text"/>								
Corrente nominal (kA)	<input type="text"/>								
Parâmetros de ensaios									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Limite inferior</th> <th>Limite superior</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tensão residual (kVpico)</td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Resistência inversa (Ohms)</td> <td><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>Fator de não-linearidade</td> <td><input type="text"/></td> </tr> </tbody> </table>	Limite inferior	Limite superior	Tensão residual (kVpico)	<input type="text"/>	Resistência inversa (Ohms)	<input type="text"/>	Fator de não-linearidade	<input type="text"/>
Limite inferior	Limite superior								
Tensão residual (kVpico)	<input type="text"/>								
Resistência inversa (Ohms)	<input type="text"/>								
Fator de não-linearidade	<input type="text"/>								
<input type="button" value="Confirmar configuração"/> <input type="button" value="Cancelar"/>									

Figura 5.15: Campos a serem preenchidos no menu “Modelo de degradação de para-raios”.

Parâmetros do modelo de degradação de para-raios									
Parâmetros nominais									
Modelo	Balestro PBP 10/								
Tensão nominal (kVrms)	10								
Tensão de operação contínua (kVrms)	8,4								
Máxima tensão residual para impulso de corrente íngreme (kVpico)	36,6								
Corrente nominal (kA)	10								
Parâmetros de ensaios									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Limite inferior</th> <th>Limite superior</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tensão residual (kVpico)</td> <td>24,4157974981737 / 27,1269465079209</td> </tr> <tr> <td>Resistência inversa (Ohms)</td> <td>-18,2394242115194 / -15,7189527302928</td> </tr> <tr> <td>Fator de não-linearidade</td> <td>-0,13522198759376 / -0,105877131560221</td> </tr> </tbody> </table>	Limite inferior	Limite superior	Tensão residual (kVpico)	24,4157974981737 / 27,1269465079209	Resistência inversa (Ohms)	-18,2394242115194 / -15,7189527302928	Fator de não-linearidade	-0,13522198759376 / -0,105877131560221
Limite inferior	Limite superior								
Tensão residual (kVpico)	24,4157974981737 / 27,1269465079209								
Resistência inversa (Ohms)	-18,2394242115194 / -15,7189527302928								
Fator de não-linearidade	-0,13522198759376 / -0,105877131560221								
<input type="button" value="Confirmar configuração"/> <input type="button" value="Cancelar"/>									

Figura 5.16: Campos preenchidos no menu “Modelo de degradação de para-raios”.

5.5.2.) Efetuando os Cálculos das Sobretensões de Origem Atmosféricas

De acordo com o objetivo desta dissertação, neste tópico é apresentado os cálculos das sobretensões de origem atmosférica. Como exemplo, quando um determinado equipamento da rede é selecionado, desejando-se verificar as sobretensões calculadas neste dispositivo, se faz necessário que o usuário acesse a guia “Avaliação de degradação de para-raios para o ativo selecionado”, conforme Figura 5.17.

Figura 5.17: Acessando a guia “Avaliação de degradação de para-raios para o ativo selecionado”.

A tela é automaticamente atualizada e apresentada ao usuário, conforme a Figura 5.18, com os resultados das sobretensões de origem atmosféricas calculadas, classificados em máximo, médio e mínimo. Neste exemplo, para o equipamento selecionado os cálculos apresentaram os valores de 27,13 kVpico, 13,24 kVpico e 12,13kVpico, respectivamente. Além deste resumo, é apresentado de forma gráfica os níveis de sobretensões ao longo dos anos no qual o para-raios foi submetido.

Figura 5.18: Tela com cálculo das sobretensões de origem atmosférica.

Ao selecionar o item “Correntes de descarga” é apresentado ao usuário as correntes de descarga pelos para-raios em forma gráfica, ao longo dos anos de registro, conforme Figura 5.19.

Figura 5.19: Tela com as correntes de descarga pelos para-raios.

Finalmente, com os cálculos das sobretensões efetuados é possível estimar a redução de vida útil do para-raios, de acordo com o seu respectivo modelo de degradação. Ao selecionar a guia “Redução de vida útil” é apresentada ao usuário a estimativa da redução de vida útil do para-raios frente às descargas atmosféricas ocorridas em seu entorno, conforme Figura 5.20.

Figura 5.20: Tela com a estimacão de vida uil dos para raios.

Neste exemplo, estima-se que os para-raios instalado no equipamento selecionado teve uma reduo máxima de 3,3 anos.

Além da forma individual do cálculo de sobretensão, para otimizar o tempo de processamento, por meio do menu “Análise de degradao de para-raios”, foi elaborado um mecanismo de análise no qual o usuário pode processar todo cálculo de sobretensões de origem atmosférica indireta e estimar a reduo de vida uil dos para-raios para todos os equipamentos da rede de concessão em lote. Para que este procedimento aconteça  necessário que o usuário selecione o menu “Análise de degradao de para-raios”, clicando em “Realizar análise”, conforme Figura 5.21.

Figura 5.21: Acessando o menu “Análise de degradao de para-raios”.

Na sequência, o usuário deve selecionar a subestao e o circuito no qual deseja ter seus cálculos efetuados, conforme Figura 5.22, podendo ter a flexibilidade de selecionar somente a subestao e ter o cálculo feito para todos os para-raios dos seus circuitos pertencentes e clicar no botão “iniciar estimativa”.

Seleção de subestação e circuito

Subestação

SUZ (SUZANO)

Circuito

RSUZ 1306

Iniciar estimativa

Código Equipamento	Tensão nominal (kV)	X UTM	Y UTM	Densidade de descargas (descargas/ano)	Intensidade média de descargas (kA/descarga)	Densidade efetiva (descargas/km ² /ano)	Intensidade efetiva (kV)	Máxima distância efetiva (m)	Sobretensão 5% (kV)	Sobretensão 25% (kV)	Sobretensão 50% (kV)	Sobretensão 75% (kV)	Sobretensão 95% (kV)	Taxa de degradação (anos/ano)
--------------------	---------------------	-------	-------	--	--	--	--------------------------	------------------------------	---------------------	----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-------------------------------

Exportar relatório

Fechar mecanismo de análise

Figura 5.22: Seleccionando o circuito no “mecanismo de análise”.

Após o processamento do sistema especialista, o resultado dos cálculos das sobretensões e estimativas são exibidos na tela para o usuário, conforme ilustra a Figura 5.23, com possibilidade de ser exportado em formato de arquivo com extensão .xlsx, ou seja, planilha eletrônica de Excel.

Seleção de subestação e circuito

Subestação

SUZ (SUZANO)

Circuito

RSUZ 1306

Iniciar estimativa

Código Equipamento	Tensão nominal (kV)	X UTM	Y UTM	Densidade de descargas	Intensidade média de descargas (kA/descarga)	Densidade efetiva (descargas/km ² /ano)	Intensidade efetiva (kV)	Máxima distância efetiva (m)	Sobretensão 5% (kV)	Sobretensão 25% (kV)	Sobretensão 50% (kV)	Sobretensão 75% (kV)	Sobretensão 95% (kV)	Taxa de degradação (anos/ano)
155ET005239959	13,8	3484152	74036410	2	19,68	1,1	24,57	591	23,5	24,5	25,1	26	31,3	1
155ET005239949	13,8	3492432	74032600	2	18,8	0,3	29,5	754	23,8	24,9	26	26,2	26,5	1
155ET005239939	13,8	3482192	74039250	4	18,72	0,9	25,64	676	23,3	24	27,1	28,3	29,6	1
155ET005094589	13,8	3499640	74044880	5,4	20,44	2,1	24,69	966	23,9	25,3	30	34,7	39,3	1,08135
155ET005134599	13,8	3492754	74047930	4,5	19,95	2,1	26,81	581	23,1	26,2	27,4	29	34,6	1
155ET005403579	13,8	3500485	74048100	4,2	21,09	2,2	23,64	829	25,9	33,8	39,3	39,3	39,3	1,20339
155ET000098649	13,8	3498063	74040090	3,3	20	1,2	27,67	1128	23,2	23,9	28,5	32,7	38,1	1,01356
155ET005106239	13,8	3482002	74044900	5,6	18,69	1,2	26,33	697	23,4	24	25,1	26,4	31,7	1
155ET005343629	13,8	3484932	74041370	6,4	18,83	0,6	29,43	728	23,2	23,3	24,5	25,7	26,2	1
155ET000007129	13,8	3498625	74040120	3,3	20	1,2	27,67	1075	23,3	24,2	28,6	32,9	38,2	1,01356
155ET000093589	13,8	3497806	74042240	3,3	20	1,1	29,07	571	23,4	24,4	26,3	28,1	34,2	1
155ET000098459	13,8	3496322	74046740	4,5	19,95	2,1	22,52	805	24,2	29,1	35,1	39,1	39,3	1,09611
155ET000021619	13,8	3498717	74039030	3,3	20	1,3	22,56	1039	23,9	26,4	36,5	39,3	39,3	1,06842
155ET000098459	13,8	3497682	74044190	3,3	20	1,2	27,67	743	23,5	27	28,5	34,8	38,4	1,04356

Exportar relatório

Fechar mecanismo de análise

Figura 5.23: Resultado após processamento do “mecanismo de análise”.

Com arquivo exportado, conforme ilustrado na Figura 5.24, o usuário pode utilizar o resultado de acordo com a necessidade da formatação desejada. Este formato foi escolhido por ser de fácil integração com variados sistemas corporativos.

Salvamento Automático 1-Taxa de Degradação Fabricio Expedito Viana

Arquivo Página Inicial Inserir Power View Desenhar Layout da Página Fórmulas Dados Revisão Exibir Desenvolvedor Ajuda EPM Data Manager Pesquisar Power Pivot Digite-me

Calibri 11 A+ Quebrar Texto Automaticamente Geral

Colar N I S B Qbr Mesclar e Centralizar % 000 0,00 0,00

Formatação Condicional Formatar como Tabela Estilos de Célula Excluir e Filtrar Classificar e Localizar e Selecionar Edição

	Código	Tensão nominal (kV)	X UTM	Y UTM	Densidade de descargas	Intensidade média de descargas (kA/descarga)	Densidade efetiva (descargas/km ² /ano)	Intensidade efetiva (kV)	Máxima distância efetiva (m)	Sobretensão 5% (kV)	Sobretensão 25% (kV)	Sobretensão 50% (kV)	Sobretensão 75% (kV)	Sobretensão 95% (kV)	Taxa de degradação (anos/ano)
7	Equipamento														
2732	ISSE T005239958	13,8	3484152	74036410	2	19,68	1,1	24,57	591	23,5	24,5	25,1	26	31,3	1
2735	ISSE T005239949	13,8	3492432	74032600	2	18,8	0,3	29,5	754	23,8	24,9	26	26,2	26,5	1
2740	ISSE T005239939	13,8	3482192	74039250	4	18,72	0,9	25,64	676	23,3	24	27,1	28,3	29,6	1
2763	ISSE T005094589	13,8	3499640	74044880	5,4	20,44	2,1	24,69	966	23,9	25,3	30	34,7	39,3	1,08135
2785	ISSE T005134599	13,8	3492754	74047930	4,5	19,95	2,1	26,81	581	23,1	26,2	27,4	29	34,6	1
2787	ISSE T005403579	13,8	3500485	74048100	4,2	21,09	2,2	23,64	829	25,9	33,8	39,3	39,3	39,3	1,20339
2790	ISSE T000098649	13,8	3498063	74040090	3,3	20	1,2	27,67	1128	23,2	23,9	28,5	32,7	38,1	1,01356
2795	ISSE T005106239	13,8	3482002	74044900	5,6	18,69	1,2	26,33	697	23,4	24	25,1	26,4	31,7	1
2796	ISSE T005343629	13,8	3484932	74041370	6,4	18,83	0,6	29,43	728	23,2	23,3	24,5	25,7	26,2	1
2815	ISSE T000007129	13,8	3498625	74040120	3,3	20	1,2	27,67	1075	23,3	24,2	28,6	32,9	38,2	1,01356
2817	ISSE T000093589	13,8	3497806	74042240	3,3	20	1,1	29,07	571	23,4	24,4	26,3	28,1	34,2	1
2818	ISSE T000098459	13,8	3496322	74046740	4,5	19,95	2,1	22,52	805	24,2	29,1	35,1	39,1	39,3	1,09611
2821	ISSE T000021619	13,8	3498717	74039030	3,3	20	1,3	22,56	1039	23,9	26,4	36,5	39,3	39,3	1,06842
2823	ISSE T000098469	13,8	3497682	74044190	3,3	20	1,5	25,47	743	24,6	27	28,6	34,9	38,4	1,01356
2824	ISSE T000074999	13,8	3497702	74044810	5,7	19,57	1,9	23,17	804	24,1	26,2	30,4	37	39,3	1,08135
2827	ISSE T005231659	13,8	3503672	74031830	5,1	19,86	0,6	34,63	730	24	24,2	24,4	26,1	31	1
2828	ISSE T005336129	13,8	3504822	74031310	5,1	19,86	0,7	33,89	826	23,4	24,7	25,1	25,3	32	1
2868	ISSE T000004189	13,8	3500682	74030270	1,4	18,53	0,2	42,5	1057	24,9	24,9	26,2	27,5	27,5	1
2871	ISSE T000057219	13,8	3501840	74034540	4,9	19,81	1,3	28,25	744	23,8	24,2	26,2	30,1	36,9	1,01356

1-Taxa de Degradação

Figura 5.24: Modelo do arquivo exportado com o resultado do sistema especialista.

O relatório exportado possui as seguintes colunas:

- Tensão nominal (kV);
- X UTM;
- Y UTM;
- Densidade de descargas (descargas/ano/km²);
- Intensidade média de descargas (kA/descarga);
- Densidade efetiva (descargas/km²/ano);
- Intensidade efetiva (kV);
- Máxima distância efetiva (m);
- Sobretensão 5% (kV);
- Sobretensão 25% (kV);
- Sobretensão 50% (kV);
- Sobretensão 75% (kV);
- Sobretensão 95% (kV);
- Taxa de degradação (anos/ano).

Os dados para simulação inseridos neste sistema são de propriedades da concessionária EDP-SP, sendo que para todas as simulações utilizou-se os dados de 2014 à 2018.

Assim, o sistema especialista desenvolvido por meio de uma metodologia, disponibiliza como resultado, a estimacão da deterioração de para-raios de um sistema de distribuição de energia de 13,8 kV, através de cálculo de sobretensões induzidas em um modelo de degradação do para-raios desenvolvido em outro produto de P&D que esta pesquisa está inserida.

Com os resultados obtidos por meio do desenvolvimento deste sistema especialista, torna-se possível a manutenção preventiva da rede de distribuição com as substituições dos para-raios degradados. Pois, todo o cálculo que um especialista a respeito do assunto necessitaria fazer, o sistema especialista já está apto a processar e apresentar resultados consistentes, necessitando apenas de um usuário, sem a necessidade de ser um especialista no assunto.

As informações referentes às taxas de degradação dos para-raios contribuem para o setor de planejamento da manutenção de um sistema de distribuição energia, pois através delas é possível a elaboração de planos com cronogramas bem definidos, com o objetivo de evitar ocorrências de desligamentos não programados na rede de concessão, queima de equipamentos da rede e custos operacionais decorrentes. Este planejamento contribui para melhoria nos indicadores de qualidade e continuidade do sistema elétrico. Consequentemente, potencializa-se a satisfação dos consumidores de energia desta concessionária, papel este fundamental de uma concessionária de energia.

5.6.) RESULTADOS CONSOLIDADOS OBTIDOS ATRAVÉS DO SISTEMA ESPECIALISTA

Com o resultado obtido do sistema especialista é possível efetuar uma análise de sensibilidade a respeito do diagnóstico. O processamento de cálculo foi feito para todos os equipamentos do tipo estação transformadora do município de Suzano-SP. Verifica-se que 5% dos equipamentos de transformação de média para baixa tensão, ET, foram impactados com níveis de sobretensão de origem atmosférica acima de 95 % (kV) das tensões nominais dos para-raios instalados nestes equipamentos, conforme Figura 5.25, e 4 % dos equipamentos com sobretensões 5% (kV), conforme gráfico da Figura 5.26.

Figura 5.25: Níveis de sobretensões induzidas 95% (kV) por equipamento.

Figura 5.26: Níveis de sobretensões induzidas 5% (kV) por equipamento.

Neste sentido, é possível verificar a relação entre a intensidade efetiva (kV) e as sobretensões induzidas, assim como a relação das sobretensões 95% (kV) e a densidade efetiva (descargas/km²/ano), conforme Figura 5.27 e Figura 5.28, respectivamente:

Figura 5.27: Correlação entre níveis de sobretensões induzidas (95%) e intensidade efetiva (kV).

Figura 5.28: Correlação entre níveis de sobretensões induzidas (95%) e densidade efetiva (descargas/km²/ano).

Por fim é apresentado a relação entre as sobretensões 95% (kV) e a sua contribuição para a taxa de degradação (anos/ano) da vida útil dos para raios instalados nestes equipamentos, conforme Figura 5.29. Ademais, através das coordenadas disponibilizadas pelo sistema especialista e os históricos de ocorrências de desligamentos da rede de distribuição, apesar de não ser objetivo desta dissertação, foi possível a criação de um mapa geográfico conforme Figura 5.30, evidenciando a potencial correlação das sobretensões induzidas por descargas atmosféricas frente às interrupções não programadas nos equipamentos analisados.

Figura 5.29: Contribuição das sobretensões induzidas 95% (kV) para a taxa de degradação do para-raios instalados nas estações transformadoras do SUZ-1306.

Figura 5.30: Sobretensões induzidas 95% (kV) e impacto nos desligamentos não programados.

Capítulo 6. Conclusão

6.1.) CONSIDERAÇÕES FINAIS

As redes de distribuição de energia estão frequentemente expostas às sobretensões causadas por descargas atmosféricas diretas e indiretas. Posto isto, a presente dissertação foi motivada por tal relevância do tema ao setor elétrico, sendo assim, por meio desta, desenvolveu-se um sistema especialista capaz de calcular as sobretensões induzidas nos para-raios de uma rede de distribuição de energia elétrica situada no estado de SP. Assim sendo, por meio deste sistema especialista é possível estimar a redução da vida-útil dos para-raios frente às descargas atmosféricas indiretas.

O desenvolvimento desta pesquisa contribui para integração de métodos computacionais, pois envolveu simulações de sobretensões devido às descargas atmosféricas indiretas e critério técnico, devido ao fato de se estimar a redução da vida útil dos para-raios frente às descargas atmosféricas. Para que o objetivo fosse alcançado, inicialmente, fez-se necessário abordar conceitos relativos ao fenômeno das descargas atmosféricas, dando maior enfoque às descargas indiretas.

Já para que a implementação computacional do cálculo das sobretensões fosse feita no sistema especialista, foi necessário efetuar uma revisão bibliográfica dos modelos existentes, na qual foi utilizado a contribuição ao setor elétrico feita por Sune Rusck em sua tese de doutorado, Rusck (1957), conhecido como Modelo de Rusck. Porém, nesta pesquisa este método foi aprimorado considerando formas de ondas arbitrárias para as correntes de descargas, a terminação das redes de distribuição e a inclusão de elementos não lineares (para-raios). No tocante aos elementos não lineares, fez-se necessário, de forma resumida, apresentar os conceitos de operação e forma construtiva dos para-raios.

Por tanto, em virtude do desenvolvimento do sistema especialista em cálculo de sobretensões induzidas, pode-se então fornecer apoio à decisão para substituição preventiva de para-raios no sistema de distribuição. De maneira sucinta, a substituição de para-raios deixa de estar em ações de manutenção corretiva para constar no plano de manutenções preventivas do sistema de distribuição. Enfatiza-se que o sistema desenvolvido permite uma maior velocidade de processamento para obtenção dos cálculos de sobretensões induzidas e a respectiva redução de vida útil do conjunto de para-raios, quando comparado à metodologia atual para identificação de para-raios danificados de muitas concessionárias do país, além de que, agrega-se segurança e

maior confiabilidade ao sistema de distribuição, pois atuando de forma preventiva os indicadores de qualidade e continuidade tendem a se performar em níveis de excelência aos consumidores de energia.

6.2.) PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Os desenvolvimentos contemplados nesta dissertação de mestrado abrem espaço para que outros trabalhos sejam realizados de forma a complementar a pesquisa feita até aqui.

Neste contexto propõe-se que seja investigado como uma determinada região delimitada por para-raios é impactada por sobretensão de origem atmosférica, analisando os impactos das sobretensões em um setor composto por equipamentos inerentes ao setor elétrico de distribuição mediante as medidas reais em campo.

Em relação ao cálculo das sobretensões, motiva-se que sejam elaboradas pesquisas relacionadas aos modelos de cálculos de sobretensão induzida por para-raios, considerando a geometria da topologia da rede, a exemplo de uma rede de geometria compacta quando comparado com uma rede de geometria convencional.

Já para prosseguimento desta pesquisa, sugere-se que sejam elaborados estudos, baseados em inteligência artificial, para identificação da correlação entre os cálculos de sobretensão e a deterioração das cruzetas de madeiras instaladas nas redes de distribuição.

Outra iniciativa que esta pesquisa potencializa é a necessidade da criação de um algoritmo multi-objetivo para priorização da substituição dos para-raios de acordo com a taxa de depreciação calculada nesta pesquisa, porém, levando-se em consideração indicadores de qualidade versus impacto financeiro em OpEx.

Capítulo 7. Referências Bibliográficas

- ABB. *High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide*. Edition 9.1, English, February 2012.
- 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.
- A. ANDREOTTI, A. PIERNO AND V. A. RAKOV, "A New Tool for Calculation of Lightning-Induced Voltages in Power Systems—Part II: Validation Study," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 30, no. 1, pp. 334-341, Feb. 2015.
- 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, área de concentração em Sistemas Dinâmicos, 2013.
- BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H. Parameters of lightning flashes. *Electra*, nº 41, pp. 23-37, July, 1975.
- BEWLEY, L. A. W. Traveling waves due to Lightning. *AIEE Transactions*, nº 48, pp. 1050-1064, 1929.
- BERARDO, Benício L.; MARTINS, André C. P.; SOUZA, André N. Influência dos contrapesos em linha de transmissão de energia elétrica de 88 kV frente à incidência de descargas atmosféricas. In: I Seminário da Pós-graduação em Engenharia Elétrica, FEB – Faculdade de Engenharia Bauru, UNESP – Universidade Estadual Paulista. 2011.
- 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.
- CAMPOS, A.F.M. Cálculo de sobretensões causadas por descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição aéreas considerando falhas de isolamento. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, área de concentração Automática, 2012.
- 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.
- CEPEL - ELETROBRAS, *Curso sobre Para-raios de distribuição, Estação e Linhas de Transmissão*. 53 p., 1977.
- 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.
- 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.

- 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.
- EPRI. *Transmission Line Lightning and Grounding Reference Book*. Gray Book, Electric Power Research Institute (EPRI), Power Delivery & Utilization, December, 2011.
- ELAT, página inicial do site do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>, acessado em 09/07/2012.
- FEIGENBAUM, E. A. et al., “On Generality and Problem Solving: A Case Study Using The Dendral Program”, *Machine Intelligence*, nº 6, pp. 165-190, 1971.
- 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.
- 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.
- FRANCO, J. L. *Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão*. Franco Engenharia, São Paulo, p. 174, 2001.
- FRANCO, J. L. *Treinamento técnico: Aplicação de para-raios em subestações*. ELETROSUL, Florianópolis, SC, Brasil, Outubro, 2008.
- 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.
- BATISTA, G. H. A. *Modelagem de Para-Raios Baseada em Ensaios Elétricos*. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- HEIDLER, F. Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP. Berechnung, *Proceedings of 18th ICLP*, Munique, 1995, pp.63-66.
- HINRICHSSEN, V. *Metal-oxide Surge Arrester, Fundamentals*. 1 st Edition, Siemens AG, Berlin, Germany, 2001.
- IEC 60099-4 – “Surge Arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems” – edition 2.2 – 2009-05 – International Electrotechnical Commission– Geneva – 2009.
- 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.
- 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.
- 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.

- 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.
- 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.
- JANISZEWSKI, J. M. Lightning-induced voltages on overhead lines application of the extended rusck model. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 51, n. 3, p. 548–558, 2009
- KINDERMANN, G. Descargas Atmosféricas. 1ª Ed, Sagra-DC Luzzatto Editores, Porto Alegre, RS, 1992.
- 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.
- 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.
- 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.
- MAMEDE, J. F. *Manual de Equipamentos Elétricos*. Ed. Livros Técnicos e Científicos, Vol.1, 3ª edição, Rio de Janeiro, 2005.
- MATSUOKA, M. Nonohmic Properties of Zinc Oxide Ceramics. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 10, nº 6, pp. 736-746, June, 1971.
- MATSUOKA, M. Progress in Research and Development of Zinc Oxide Varistors. *Advances in Ceramics*, Vol. 7, pp. 290-308, 1981.
- 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.
- MENDES, Raquel Dias. Inteligência Artificial: Sistemas Especialistas No Gerenciamento Da Informação. *Ci. Inf.*, Brasília, v. 26, n. 1, p. , Jan. 1997.
- 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 April 2003.
- MODRUSAN, M. Tests on High-Voltage Metal Oxide Surge Arresters with Impulse Currents. *Fourth International Symposium on High Voltage Engineering*, Athens, Greece, 1983.
- 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.
- M. S. GOLSHANIRAD AND A. A. RAZI-KAZEMI, "Investigation of the Induced Overvoltages Caused by the Indirect Lightning Strike in Power Distribution Lines," *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Yazd, Iran, 2019, pp. 609-613.

- 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.
- NBR 5419: Proteção de Estruturas Contra Descargas Atmosféricas, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 2005.
- NOBLAT, B. M. Lightning and HV electrical installations. Cahier Technique Merlin Gerin n° 168, 1994.
- 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, Dezembro, 2004.
- 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.
- PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Analysis of three different theories for computation of induced voltages on distribution lines due to nearby lightning. International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, p.127-132, Buenos Aires, Dec. 1996.
- PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, n° 5, pp. 2799-2802, 1998.
- PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. The Extended Rusck Model for calculating lightning induced voltages on overhead lines. Proceedings of the 7th International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Curitiba, pp. 151-155, November, 2003.
- PIANTINI, A.; "Extension of the Rusck Model for Calculating Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines Considering the Soil Electrical Parameters," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 59, no. 1, pp. 154-162, Feb. 2017.
- 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.
- 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, n° 1, January, 1997.
- SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. *IEEE Power Engineering Review*, Vol. 11, n° 8, p. 11-13, August, 1991.
- SANTOS, P. H. M. *Análise de desempenho frente a impulsos atmosféricos induzidos em circuitos de média tensão*. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- SANTOS, Nerivaldo dos Reis. Sistema especialista para seleção otimizada de dispositivos de proteção de transformadores frente às descargas atmosféricas. 2011. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- SARAN, M. A. M. *Sobretensões de Origem Atmosférica em Linhas de Média Tensão*. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Fevereiro, 2009.

- 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.
- SARAN, M. A. M. Sobretensões de Origem Atmosférica em Linhas de Média Tensão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Fevereiro, 2009.
- 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.
- SILVA, Alexandre Rigotti. Avaliação do comportamento de isoladores de média tensão frente a sobretensões atmosféricas bipolares. 2018. Tese (Doutorado em Energia) - Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- SILVA, Adelino Pereira. Melhorias de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: desenvolvimento de sistema de informações e análise de casos. Belo Horizonte, dez. 2007.
- 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.
- UMAN, M. A. Lightning. Ed. McGraw-Hill Book Company, 1984.
- 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.
- 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.
- ZANETTA Jr, L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. Editora EDUSP, 2003.

ANEXO I. ENSAIOS – DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA DEGRADAÇÃO DOS PARA-RAIOS

I.1. INTRODUÇÃO

O modelo de degradação de para-raios instalados em sistemas de distribuição de energia elétrica é baseado no modelo matemático do relacionamento tensão por corrente do para-raios. A partir desse modelo é possível estimar a corrente de operação contínua do para-raios em condições de tensão nominal e também é possível calcular a dissipação de potência.

Considerando-se o perfil de temperatura diária, determina-se a temperatura de operação do para-raios. Após empregar-se a equação de Arrhenius é possível estimar a redução de vida útil do para-raios.

I.2. METODOLOGIA DE ENSAIO

Com relação ao modelo matemático do para-raios, tem-se que o mesmo tem seus parâmetros degradados em função de altas temperaturas e em função das descargas atmosféricas. A literatura técnica sobre os resistores de óxido de zinco fornece o seguinte comportamento.

- A cada dia que um para-raios opera à temperatura de 65 °C tem-se a redução de aproximadamente 9 dias em sua vida útil.
- A cada dia que um para-raios opera à temperatura de 95 °C tem-se a redução de aproximadamente 5 meses em sua vida útil.

A fim de confirmar as afirmações da literatura para o cenário do sistema de distribuição da EDP, foram então realizados ensaios experimentais. Os ensaios iniciais em para-raios novos foram conduzidos em 10 exemplares, marca Balestro, Modelo PBP10/10, sendo os dados nominais do PBP-10 os seguintes:

- Tensão de operação contínua: 8.4 kV.
- Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme: 36.6 kV.
- Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500 A: 27 kV.
- Máximas Tensões Residuais: 5 kA – 31.0 kV e 10 kA – 33.0 kV

O procedimento de ensaio envolve a aplicação de tensão contínua no para-raios. A cada patamar de tensão a corrente e a temperatura são registradas. O registro da temperatura é de fundamental importância para que seja feita a compensação da tensão quando da obtenção do modelo.

Para os ensaios em questão foi empregada uma fonte para até 85 kV e 2 mA. e o registro térmico de um dos dispositivos ensaiados no início do referido experimento. Já na Figura 3.3, tem-se o registro ao fim do ensaio.

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT01
<div> <div> <p>Máx. = 25.47 Média = 24.30 Min. = 23.80</p> <p>24.19</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 26.77 Média = 25.85 Min. = 25.09</p> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div> </div>		
<p style="text-align: right;">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT02
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT02	10.15	50.7	32.3	34.0	34.5	34.9

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT02
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 26.61</div> <div>Média = 25.36</div> <div>Min. = 24.78</div> </div> <div> <div>29.78</div> </div> </div> <div> <div>29.8</div> <div>24.3 °C</div> </div> </div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 28.58</div> <div>Média = 26.28</div> <div>Min. = 25.09</div> </div> <div> <div>31.98</div> </div> </div> <div> <div>32.1</div> <div>24.7 °C</div> </div> </div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div>		
<div> <div>Bauru, Dezembro de 2016</div> <div>Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</div> </div>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT03
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT03	4.25	26.2	24.4	24.8	24.9	25.0

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luís de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT03
<p>Máx. = 26.27 Média = 25.24 Min. = 24.53</p> <p>27.14 27.33</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p>	<p>Máx. = 27.67 Média = 26.41 Min. = 25.27</p> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p>	
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT04
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT04	7.44	34.5	28.0	29.0	29.2	29.5

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luís de Lima Silva

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT05
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT05	3.82	26.1	24.4	24.8	24.9	25.0

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luís de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT05
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 25.38</div> <div>Média = 24.32</div> <div>Min. = 23.73</div> </div> <div> </div> </div> <div> <div> <div>Máx. = 26.92</div> <div>Média = 25.79</div> <div>Min. = 24.75</div> </div> <div> </div> </div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div></div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT06
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT06	5.16	30.5	26.3	27.0	27.2	27.4

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT06
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 25.83</div> <div>Média = 24.78</div> <div>Min. = 24.16</div> </div> <div> <div>28.95</div> </div> </div> <div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> </div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 27.27</div> <div>Média = 26.01</div> <div>Min. = 24.98</div> </div> <div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div> </div> </div>		
<div> <div>Bauru, Dezembro de 2016</div> <div>Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</div> </div>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT07
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT07	4.96	23.1	22.5	22.6	22.7	22.7

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT07
<div> <div> <p>Máx. = 25.41 Média = 24.43 Min. = 23.88</p> <p>27.48</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 26.61 Média = 25.67 Min. = 24.50</p> <p>29.34</p> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div> </div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT08
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT08	9.43	32.2	27.9	28.7	28.9	29.1

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT08
<div> <div> <p>Máx. = 25.75 Média = 24.87 Min. = 24.33</p> <p>29.19</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 27.20 Média = 26.12 Min. = 25.13</p> <p>28.70</p> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div> </div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT09
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolção do modelo matemático
---------------------	----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT09	6.24	28.9	26.1	26.6	26.8	26.9

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT09
<div> <div> <p>Máx. = 25.58 Média = 24.53 Mín. = 23.94</p> <p>26.08</p> </div> <div> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> </div> <div> <div> <p>Máx. = 27.27 Média = 26.00 Mín. = 24.92</p> <p>29.31</p> </div> <div> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div> </div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT10
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT10	5.24	22.6	22.1	22.3	22.3	22.4

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT10
<div> <div> <p>Máx. = 25.64 Média = 24.44 Min. = 23.94</p> <p>29.28</p> </div> <div> <p>Máx. = 26.33 Média = 25.41 Min. = 24.58</p> <p>27.95</p> </div> </div>		
Imagem térmica no início do ensaio		Imagem térmica no término do ensaio
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

I.3. Para-raios Após Aquecimento

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas							
Fabricante: Balestro			Modelo: PBP10/10		Identificação: DUT01		
Dados experimentais			Extrapolação do modelo matemático				
Corrente de ensaio (uA)	Tensão (kV)	Temp. (oC)					
1	8.4	65.9					
2	9.1	66.7					
3	9.5	67.5					
4	10.0	68.3					
6	10.5	69.1					
8	10.9	69.9					
10	11.2	70.7					
13	11.8	71.5					
18	12.4	72.3					
25	12.9	73.1					
32	13.4	73.9					
41	13.8	74.6					
56	14.3	75.4					
75	14.8	76.2					
107	15.3	77.0					
130	15.6	77.8					
176	16.0	78.6					
236	16.4	79.4					
305	16.7	80.2					
400	17.0	81.0					
540	17.4	81.8					
760	17.7	82.6					
1038	18.0	83.4					
Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais							
	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT01	11.51	48.7	30.3	31.9	32.4	32.8	74.6
Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva							

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT01
<div> <div> Máx. = 121.48 Média = 83.39 Min. = 26.86 </div> </div> <div> <div> Máx. = 75.95 Média = 65.90 Min. = 27.14 </div> </div>		
Imagem térmica no início do ensaio		Imagem térmica no término do ensaio
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT02
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT02	330.70	53.8	44.3	50.2	52.0	53.8	95.8

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT02
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 131.11</div> <div>Média = 103.45</div> <div>Min. = 26.70</div> </div> <div> </div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 101.84</div> <div>Média = 88.17</div> <div>Min. = 26.94</div> </div> <div> </div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div> </div></div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT03
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua ($U_c = 8.4$ kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT03	17.27	87.8	34.1	36.5	37.2	37.9	57.8

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT03
<div> <div> <div> <div>Máx. = 73.94 Média = 60.61 Min. = 26.78</div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div>Máx. = 62.89 Média = 55.06 Min. = 27.23</div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div> </div></div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT04
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT04	200.65	53.2	32.5	34.7	35.3	35.8	97.4

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT04
<div> <div> <p>Máx. = 120.89 Média = 105.98 Min. = 26.94</p> </div> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <div> <p>Máx. = 103.64 Média = 88.77 Min. = 27.47</p> </div> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT05
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT05	46.58	48.1	31.9	33.7	34.2	34.7	81.7

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT05
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 98.84</div> <div>Média = 88.71</div> <div>Min. = 26.47</div> </div> <div> </div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 84.31</div> <div>Média = 74.60</div> <div>Min. = 26.89</div> </div> <div> </div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div> </div></div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT06
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Corrente de ensaio (uA)	Tensão (kV)	Temp. (oC)	
3	2.7	78.0	
4	3.2	78.5	
5	3.5	79.0	
6	3.9	79.6	
8	4.5	80.1	
10	5.1	80.6	
13	5.8	81.2	
19	6.6	81.7	
27	7.7	82.2	
32	8.1	82.8	
41	8.8	83.3	
55	9.4	83.8	
76	10.2	84.3	
108	10.9	84.9	
134	11.3	85.4	
176	11.9	85.9	
235	12.4	86.5	
316	13.0	87.0	
425	13.6	87.5	
561	14.1	88.1	
728	14.6	88.6	
1050	15.2	89.1

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT06	190.57	42.4	30.8	32.5	32.9	33.3	83.5

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT06
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 105.33</div> <div>Média = 89.11</div> <div>Min. = 27.08</div> </div> <div> </div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 89.61</div> <div>Média = 77.98</div> <div>Min. = 26.94</div> </div> <div> </div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div> </div></div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levamentamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT07
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT07	55.01	47.3	31.4	33.1	33.6	34.1	104.9

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT07
<div> <div> Máx. = 159.75 Média = 118.65 Min. = 27.61 </div> </div> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> <div> <div> Máx. = 105.63 Média = 91.15 Min. = 27.77 </div> </div> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p>		
<p style="text-align: right;">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT08
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT08	41.38	47.6	40.9	45.1	46.3	47.6	57.5

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT08
<div> <div> <div> <div>Máx. = 76.78 Média = 62.06 Min. = 28.17</div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div>Máx. = 59.98 Média = 52.91 Min. = 27.52</div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div> </div></div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT09
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT09	8.58	32.9	27.4	28.3	28.5	28.8	40.2

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT09
<div> <div> <div> <div> <div>Máx. = 50.28</div> <div>Média = 43.00</div> <div>Min. = 25.92</div> </div> </div> <div> <div> <div>Máx. = 41.72</div> <div>Média = 37.35</div> <div>Min. = 24.75</div> </div> </div> </div> <div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> <div>Imagem térmica no término do ensaio</div> </div> </div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

Ensaio de para-raios para fins de levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas

Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT10
----------------------	------------------	----------------------

Dados experimentais	Extrapolação do modelo matemático
---------------------	-----------------------------------

Parâmetros de operação com base nos ensaios experimentais

	Corrente na tensão de operação contínua (Uc = 8.4 kV) (uA)	Máxima Tensão Residual para Impulso de Corrente íngreme (kV pico)	Máxima Tensão Residual para Corrente de Impulso de Manobra 500A (kV pico)	Máximas Tensões Residuais (kV pico)			Temperatura (oC)
				5 kA	10 kA	20 kA	
DUT10	8.31	31.5	26.6	27.4	27.6	27.8	45.8

Bauru, Dezembro de 2016
Eng. Responsável João Luis de Lima Silva

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT10
<div> <p>Máx. = 56.16 Média = 48.43 Min. = 24.44</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 47.86 Média = 43.13 Min. = 24.84</p> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		