UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

GABRIEL HENRIQUE DE AGUIAR BATISTA

Modelagem de Para-Raios Baseada em Ensaios Elétricos

São Carlos

2019

GABRIEL HENRIQUE DE AGUIAR BATISTA

Modelagem de Para-Raios Baseada em Ensaios Elétricos

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. Rogério Andrade Flauzino

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).

B333m Batista, Gabriel Henrique de Aguiar
 Modelagem de para-raios baseada em ensaios
 elétricos / Gabriel Henrique de Aguiar Batista;
 orientador Rogério Andrade Flauzino. 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. Para-raios de distribuição. 2. Dispositivo de
 proteção. 3. Sobretensões induzidas. 4. Ensaio
 elétricos. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GABRIEL HENRIQUE DE AGUIAR BATISTA.**

Título da dissertação: "Modelagem de para-raios baseada em ensaios elétricos".

Data da defesa: 19/12/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Silvio Giuseppe Di Santo**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Fabricia Guimarães Baptista**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru)

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 Anne e filho Miguel,
pelo carinho e incansável apoio durante
esses anos de renúncias e realizações na
elaboração deste trabalho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por proporcionar inúmeras oportunidades de crescimento pessoal e profissional assim como as condições necessárias para realiza-las.

Ao meu orientador o Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino que me auxiliou e conduziu nesta trajetória para a realização desta pesquisa, assim como também o Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva pela orientação e conselhos.

Aos meus pais Rosa e Sebastião Batista pela sabedoria e apoio incondicional, que sempre me incentivaram a ir atrás dos meus sonhos e crescer pessoal e profissionalmente.

A Sandra, Otávio, Suene e Livia que me deram suporte e foram importantes para o cumprimento dos créditos do curso.

A minha esposa Anne e filho Miguel que foram fundamentais para que eu prosseguisse na realização deste mestrado.

Ao Luiz Antonio Pergentino e Fabricio Expedito Viana, que toparam enfrentar os desafios para alcançarmos juntos esta conquista.

Aos colegas de EDP Bruno Alexandre Neris, Joselino Santana Filho, Alexandre Dominice, que contribuíram para que eu alcançasse a realização deste trabalho.

E todos que me ajudaram durante o desenvolvimento do trabalho.

EPÍGRAFE

“Deus é glorificado por cada relâmpago que relampeja o Céu, por cada trovão que troveja as nuvens, por cada gota de chuva que cai sobre a terra.”

Julius Freire

RESUMO

BATISTA, G. H. A. Modelagem de Para-Raios Baseada em Ensaio Elétricos. Dissertação de Mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O objetivo deste trabalho é elaborar uma modelagem comportamental dos dispositivos de Para-Raios por meio de ensaios elétricos, a fim de conhecer o desempenho e degradação do dispositivo, frente as condições de operação típica, cujo os resultados possam embasar as empresas de distribuição de energia elétrica para estimativa de vida útil dos mesmos.

Para alcançar os resultados esperados foi realizado a replicação de ambientes que simule as condições de operação dos dispositivos de Para-Raios, e analisado os registros de seu comportamento durante os ensaios. Com isso podendo realizar projeções de seu comportamento nas mais variadas situações e realizar a correlação de sua vida útil em detrimento as condições de operação em que foi submetido.

Os ensaios realizados são produtos de um projeto de P&D de uma concessionária de distribuição de energia elétrica, que visa melhorar os indicadores de continuidade do fornecimento, por meio de estimação das condições de operação da proteção da rede, e atuando de forma preventiva em sua manutenção.

Em conjunto com os demais temas abordados em tempo de projeto, as conclusões dos referidos ensaios sobre a degradação dos para-raios foram analisadas em conjunto com as informações coletadas de incidências de descargas atmosféricas, que pudessem induzir sobretensões nas redes elétricas e associados a uma plataforma de um sistema especialista capaz realizar as interações destes dados, com isso o sistema pode indicar os potenciais pontos de vulnerabilidade na proteção da rede.

Palavras-chave: Para-raios de distribuição, Sobretensões induzidas, Dispositivo de proteção, Ensaio elétrico, Modelagem.

ABSTRACT

BATISTA, G. H. A. **Surge arrester modeling based on electrical tests**. Dissertation Master's Degree presented the School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2019.

The objective of this work is to elaborate a behavioral modeling of the arrester devices through electrical tests, in order to know the performance and degradation of the device, under the typical operating conditions, the results of which may support the power distribution companies. to estimate their useful life.

To achieve the expected results, environments were replicated to simulate the operating conditions of the arrester devices, and their behavior records were analyzed during the tests. With that being able to make projections of its behavior in the most varied situations and to make the correlation of its useful life in detriment to the operating conditions in which it was submitted.

The tests carried out are products of an R&D project of a power distribution concessionaire, which aims to improve supply continuity indicators by estimating the operating conditions of the grid protection and acting preventively in its maintenance.

In conjunction with the other topics addressed at design time, the conclusions of these tests on the arresters degradation were analyzed together with the information collected from lightning strikes that may induce overvoltages in the electrical networks and associated with a platform of a system. expert able to perform the interactions of this data, so the system can indicate the potential points of vulnerability in network protection.

Keywords: Lightning arrester, Induced overvoltages, Protective device, Electrical testing, Modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Diagrama de blocos do projeto de pesquisa e desenvolvimento EDP e USP São Carlos	19
Figura 2: Distribuição das cargas nas nuvens e no solo [adaptada de (UMAN, 1984)].....	26
Figura 3: Probabilidade da amplitude máxima de corrente em virtude da polaridade da descarga [adaptado de (NOBLAT, 1994)].	27
Figura 4: Representação da conexão entre os canais ascendentes e descendentes [adaptada de (VISACRO, 2005)].....	28
Figura 5: Representação da formação das descargas subsequentes [adaptada de (UMAN, 1984)].	29
Figura 6: 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)].	30
Figura 7: Distribuição acumulada de corrente baseada na equação de Anderson (ANDERSON, 1982).....	33
Figura 8: Mapa de curvas isoceraúnicas do Brasil (NBR 5419, 2005).	34
Figura 9: Mapa de curvas isoceraúnicas da região Sudeste para o período de 1971 a 1995 (NBR 5419, 2005).....	35
Figura 10: 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).....	36
Figura 11: Linha de transmissão sem para-raios atingida por uma descarga atmosférica direta em um de seus condutores energizados [adaptada de (VISACRO, 2005)].	39
Figura 12: Linha de transmissão atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica direta [adaptada de (VISACRO, 2005)].....	40
Figura 13: Representação da reflexão da onda de tensão e determinação da onda resultante no topo da torre [adaptada de (VISACRO, 2005)].....	41
Figura 14: Descarga direta em um condutor de blindagem a meio vão entre duas torres de transmissão de energia [adaptada de (VISACRO, 2005)].....	42
Figura 15: Representação de uma linha de distribuição afeta pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica indireta [adaptada de (VISACRO, 2005)].	43
Figura 16: 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).....	52

Figura 17: Passos iniciais da dinâmica de estabelecimento da corrente de retorno no canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].	55
Figura 18: Condição inicial para a representação do estabelecimento do acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].	59
Figura 19: Representação do estabelecimento dos quatro tipos de acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].	60
Figura 20: Disposição da linha 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)].	66
Figura 21: Disposição espacial dos condutores empregada para o desenvolvimento do Modelo de Rusck [adaptada de (SILVEIRA, 2006)].	67
Figura 22: Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D'AJUZ et al., 1985).	81
Figura 23: Curvas de tensão e corrente de para-raios de ZnO, de SiC e ideal [adaptada de (MAMEDE, 2005)].	82
Figura 24: Característica de tensão e corrente para o carboneto de silício e o óxido de zinco (D'AJUZ et al., 1985).	83
Figura 25: Curva característica de V versus I para um resistor não linear de ZnO [adaptada de (OLIVEIRA, 2004)].	87
Figura 26: Dependência do coeficiente não linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica [adaptada de (FURTADO, 2005)].	88
Figura 27: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro de porcelana [adaptada de (HINRICHSSEN, 2001)].	90
Figura 28: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro polimérico [adaptada de (HINRICHSSEN, 2001)].	91
Figura 29: Característica potência consumida versus tempo para resistores de ZnO de primeira, segunda e terceira geração (SANTOS, 2007).	93
Figura 30: Fator de correção da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de $8 \times 20 \mu\text{s} - 400 \text{A/cm}^2$ (SANTOS, 2007).	94
Figura 31: Fator de correção da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de $500 \times 1500 \mu\text{s} - 35 \text{A/cm}^2$ (SANTOS, 2007).	94
Figura 32: Curva característica típica de um varistor de ZnO (FRANCO, 2008).	97
Figura 33: Dimensões do para-raios PBP 10/10.	102
Figura 34: Estimativa dos parâmetros nominais do para-raios DUT01.	104

Figura 35: Registro térmico para um para-raios no início do ensaio.....	106
Figura 36: Registro térmico para um para-raios no final do ensaio.	106
Figura 37: Degradação da vida útil de para-raios em função da temperatura.	107
Figura 38: Descargas Atmosféricas para Suzano	108
Figura 39: Ocorrências 011, 020, 880 e 890 para o alimentador RSUZ 1306.	109
Figura 40: Exemplo da montagem dos para-raios novos.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compilação dos parâmetros estatísticos por distribuição log-normal para descargas descendentes negativas levantados pelo CIGRÉ [adaptada de (CIGRÉ, 1991)].....	31
Tabela 2: Composição química clássica dos varistores de ZnO (OLIVEIRA, 2004).	85
Tabela 3: Características dos óxidos mais utilizados na fabricação de varistores de ZnO (FRANCO, 1993).	86
Tabela 4: Características Elétricas.....	101
Tabela 5: Características Mecânicas.....	101
Tabela 6: Resultados dos modelos de estimação.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BrasilDAT	–	Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas BRR
CIGRÉ	–	International Concil on Large Eletric Systems
EDP	–	Energias de Portugal
ELAT	–	Grupo de Eletricidade Atmosférica
ET	–	Estação Transformadora
ETD	–	Estação Transformadora de
IEEE	–	Institute of Eletrical And Eletronic Engineers
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais IPO – Iporanga
LD	–	Linha de Distribuição
NBI	–	Nível Básico de Isolamento
RINDAT	–	Rede Nacional de Localização de Descargas Atmosféricas
SiC	–	Carboneto de Silício
ZnO	–	Óxido de Zinco

Sumário

Capítulo 1. Introdução.....	17
1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA	17
1.2 JUSTIFICATIVA.....	19
1.3 OBJETIVOS	19
1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	20
1.5 ATIVIDADES ACADÊMICAS	21
Capítulo 2. Aspectos Das Descarga E Tensões Induzidas	23
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	23
2.2 MODELOS CORRELATOS ÀS TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	44
Capítulo 3. Modelos De Para-Raios E Métodos De Ensaio Para Determinação De Características	75
3.1 INTRODUÇÃO	75
3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICA	75
3.3 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS PARA-RAIOS	79
3.4 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO	79
3.5 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO	84
Capítulo 4. Ensaio Experimentais E Modelagem De Para-Raios	99
4.1 INTRODUÇÃO	99
4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	101
4.3 O MODELO DE DEGRADAÇÃO	104
4.4 PROJETO PILOTO	107
Capítulo 5. Conclusões E Trabalhos Futuros	111
5.1 CONCLUSÕES	111
5.2 TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
ANEXO I - ENSAIOS – DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DA DEGRADAÇÃO DOS PARA-RAIOS.....	123
1. PARA-RAIOS A TEMPERATURA AMBIENTE	123
2. PARA-RAIOS APÓS AQUECIMENTO	143
ANEXO II - PROCEDIMENTO DE ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO — LEI DE ARRHENIUS — PROBLEMAS COM TEMPERATURAS ELEVADAS.....	163

Capítulo 1. Introdução

1.1 MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA

A rede de distribuição de baixa tensão está em sua maior parte distribuída por meio de vias áreas dado o baixo custo comparado as redes subterrâneas, sendo assim estando exposta as intemperes e ações da natureza, agregando ao fato de que estão muitas vezes localizadas em áreas com elevadas densidades de descargas atmosféricas, e portanto sujeitas a desligamentos não programados ocasionados por sobretensões de origem atmosférica.

As descargas atmosféricas são grandes causadoras de interrupções de fornecimento de energia na distribuição. A quantidade de interrupções e o tempo necessário para recomposição do sistema impactam nos indicadores de continuidade de fornecimento de energia elétrica.

O Brasil é um dos países com o maior índice de incidência de raios do mundo, com cerca de 60 milhões de descargas por ano (SANTOS, 2009). e que vem aumentando cada vez mais nos últimos anos, devido as mudanças climáticas.

As descargas atmosféricas são responsáveis por cerca de 70% de desligamentos das linhas de transmissão e 40% da distribuição de energia elétrica no Brasil, além de causarem inumeráveis queimas de transformadores (SANTOS, 2009). Tais números causam um impacto considerável na qualidade de energia, o que pode ser constatado pela alta correlação entre a incidência de descargas e os índices DEC e FEC da maioria das empresas do setor elétrico.

As interrupções ocasionadas pelas descargas atmosféricas na rede de distribuição, tem como principal origem a indução de tensões na rede oriundas de descargas indiretas, ou seja, aquelas que ocorrem nas proximidades da rede e não diretamente na mesma. Essas tensões induzidas podem desencadear a ruptura dielétrica estabelecendo um caminho para a circulação de corrente elétrica entre regiões sob potencial e a terra do sistema, ou seja, instaurando um curto-circuito fase-terra. O uso de dispositivos de proteção faz-se necessário visto os efeitos causados pelas descargas atmosférica, e um dos principais elementos de proteção contra as descargas atmosféricas é para-raios, que tem por objetivo impedir que as sobretensões causem essas rupturas dielétricas e, conseqüentemente, impactem a rede e seus indicadores de fornecimento.

Entretanto, esse dispositivo é substituído com base na inspeção visual, a qual identifica se ocorreu a atuação do disparador automático ou a destruição do para-raios. Este procedimento caracteriza a manutenção corretiva. Não se efetua a substituição preventiva devido à ausência

de estudos que definam a relação entre quantidade e intensidade de solicitações que um para-raios instalado na rede de distribuição pode sofrer.

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

Com isso, a EDP SP vem atuar neste tema através de um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) realizado em conjunto com a Universidade de São Paulo – São Carlos. Tal parceria gerou além desta dissertação, 2 outras dissertações de mestrado já defendidas e que representam a totalidade dos trabalhos realizados nos anos de 2016 a 2018 no âmbito do projeto de P&D.

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

- Pergentino, Luiz Antonio; Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a Partir de Medidas em Campo. São Carlos, 2019.;
- Expedito Viana, Fabricio; Sistema Especialista para Cálculo de Sobreensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas. São Carlos, 2019.

A base desta dissertação é o detalhamento dos trabalhos realizados nas etapas 4 e 5 do projeto, com o levantamento de dados que servirão de informação para as demais fases do projeto. Conforme a Figura 1, as etapas do projeto e os detalhes de cada etapa são:

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

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

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

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

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

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

Figura 1: Diagrama de blocos do projeto de pesquisa e desenvolvimento EDP e USP São Carlos

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

1.2 JUSTIFICATIVA

Para a rede elétrica, os para-raios são os principais dispositivos de proteção contra descargas atmosféricas, que por sua vez são acontecimentos aleatórios e de intensidades variáveis, fazendo com que se torne cada vez mais difícil se preparar para os eventos de surtos de tensões, e evitar os seus efeitos colaterais nas redes, sendo assim faz-se necessário que as concessionárias que administram essas redes, conheçam cada vez mais sobre estes dispositivos e estes fenômenos naturais.

Caso estes equipamentos sejam negligenciados e instalados sem planejamento, ou mesmo sem conhecer seu comportamento durante sua aplicação, podem trazer impactos negativos para os sistemas de distribuição, aumentando ainda mais os custos por operação e manutenção dos sistemas de distribuição e acarretar maiores investimentos das concessionárias de energia elétrica.

1.3 OBJETIVOS

Buscou-se neste trabalho encontrar uma modelagem do comportamento típico do para-raios, que fizessem a relação da degradação do mesmo frente as condições de sua operação, por

meio da análise da curva tensão vs corrente aplicadas ao dispositivo, assim como uma relação entre a dissipação de potência (temperatura) com a diminuição de sua vida útil, mais especificamente foram estudados os para-raios de óxido de zinco (ZnO).

Os dados resultantes desta pesquisa servirão de base para a parametrização de um sistema especialista, que tem como função cruzar as informações das localizações e intensidades das incidências de descargas atmosféricas, com a o posicionamento da rede elétrica da concessionária de energia.

Com isso o sistema pode calcular as sobretensões induzidas a rede, e consequentemente estimar a vida útil dos dispositivos de proteção, trazendo como principais benefícios a concessionária o maior controle sobre a gestão de sua rede, direcionando de forma preventiva as manutenções na rede, e diminuindo os custos de operação, e aos consumidores com o fornecimento contínuo sem impacto ao seu consumo.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Para a abordagem do assunto em questão foi elaborada esta dissertação, apresentada em 05 capítulos, incluindo o capítulo introdutório com a visão geral deste trabalho.

No segundo capítulo aborda os conceitos relativos às descargas atmosféricas, à formação das cargas nas nuvens, do raio e das descargas. Também são exibidos dados relativos à incidência de descargas, e demonstrados os tipos de incidência com suas respectivas consequências para os sistemas elétricos.

No terceiro capítulo é apresentado levantamento bibliográfico e histórico sobre os principais trabalhos e estudos correlatos aos para-raios, assim como um estudo sobre os para-raios de óxido de zinco mostrando seus conceitos básicos de funcionamento, características construtivas e de degradação, desempenho frente a surtos atmosféricos.

No quarto capítulo é realizada a descrição dos aspectos da metodologia utilizada para realizar a medição e o registro dos ensaios experimentais com os para-raios que se encontram a venda no mercado nacional, a simulação e análise de seu comportamento frente as condições de operação e sua correspondente resposta aos ensaios.

No quinto capítulo são expostas as considerações finais, sobre os resultados apresentados. Assim como serão apresentadas algumas oportunidades de continuidade do trabalho desenvolvido.

1.5 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:

✓ BATISTA, G. H. A.; SPALDING, R. A.; ROSA, L. H. L.; ALMEIDA, C.; KAGAN, N.; MORAIS, R. F.; GOUVEA, M. R.; MOLLIKA, D.; DOMINICE, A.; FREDES, M. A.; SILVA, J. P.; COSTA, L. A.; ZAMBONI, L.; Fault Location, Isolation and Service Restoration (FLISR) Functionalities Tests in a Smart Grids Laboratory for Evaluation of the Quality of Service. in 24th International Conference On Harmonics And Quality Of Power, pp. 167, 2016

✓ BATISTA, G. H. A.; ROSA, L. H. L.; ALMEIDA, C.; KAGAN, N.; LABRONICI, J.; DUARTE, S. X.; MORAIS, R. F.; GOUVEA, M. R.; MOLLIKA, D.; DOMINICE, A.; FREDES, M. A.; SILVA, J. P.; COSTA, L. A.; ZAMBONI, L.; A Laboratory infrastructure to support utilities inattaining Power Quality and Smart Grid goals. in 24th International Conference On Harmonics And Quality Of Power, IEEE PES ICHQP 2016.

✓ BATISTA, G. H. A.; ALMEIDA, C.; KAGAN, N.; AMASIFEN, J. C. C.; SPALDING, R. A.; FERRARI, E. L.; KAGAN, H.; MOLLIKA, D.; DOMINICE, A.; ZAMBONI, L.; FREDES, M. A. A Methodology To Allocate Automatic Reclosers In Large Power Distribution Networks. in 24th International Conference on Electricity Distribution, CIRED, pp. 1242, 2017.

✓ 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. Aspectos Das Descarga E Tensões Induzidas

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas caracterizam-se por serem um fenômeno aleatório muito difícil de ser analisado e um dos causadores de distúrbios eletromagnéticos nos sistemas elétricos de potência, resultando em desligamentos não programados dos sistemas de energia e culminando em enormes perdas para consumidores residenciais, industriais, comerciais e públicos.

Atualmente, devido ao processo de aquecimento e grandes alterações climáticas pelo qual o planeta passa, estas intempéries naturais estão intensificando-se e se tornando cada vez mais severas. Além disso, em regiões tropicais próximas a 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).

Neste contexto serão apresentados conceitos e definições sobre a formação, o desenvolvimento, e algumas características e parâmetros das descargas atmosféricas. Os mesmos serão expostos, pois seu conhecimento é de grande importância para estimar adequadamente a severidade de fenômenos solicitantes em sistemas elétricos em virtude da ocorrência de descargas diretas e indiretas, tais como as tensões induzidas, e para a determinação de práticas de proteção mais adequadas a partir de suas análises.

Dessa forma, no presente capítulo serão descritos os conceitos básicos sobre descargas atmosféricas, como ocorre à formação das cargas nas nuvens e dos raios, como se desenvolvem as descargas entre nuvem e o solo, onde se observa maior incidência das mesmas, 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.

2.1.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS BÁSICOS

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

- **Descarga elétrica:** fluxo de cargas elétricas a partir de um ponto eletricamente carregado por meio de um processo disruptivo em meio isolante ou por meio de descarregamento através de meio condutor;
- **Descarga atmosférica:** descarga elétrica com origem atmosférica entre nuvens ou entre uma nuvem e a terra, a qual consisti em um ou mais impulsos de vários quiloampères, envolvendo efeitos elétricos, sonoros e visuais;
- **Canal de Descarga:** corresponde ao canal ionizado que liga nuvem e solo e por meio do qual evolui a corrente de retorno de descarga;
- **Corrente de Retorno:** corrente que flui pelo trajeto ionizado formado pelo canal de descarga em seguida ao fechamento do mesmo;
- **Raio:** representa um impulso elétrico de uma descarga atmosférica para a terra;
- **Trovão:** ruído produzido pelo deslocamento do ar em virtude do súbito aquecimento deste nas proximidades do canal de descarga;
- **Relâmpago:** luz emitida em virtude do desenvolvimento da corrente de retorno no canal de descarga;
- **Índice Ceraúnico:** é definido como o número de dias de trovoada em determinado lugar decorrido o período de um ano;
- **Isoceraúnicas:** são curvas que ligam pontos que possuem o mesmo índice ceraúnico.

2.1.2 PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS

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

Dessa forma, o conceito comum entre tais teorias indica que as correntes de ar ascendentes, as quais são bastante úmidas, ao atingirem elevadas altitudes e depararem-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. Tal separação ocorre em virtude da diferença de energia cinética destas cargas, uma vez que as gotas carregadas positivamente possuem maior energia cinética e por isso se movem ascendentemente.

Devido à concentração de cargas negativas na parte inferior da nuvem induz-se uma concentração de cargas positivas no solo com comprimento equivalente ao da nuvem, como também se vê na Figura 2. Estas cargas acompanham o deslocamento da nuvem em virtude da ação dos ventos promovendo o deslocamento de cargas positivas por prédios, antenas, torres, árvores, pontes, morros e carros.

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

Figura 2: Distribuição das cargas nas nuvens e no solo [adaptada de (UMAN, 1984)].

2.1.3 PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

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

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

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

- Polaridade: positiva ou negativa.

Esta pesquisa focar-se-á nas descargas mais severas aos estudos de proteção de sistemas elétricos, ou seja, descargas entre nuvens e o solo, e as de maior ocorrência, descendentes e negativas. Isto porque as descargas entre nuvens e o solo são mais danosas às redes de transmissão e distribuição de energia e pelo menos 90% das mesmas são descendentes e negativas, segundo (CIGRÉ, 1991) e como se pode ver pela Figura 3.

Figura 3: Probabilidade da amplitude máxima de corrente em virtude da polaridade da descarga [adaptado de (NOBLAT, 1994)].

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

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

estruturas, tais como postes, torres, antenas e condutores de linhas de transmissão e distribuição, induz-se um campo elétrico resultante capaz de dar origem a um ou mais canais ascendentes com carga positiva. Estes canais também se deslocam por saltos e vão ao encontro do canal descendente, podendo ocorrer à conexão entre eles e o consequente fechamento do percurso caso a carga dos canais descendentes seja elevada o bastante para manter a progressão, e a distância entre ambos superar determinado valor crítico, como pode ser visto na Figura 4 (UMAN, 1984).

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

Terminado o fluxo de corrente da descarga de retorno a descarga atmosférica pode 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).

Figura 4: Representação da conexão entre os canais ascendentes e descendentes [adaptada de (VISACRO, 2005)].

Por fim, o processo descrito pode se repetir inúmeras vezes e outras descargas podem suceder esta segunda com magnitudes de corrente até maiores que a da primeira descarga, sendo que em média observa-se o acontecimento de 2 ou 3 descargas subsequentes. O procedimento do desenvolvimento das sucessivas descargas pode ser demonstrado pela Figura 5.

Figura 5: Representação da formação das descargas subsequentes [adaptada de (UMAN, 1984)].

2.1.4 CARACTERÍSTICAS E PARÂMETROS DA ONDA DE CORRENTE DE DESCARGA

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

- **Amplitude da corrente:** critério de maior influência na determinação da severidade dos danos causados à linha, pois quanto maior a amplitude de corrente maior será a sobretensão gerada;
- **Tempo de frente:** tempo que a onda de corrente de descarga leva para alcançar seu pico, ressaltando que quanto menor o tempo maior o rigor da sobretensão causada;
- **Taxa de crescimento da corrente:** parâmetro que demonstra o quão rápido cresce a corrente de retorno, observando-se que quanto mais rápido é este aumento mais severa é a descarga;
- **Tempo de cauda:** tempo que a onda de corrente leva para retornar a 50% do seu valor de pico desde o seu início, ou seja, representa o tempo que a linha é submetida à corrente de descarga atmosférica;
- **Carga da corrente de descarga de retorno:** intensidade de carga acumulada ao longo do canal precursor pelo impulso da corrente de retorno e transferida a terra pela mesma;

- **Energia dissipada por unidade de resistência:** expressa a potencialidade da corrente de retorno em dissipar energia.

Neste contexto, a Figura 6 representa uma onda característica de corrente de descarga ao longo do tempo para uma descarga nuvem-solo negativa, cuja variação do pico de corrente foi aproximada por uma distribuição log-normal, a partir da qual se pode definir e identificar alguns de seus principais parâmetros, os quais são expostos a seguir.

Além disso, na Tabela 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 6.

Figura 6: Forma de onda típica da corrente de descarga com seus principais parâmetros associados para uma descarga nuvem-solo negativa [adaptada de (CIGRÉ, 1991; IEEE, 2004)].

- **Amplitude máxima [kA]**

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

- I_{90} - ponto no qual o módulo da corrente alcança 90% do valor de I_L ;
 - I_{100} - ponto no qual o módulo da corrente alcança 100% do valor de I_L .
- **Tempo de frente de onda [μs]**
 - $T_{10/90}$ - intervalo de tempo entre os pontos em que o módulo da corrente vale respectivamente 10% e 90% do valor de seu primeiro pico;
 - $T_{30/90}$ - intervalo de tempo entre os pontos em que o módulo da corrente vale respectivamente 30% e 90% do valor de seu primeiro pico;
- **Derivadas da corrente em relação ao tempo [$\text{kA}/\mu\text{s}$]**
 - S_m - derivada máxima da corrente durante o tempo de frente de onda;
 - S_{10} - derivada da corrente no ponto em que seu módulo vale 10% do primeiro pico;
 - $S_{10/90}$ - derivada média da corrente no ponto em que seu módulo vale 10% e 90% do primeiro pico;
 - $S_{30/90}$ - derivada média da corrente no ponto em que seu módulo vale 30% e 90% do primeiro pico.
- **T_h - tempo de cauda [μs].**
- **Q_I - carga do impulso da corrente de descarga [C].**
- **$\int I^2(t) dt$ - energia dissipada por unidade de resistência [$(\text{kA})^2\text{s}$].**

Tabela 1: Compilação dos parâmetros estatísticos por distribuição log-normal para descargas descendentes negativas levantados pelo CIGRÉ [adaptada de (CIGRÉ, 1991)].

Parâmetro	Primeira Descarga		Descarga Subsequente	
	Média	Desvio Padrão Logarítmico	Média	Desvio Padrão Logarítmico
Frente de Onda [μs]	-----	-----	-----	-----
$td_{10/90} = T_{10/90} / 0,8$	5,63	0,576	0,75	0,921
$td_{30/90} = T_{30/90} / 0,6$	3,83	0,553	0,67	1,013
Taxa de Crescimento [$\text{kA}/\mu\text{s}$]	-----	-----	-----	-----
S_m máximo	24,3	0,599	39,9	0,852

S ₁₀ (em 10% de I _{pico})	2,6	0,921	18,9	1,404
S _{10/90} (entre 10% e 90% de I _{pico})	5	0,645	15,4	0,944
S _{30/90} (entre 30% e 90% de I _{pico})	7,2	0,622	20,1	0,967
Corrente de Crista [kA]	-----	-----	-----	-----
I _I (corrente inicial)	27,7	0,461	11,8	0,53
I _F (corrente final)	31,1	0,484	12,3	0,53
I _I / I _F	0,9	0,23	0,9	0,207
T _h [μs]	77,5	0,577	30,2	0,933
Q _I [C]	4,65	0,882	0,938	0,882
∫ I ² (t) dt [(kA) ² s]	0,057	1,373	0,0055	1,366
Intervalo entre Descargas [ms]	-----	-----	35	1,066

Posto isto, a partir dos dados da Tabela 1 e de estudos específicos sobre os parâmetros das correntes de descarga pode-se aproximar a variação da corrente de pico (*I*) pela distribuição log-normal e definir a função distribuição de probabilidade da corrente de pico pela Equação 2-1 (ANDERSON, 1982). Esta função traduz a probabilidade de *I* ser maior ou igual a um determinado valor *i*₀ em kA, e tem sua representação dada pelo gráfico da Figura 7.

$$P(I \geq i_0) = \frac{1}{1 + (\frac{i_0}{31})^{2.6}} \quad (2-1)$$

Figura 7: Distribuição acumulada de corrente baseada na equação de Anderson (ANDERSON, 1982).

2.1.5 INCIDÊNCIAS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O conhecimento da distribuição e incidência de descargas atmosféricas em determinada região é fundamental para a predição da severidade de surtos em pontos específicos do sistema elétrico. Um meio de obterem-se tais informações é pela análise de mapas isoceraúnicos, os quais ilustram o número de dias de trovoadas por ano (Td) em uma região específica. Figura 8 e na Figura 9 são apresentados estes dados por meio das curvas isoceraúnicas para todo território brasileiro e apenas para a região Sudeste, respectivamente.

Por meio destes mapas é possível obter a densidade de descargas atmosféricas para a terra (Ng), definida como o número de raios para a terra por quilômetros quadrados por ano. Sendo assim, o valor de Ng pode ser calculado para uma determinada região pela Equação 2-2:

$$Ng = 0,04 \times Td^{1,25} \text{ [km}^2\text{/ano]} \quad (2-2)$$

Figura 8: Mapa de curvas isoceraúnicas do Brasil (NBR 5419, 2005).

Além disso, podem ser obtidos mapas e dados mais precisos sobre a incidência de descargas por meio das informações disponibilizadas pela Rede Nacional de Localização de Descargas Atmosféricas (RINDAT) ou pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT). Tanto os sites do ELAT quanto do RINDAT disponibilizam em tempo real o mapa de incidência de raios no Brasil. No site do ELAT também pode ser encontrado um ranking da incidência de descargas atmosféricas por município para os biênios 2005-2006, 2007-2008 e 2009-2010 para os estados da região centro-sul do Brasil. Ressalta-se que os dados utilizados na formulação deste ranking foram obtidos pela Rede Brasileira de Detecção de Descargas Atmosféricas (BrasilDAT), que conta com equipamentos distribuídos pelo país monitorando e armazenando dados de luminosidade, intensidade, campo elétrico e direção das descargas (ELAT, 2012).

Figura 9: Mapa de curvas isoceraúnicas da região Sudeste para o período de 1971 a 1995 (NBR 5419, 2005).

Ainda neste contexto, em meio às pesquisas desenvolvidas por meio da coleta de dados de descargas atmosféricas nuvem-solo nos últimos 13 anos (1998-2010) destaca-se o mapa da Figura 10, 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 10: 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).

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

Uma forma de identificar terrenos mais propensos à incidência de raios é por meio da manifestação de um cheiro adocicado indicando a presença de ozônio em virtude da ionização

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

2.1.6 TIPOS DE INCIDÊNCIA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS E RESPECTIVAS CONSEQUÊNCIAS

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

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

2.1.6.1 CARACTERÍSTICAS PERTINENTES A INCIDÊNCIA DIRETA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

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

as características de aterramento da linha e o comportamento transitório do sistema elétrico abrangido.

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. Este segundo caso acontece em circunstâncias em que a amplitude da corrente de descarga é consideravelmente reduzida, o que possibilita a penetração desta corrente na área protegida pela blindagem sem que a mesma seja interceptada, tornando-a apta a atingir os condutores energizados.

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

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

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

Apenas a título ilustrativo, de modo simples a amplitude da sobretensão associada à incidência direta de uma descarga pode ser calculada basicamente pelo produto entre a amplitude da corrente que viaja na linha e o valor da impedância de surto (Z_S) da mesma, impedância está dada 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 11, considerando uma descarga direta em uma linha que possui impedância de surto de $300 \, \Omega$, cuja corrente de descarga tenha valor de pico de $40 \, \text{kA}$ e sua

onda viajante de corrente se divide em duas parcelas no momento da incidência, tem-se um valor de 6 MV para a amplitude da sobretensão (VISACRO, 2005).

Figura 11: Linha de transmissão sem para-raios atingida por uma descarga atmosférica direta em um de seus condutores energizados [adaptada de (VISACRO, 2005)].

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 12, 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 12: 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 12, 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 Equação 2-4 e Equação 2-4 (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 13. 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 13: 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 Condutor de Blindagem a Meio Vão

Outro mecanismo de ruptura do isolamento relacionado à incidência de uma descarga atmosférica direta ocorre quando há incidência nos condutores de blindagem no meio do vão entre duas torres de transmissão que possuem vãos muito extensos, como mostrado na Figura 14. Neste tipo de situação é gerada uma sobretensão entre os condutores de blindagem e os condutores fase energizados muito superior a sobretensão nas cadeias de isoladores devido à incidência direta sobre os componentes da torre. Sobretensão esta, a qual pode ser três a quatro vezes maior que a sobretensão na cadeia de isoladores, causando a ruptura do isolamento do ar entre os condutores fase e os de blindagem.

Figura 14: 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 sobretensão neste caso se deve ao fato de a incidência da descarga ocorrer em um ponto bastante distante do ponto de aterramento da linha, o que faz com que a onda de tensão negativa refletida demore muito para alcançar o ponto de incidência da descarga. Isto faz com que a onda de sobretensão resultante alcance seu valor de pico antes do efeito da onda negativa de tensão, estabelecendo uma grande solicitação, até mesmo em situações em que as correntes de descarga possuam pequenas amplitudes. Nestas circunstâncias a impedância de aterramento tem pouca influência sobre a máxima sobretensão estabelecida, e a medida mais adequada para amenizar o surgimento de tais sobretensões é a diminuição da distância entre os condutores fase e o condutor de blindagem.

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

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

2.1.6.2 CARACTERÍSTICAS PERTINENTES A INCIDÊNCIA INDIRETA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas indiretas, ou próximas, são descargas que caem nas regiões adjacentes às linhas, como ilustrado pela Figura 15, e que podem causar prejuízos às mesmas por meio do

surgimento de tensões induzidas. Estas tensões são fruto do campo eletromagnético causado pela corrente de descarga de retorno, o qual se irradia atingindo os cabos fase energizados, cabos de blindagem, para-raios, e demais componentes das redes de energia.

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

Figura 15: Representação de uma linha de distribuição afeta pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica indireta [adaptada de (VISACRO, 2005)].

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

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

2.2 MODELOS CORRELATOS ÀS TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

2.2.1 INTRODUÇÃO

Com uma breve revisão bibliográfica e histórica sobre alguns dos principais estudos e pesquisas relacionadas às tensões induzidas, e em seguida será descrito o modo de formação das mesmas e serão comentados alguns de seus fundamentos mais importantes para esta pesquisa. Posteriormente serão delineados e expostos os conceitos relativos à corrente de retorno e seus modelos mais significativos, bem como os mecanismos de estabelecimento do acoplamento entre linha e canal de descarga e seus principais modelos. Por fim, serão comentados de forma resumida os parâmetros centrais que influenciam a amplitude e forma de onda da tensão induzida.

2.2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICA

Em Wagner (1908, *apud* RUSCK, 1957) apresenta-se um dos primeiros modelos com a finalidade de calcular as tensões induzidas em linhas de energia elétrica devido às descargas atmosféricas. Neste modelo considera-se que as tensões induzidas são causadas pela propagação de cargas elétricas induzidas nos condutores da linha durante o processo de eletrificação das nuvens. Estas tensões são calculadas por meio da multiplicação da altura da linha pelo campo elétrico vertical antes das descargas, e seus tempos de frente e de cauda são determinados pela variação do campo elétrico vertical.

Já em Bewley (1929) são expostos os resultados de novas pesquisas e ensaios avaliando o modelo proposto por Wagner (1908) e sugerindo seu ajuste por meio da introdução do tempo de liberação das cargas elétricas, acarretando no aumento dos tempos de frente e de cauda da tensão induzida.

Prosseguimento com estas pesquisas, em Wagner e Mccann (1942) é proposto um novo modelo que serviu de base para os modelos atuais, segundo o 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. No mesmo a forma de onda da corrente é assumida como um degrau, considerando o canal de descarga carregado com densidade de carga uniforme, e admitindo a velocidade da descarga de retorno constante.

Como continuação, em Golde (1954) são adicionadas melhorias ao modelo desenvolvido por Wagner e Mccann (1942) visando aproximar as características do modelo às condições reais. Para tanto, admite-se e implementa-se o decaimento exponencial da densidade de cargas ao longo do canal de descarga com a altura, e ao considerar a velocidade de propagação da descarga de retorno com o tempo, procurando aproximar as características do modelo as condições reais.

Em Rusck (1957) é publicado o trabalho sobre tensões induzidas de maior aceitação até os dias atuais, também baseado no modelo de Wagner e Mccann. O Modelo de Rusck se fundamenta no cálculo da integral do campo elétrico devido às cargas no canal de descarga, configurando o potencial escalar, e no fluxo da corrente de retorno pelo canal, perfazendo o vetor potencial, assumindo algumas simplificações quanto à condutividade do solo e a descontinuidade da linha. 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 e 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 linhas de energia elétrica. Entretanto, para sistemas aéreos o mesmo se aplica apenas a linhas monofásicas com retorno pela terra, a qual deve ser considerada um dos condutores do sistema neste caso.

Em Chowdhuri e 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 linha, ao invés de se basear nos potenciais escalares totais induzidos e indutores, como havia sido feito por Rusck.

Não obstante, em Agrawal, Price e 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 e 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 os resultados de seus estudos sobre desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas no capítulo 12 de um dos mais importantes documentos da área, intitulado *Transmission Line Reference Book*, e 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, 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 linha, 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.

Pouco depois, o trabalho produzido em conjunto pelo CIRED/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 a 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.

Simultaneamente, em Jankov (1997) é desenvolvido um estudo sobre os parâmetros que afetam a máxima tensão induzida em linhas aéreas devido a descargas próximas e propõem-se uma equação para o cálculo dessa tensão. Com esta equação efetua-se uma análise comparativa das máximas tensões induzidas em função da altura, da velocidade de descarga de retorno, e da distância do ponto de incidência até a linha para variações no tempo de frente e de queda da onda de corrente.

Em Nucci e 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 e Chowdhuri (2000) são expostos os resultados da comparação de vários métodos utilizados para cálculos de taxas de desligamentos de linhas de distribuição frente a 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 através 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 e 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 e 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, calcula-se a distribuição de corrente e o acoplamento eletromagnético entre canal e linha em conjunto, trabalha-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 sub-rotina 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 e 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 e 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 e 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 nota-se 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 e 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 (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 no Modelo de Rusck (RUSCK, 1957) para computar o campo elétrico vertical, em (BARBOSA; PAULINO, 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.

Por fim, 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.

2.2.3 FORMAÇÃO DAS TENSÕES INDUZIDAS POR DESCARGAS INDIRETAS

O processo de formação de tensões induzidas por descargas indiretas, segundo Visacro (2005), é descrito por um processo que 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 linha 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 de tempo. A Figura 16 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 16: 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, mesmo assim são capazes de atingir à ordem de centenas de kV em poucas dezenas de microssegundos. Também se pode 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 linha e 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 linha 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, 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 linhas de transmissão e distribuição, nas adjacências do ponto de incidência da descarga o acoplamento eletromagnético entre as linhas 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 conseqüentemente define a amplitude e forma da tensão induzida originada pela descarga indireta.

2.2.4 CORRENTE DE RETORNO NO CANAL DE DESCARGA

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.

2.2.4.1 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 são fundamentais para formulação dos modelos de corrente de retorno, mas para tanto são necessárias algumas simplificações que serão mencionadas no decorrer desta seção, fundamentada em (VISACRO, 2005).

A explicação deste processo se baseará na Figura 17, 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.

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 17. 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.

Figura 17: Passos iniciais da dinâmica de estabelecimento da corrente de retorno no canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].

Além disso, como 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 dissipada na terra, e 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 à 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 período 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 consequentemente 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 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.

2.2.4.2 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 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.

2.2.5 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.

2.2.5.1 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 18, 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 18: 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 19 e subdivididos em:

- Acoplamento elétrico;
- Acoplamento magnético;
- Acoplamento irradiado;
- Acoplamento condutivo.

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.

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.

Acoplamento Irradiado: 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.

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-se uma continuidade elétrica entre canal e solo promovendo o surgimento do acoplamento condutivo associado ao efeito longitudinal no canal e divergente no solo.

Figura 19: Representação do estabelecimento dos quatro tipos de acoplamento eletromagnético entre linha e canal de descarga [adaptada de (VISACRO, 2005)].

2.2.5.2 MODELOS DE ACOPLAMENTO ELETROMAGNÉTICO ENTRE LINHA 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, 1958), 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, para 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 numérica 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 também 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 adotada 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 diferindo quanto ao emprego dos índices k e j . No modelo de Agrawal estes índices são usados para localizar seus elementos nas matrizes de resistência, capacitância e indutância, e também nos vetores de tensão e de corrente.

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 através 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.

D) 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; BABA e 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 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.

E) 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; 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 admiti estudos envolvendo linhas com várias secções de diferentes direções, consideradas através 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 que 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.

F) Modelo de Rusck

O modelo desenvolvido por Rusck (RUSCK, 1958) 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 através da 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 abalizada 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 linha 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;
- O campo no solo é tomado como sendo o mesmo que nos condutores da linha, 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.

A partir de seus estudos Rusck concluiu que a tensão induzida em uma linha devido a 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 20, e utilizando as equações de Maxwell em um sistema de coordenadas XYZ como o da Figura 21, 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 20 L_0 indica a distância entre a linha e 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 20: Disposição da linha 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 a Figura 21 esboça, em uma linha trifásica, o arranjo espacial considerado por Rusck para o desenvolvimento de sua modelagem, lembrando que o equacionamento por ele proposto abrange linhas polifásicas. Nesta representação o plano XY refere-se à superfície do solo, 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 21: 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 linha. Admitindo que as distribuições de correntes e cargas presentes nos condutores da linha não modificam as distribuições de correntes e cargas do canal de descarga, o potencial escalar na superfície destes condutores pode ser expresso pela Equação 2-22.

$$[\Phi_n] = [\Phi_{in}] + [k_{nn}].[q_n] \quad (2-22)$$

Na qual Φ_n representa o potencial escalar induzido no n -ésimo condutor, Φ_{in} o potencial escalar indutor no n -ésimo condutor, k_{nm} 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 Equação 2-23 e Equação 2-24:

$$K_{aa} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{2h_a}{r_a} \right) \quad (2-23)$$

$$K_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{d'_{ab}}{d_{ab}} \right) \quad (2-24)$$

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 2-25:

$$[A_{xn}] = [L_{nn}] \cdot [I_n] \quad (2-25)$$

Na qual A_{xn} remete ao vetor potência 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 2-26, a qual ao ser substituída na Equação 2-25 e ao considerar a condutividade infinita dos condutores expressa pela Equação 2-27 resulta na Equação 2-28, como mostrado a seguir:

$$\vec{E}_r = -\vec{\nabla}\Phi_i - \frac{\partial \vec{A}_i}{\partial t} \quad (2-26)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{\sigma} \vec{J} \rightarrow (\sigma = \infty) \therefore \vec{E} = 0 \quad (2-27)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -[L] \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2-28)$$

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 Equação 2-29 na qual v_0 é a velocidade da luz no vácuo e $[Z]$ é a matriz de impedâncias de surto, expressa em Equação 2-30.

$$[L] = \frac{1}{v_0} \times [Z] \quad (2-29)$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & \cdots \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & \cdots \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

Baseando-se na equação da continuidade indicada por Equação 2-31, 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 2-32. Substituindo Equação 2-22 em Equação 2-32 obteve a Equação 2-33, em que ρ representa a densidade de cargas, I a corrente em um condutor, e $[K]$ a matriz de coeficientes de potencial de Maxwell indicada por Equação 2-34.

$$\vec{\nabla} \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2-31)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{\partial q}{\partial t} \quad (2-32)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{1}{[K]} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \frac{1}{[K]} \left(\frac{\partial \Phi_j}{\partial t} \right) \quad (2-33)$$

$$[K] = v_0 \times [Z] \quad (2-34)$$

Posto isto, substituindo Equação 2-28 em Equação 2-29 e Equação 2-34 em Equação 2-33 obtém-se Equação 2-35 e Equação 2-36 respectivamente, que formam um sistema de equações com o qual se alcançam as correntes e potenciais escalares nos condutores em análise.

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = - \frac{1}{v_0} \times [Z] \times \left(\frac{\partial I}{\partial t} \right) \quad (2-35)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = - \frac{1}{v_0 \times [Z]} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right) + \frac{1}{v_0 \times [Z]} \left(\frac{\partial \Phi_I}{\partial t} \right) \quad (2-36)$$

A partir de algumas simplificações e da resolução do sistema acima mencionado pode-se determinar o potencial escalar dado pela Equação 2-37, 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 Equação 2-37.

$$\Phi_i = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q\left(s, t - \frac{L_0}{v_0}\right)}{L_0} ds \quad (2-37)$$

Retomando a Equação 2-26 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 2-38, em que μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

$$\vec{A}_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I\left(s, t - \frac{L_0}{v_0}\right)}{L_0} ds \quad (2-38)$$

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 Equação 2-39 e Equação 2-40.

$$\frac{\partial u^{\varphi}(x,t)}{\partial x} + iR + L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (2-39)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C \frac{\partial u^\varphi(x,t)}{\partial t} = C \frac{\partial \Phi^i(x,h,t)}{\partial t} \quad (2-40)$$

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 2-41.

$$u(x,t) = \Phi(x,t) + \int_0^h \frac{\partial A_z^i(x,z,t)}{\partial t} dz \quad (2-41)$$

Substituindo Equação 2-37 e Equação 2-38 em Equação 2-41 obtém-se a expressão da tensão máxima induzida considerando a incidência de uma descarga indireta próxima ao centro da linha dada por Equação 2-42.

$$U_{max} = \frac{Z_0 I h}{y} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{v_0} \right)^2}} \right) \quad (2-42)$$

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 Equação 2-43 em que μ_0 é a permeabilidade do vácuo e ε_0 a permissividade elétrica do vácuo.

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \quad (2-43)$$

Contudo, para implementar computacional o método de Rusck é preciso representar sua máxima tensão induzida (U_{max}) no domínio do tempo, o que pode ser conseguido por meio da Equação 2-44.

$$U(x,t) = Z_0 I h \beta \frac{(ct-x)}{y^2 + \beta^2(ct-x)^2} \left[1 + \frac{x + \beta^2(ct-x)}{\sqrt{(\beta ct)^2 + (1-\beta^2)(x^2 + y^2)}} \right] \quad (2-44)$$

Em que x é um ponto ao longo do trecho da linha, 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 2-42. 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 linha é dada pela Equação 2-45.

$$V(x, t) = U(x, t) + U(-x, t) \quad (2-45)$$

Além disso, para situações em que se deseja calcular o valor de pico da tensão induzida para pontos na linha relativamente distantes do canal de descarga pode-se desconsiderar a velocidade de propagação da corrente no canal e adotar a Equação 2-46 cujas variáveis são as mesmas da Equação 2-42.

$$U_{max} = \frac{Z_0 I h}{y} \quad (2-46)$$

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

2.2.6 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 linha e canal;
- Características da linha;
- 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 linha, parâmetros de configuração entre linha 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.

2.2.6.1 PARÂMETROS DE DESCARGA

O principal parâmetro de descarga que altera de forma aproximadamente proporcional a 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 averigua-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 a 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.

2.2.6.2 PARÂMETROS DA LINHA

Dentre os parâmetros de linha 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 linha, 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 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 as mesmas.

2.2.6.3 PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO ENTRE LINHA E CANAL DE DESCARGA

Dentre as configurações de estabelecimento do acoplamento entre linha 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 conforme exposto nas seções 4.5.1 e 4.5.2.

2.2.6.4 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 através da 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, influência 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.

Capítulo 3. Modelos De Para-Raios E Métodos De Ensaio Para Determinação De Características

3.1 INTRODUÇÃO

Dentre os equipamentos utilizados na proteção contra sobretensões nos sistemas elétricos de potência destacam-se os para-raios, mais especificamente os para-raios de óxido de zinco (ZnO). Estes são projetados para proteção contra sobretensões originadas por ocorrências no próprio sistema, pela incidência direta de descargas atmosféricas, ou por indução devido a descargas indiretas, e os quais visam mitigar as sobretensões a fim de aumentar a confiabilidade e a continuidade de operação dos sistemas elétricos.

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

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E HISTÓRICA

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Concomitantemente, em Meister (2005) é apresentada uma avaliação técnica comparativa da modelagem de varistores de óxido de zinco e a definição de qual modelo de para-raios é o mais apropriado para tipos específicos de estudos. Ressalta-se que sua principal contribuição é a validação e análise destes modelos no software ATP, e a aplicação dos mesmos em um estudo de coordenação de isolamento de uma subestação de 500 kV. Os modelos descritos e validados são:

modelo convencional ou modelo do resistor não linear; modelo proposto por Tominaga et al. (TOMINAGA et al., 1979); modelo proposto por Kim et al. (KIM et al., 1996); modelo do IEEE (IEEE, 1992); modelo proposto por Pinceti e Giannettoni (PINCETI; GIANNETTONI, 1999); e modelo proposto por Fernandez e Diaz (FERNANDEZ; DIAZ, 2001).

Em Saran (2009) é abordado o estudo de uma ampla gama de efeitos e impactos das descargas atmosféricas sobre linhas de distribuição reais, a fim de estabelecer os principais

pontos de intervenção para a melhoria de desempenho das mesmas por meio da análise das respostas de equipamentos instalados na rede, como transformadores, isoladores e para-raios. Para tanto, é utilizado o software ATP para simulação e modelagem de surtos devido a descargas diretas e de tensões induzidas por descargas indiretas, além de realizar a modelagem da linha e de seus componentes como um todo. Também é criado um programa computacional para o tratamento, exibição e utilização das informações de bancos de dados geoposicionais do sistema sob estudo, e são feitas simulações e análises estocástica, probabilística e estatística da ocorrência e geração de surtos por descargas atmosféricas.

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

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

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

Em EPRI (2011) é publicado um guia com procedimentos para melhoria de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas e sobre técnicas de aterramento, baseado em relatórios publicados anteriormente. O seu conteúdo inclui a teoria de formação e a definição dos parâmetros das descargas atmosféricas, os impactos das descargas sobre linhas de transmissão, e os fundamentos, aspectos práticos e de projeto de aterramento de linhas.

Também constam no mesmo as diretrizes para melhorar o desempenho de linhas, teoria e práticas de instalação de para-raios contra descargas, e diretrizes de aplicação do software TFlash.

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

3.3 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 linhas de alta tensão, transformadores, banco de capacitores, reguladores, e para linhas de distribuição em média tensão, como será 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 dos mesmos e aproximando-os do ideal, como será visto a seguir.

3.4 HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO

O primeiro dispositivo desenvolvido para proteção contra sobretensões foi o centelhador, ilustrado na Figura 22a, 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 22b. 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 22c, 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 22d, 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 22: Evolução dos dispositivos de proteção contra sobretensões (D'AJUZ et al., 1985).

Como se observa na Figura 23, 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 23 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 23: 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 3-1 que representa a característica não linear dos resistores a ZnO e SiC, verifica-se que o SiC tem expoente n de ordem 4 enquanto que o ZnO apresenta um expoente n de ordem 25, demonstrando à alta não linearidade do ZnO.

$$I = kV^n \quad (3-1)$$

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 23 como já foi exposto anteriormente, e através da Figura 24, que expõem as características não lineares entre tensão e corrente para o ZnO e o SiC em diferentes temperaturas. Na Figura 24 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 abordados com mais detalhes a seguir.

Figura 24: Característica de tensão e corrente para o carboneto de silício e o óxido de zinco (D'AJUZ et al., 1985).

3.5 PARA-RAIOS DE ÓXIDO DE ZINCO

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

3.5.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PARA-RAIOS DE ZNO

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

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

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

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

A) CARACTERÍSTICAS DOS RESISTORES DE ZNO

Os resistores, ou varistores, de ZnO são dispositivos cerâmicos semicondutores com propriedades resistivas altamente não lineares, dependentes da tensão elétrica que existe entre seus terminais. Geralmente, possuem formato cilíndrico e alta densidade de óxido metálico, da ordem de 5,4 g/cm³ a 5,6 g/cm³, 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 2.

Tabela 2: 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 3 são apresentadas as particularidades dos principais componentes empregados na fabricação dos varistores de ZnO produzidos hoje em dia.

Tabela 3: 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 25, 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 25: 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 defini 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), principal parâmetro 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 3-2.

$$\alpha = \frac{d[\log(I)]}{d[\log(V)]} \quad (3-2)$$

Por fim, ressalta-se que quanto maior o valor de α maior a não linearidade do varistor e melhor seu desempenho, e que para os varistores à base de ZnO este parâmetro pode variar na faixa de 25 a 100, mas na maioria das aplicações comerciais α varia entre 25 e 60. Ademais, o valor de α é inversamente proporcional às condições de temperatura e pressão sob as quais o varistor está submetido, já que diminui com o incremento de ambas, e também decresce com o aumento da densidade de corrente, como mostrado pela Figura 26. 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 26: Dependência do coeficiente não linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica [adaptada de (FURTADO, 2005)].

B) TIPOS DE INVÓLUCROS DOS PARA-RAIOS DE ZNO

Os para-raios de ZnO com invólucros de porcelana datam da década de 1970 e são montados com os resistores de forma concêntrica dentro do invólucro com geometria para minimizar os efeitos da distribuição não uniforme de campo elétrico e de ionização interna, mesmo sob condições severas de poluição externa. Também possuem mecanismos de alívio de sobrepressão dentro dos flanges terminais para evitar que o para-raios sofra algum tipo de explosão devido a solicitações superiores às especificadas, evitando a danificação de outros equipamentos e o risco de acidentes para pessoas localizadas em suas adjacências.

A Figura 27 mostra em detalhe um para-raios de distribuição com invólucro de porcelana com seus respectivos componentes indicados e numerados, a saber (HINRICHSEN, 2001):

- 1 - Mola de compressão;
- 2 - Diafragma de alívio de pressão;
- 3 - Terminal de terra com interruptor;
- 4 - Terminal de alta tensão;
- 5 - Invólucro de porcelana;
- 6 - Pilha de resistor de óxido metálico com apoio para construção;
- 7 - Suporte de montagem;
- 8 - Anel de vedação;
- 9 - Flange com ventilação de saída.

Figura 27: Constituição de um para-raios de distribuição com invólucro de porcelana [adaptada de (HINRICHSEN, 2001)].

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

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

Nos para-raios sem espaços internos de ar os blocos de ZnO são envoltos em um tubo de fibra de vidro impregnado em resina epóxi, e o invólucro polimérico é aplicado sobre o tubo pelo processo de injeção de borracha ou de moldagem. Como este tipo é mais comum do que o com espaços de ar, na Figura 28, é exposto um para-raios de distribuição com invólucro polimérico sem espaços internos de ar com seus respectivos elementos apontados e numerados a seguir (HINRICHSEN, 2001):

- 1 - Ancoragem com terminal de alumínio;
- 2 - Invólucro polimérico de borracha de silicone;
- 3 - Pilha de resistores de óxido metálico;

4 - Hastes reforçadas de fibra de vidro plástico.

Figura 28: Constituição de um para-raios de distribuição com envólucro polimérico [adaptada de (HINRICHSSEN, 2001)].

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

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

- Desempenho superior sob contaminação;
- Maior nível de segurança em caso de falha;
- Facilidade de transporte, armazenamento, manuseio e instalação;
- Melhor performance mecânica;
- Menor peso e tamanho do envólucro;
- Menor corrente de fuga, e consequente redução das perdas de energia;

- Maior capacidade de absorção de energia devido a uma melhor capacidade de dissipação de calor.

3.5.2 FATORES DE DEGRADAÇÃO DOS PARA-RAIOS DE ZNO

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

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

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

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

Atualmente há três gerações de resistores a óxido de zinco cujo desempenho frente a uma determinada tensão em frequência industrial sugere que os resistores mais modernos

possuem uma tendência a se auto estabilizarem quando submetidos a estas solicitações. A vida operacional dos mesmos pode ser decomposta em três regiões, as quais são demonstradas na Figura 29 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 29: Característica potência consumida versus tempo para resistores de ZnO de primeira, segunda e terceira geração (SANTOS, 2007).

O envelhecimento dos resistores a ZnO também se origina das descargas de surtos de corrente de origem atmosférica e de manobra, sendo que o mesmo é fundamentalmente condicionado à forma do impulso da descarga, a densidade de corrente através do resistor, a temperatura do resistor, a polaridade dos surtos e número de descargas, como se observa na Figura 30 e na Figura 31. Estas se referem a impulsos atmosféricos e a impulsos de manobra respectivamente, e por meio delas se conclui que quanto maior a densidade de corrente imposta aos resistores de ZnO maior será o aumento na corrente de fuga.

Figura 30: Fator de correção da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de 8x20μs – 400A/cm² (SANTOS, 2007).

Figura 31: Fator de correção da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de 500x1500μs – 35A/cm² (SANTOS, 2007).

3.5.3 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 a 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 $8/20 \mu\text{s}$ 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 32 mostra o esboço de uma curva característica de um varistor de ZnO com alguns dos valores típicos das especificações descritas anteriormente.

Figura 32: Curva característica típica de um varistor de ZnO (FRANCO, 2008).

Capítulo 4. Ensaios Experimentais E Modelagem De Para-Raios

4.1 INTRODUÇÃO

Os para-raios são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra surtos de diversas origens, formas e intensidades, contribuindo decisivamente para o aumento da confiabilidade, economia e continuidade de operação dos circuitos que protegem. À medida que os sistemas de potência incrementam sua capacidade de atendimento, novos mecanismos de gestão da manutenção dos para-raios tornam-se necessários. Tal constatação decorre do impacto de uma falha para a operação do sistema, implicando em uma busca por ferramentas que permitam auxiliar no monitoramento e diagnóstico, a fim de assegurar que esses dispositivos estejam sempre aptos a proteger os equipamentos à sua frente.

O funcionamento destes elementos de proteção pode ser comprometido por uma variedade de fatores, mas que podem ser agrupados em três classes, isto é, influência da tensão de operação, degradação causada por correntes impulsivas, efeitos devido às reações químicas com a atmosfera e à degradação natural.

O aumento da corrente de fuga devido aos efeitos causados por prolongado período de aplicação da tensão de operação era evidente em para-raios de primeira geração. Sob tais circunstâncias, o dispositivo passava a dissipar mais energia. Tais problemas foram contornados por novas tecnologias construtivas.

Já as correntes impulsivas, causadas por sobretensões, quando superam os valores nominais, alteram a curva característica $V \times I$, elevando-se a intensidade da corrente de fuga na região próxima à tensão de operação, fenômeno este causado por alterações nas barreiras de potencial existentes nos grãos metálicos dos varistores que são utilizados para a construção de para-raios de óxido-metálico.

Métodos que permitam a medição da corrente de fuga de forma eficiente e segura representam um grande desafio e são investigados por diversos grupos de pesquisa, em que os autores se propuseram a confeccionar metodologias de medições para inspeções em campo.

O que se observa na literatura técnico-científica é que os métodos utilizados para a determinação da degradação dos para-raios encontram-se bastante sedimentados para a transmissão de energia, tais como os métodos de determinação da curva $V \times I$, medida da perda

de potência, medida da temperatura da seção de ZnO, determinação do conteúdo harmônico da corrente de fuga e processo de envelhecimento artificial de dispositivos.

Além disso, entre as metodologias propostas em literatura para se melhorar a performance dos para-raios, as mais promissoras são aquelas fundamentadas em modelos de estimação da taxa de falhas dos dispositivos. Do ponto de vista prático, métodos capazes de tratar o problema de forma mais completa são aqueles que lançam mão de modelos aderentes de estimação do ponto ótimo de manutenção, observando-se variáveis pertinentes ao processo.

Ainda se destacam os trabalhos em que variáveis elétricas, históricas e ambientais foram levadas em consideração para a confecção de modelos de estimação do estado operativo de para-raios, utilizando-se para tanto de ferramentas inteligentes.

A degradação dos para-raios ao longo do tempo afeta suas características nominais de tensão devido ao estado de operação e aos pulsos de alta energia a que são submetidos, o que altera o tamanho e limites dos grãos e até mesmo a composição química da formulação dos varistores. Desse modo, a degradação afeta principalmente a chamada região de pré-quebra das curvas V-I e resulta em aumento da corrente de fuga e, conseqüentemente, na resposta dielétrica.

Por fim, ressalta-se que a degradação observada devido à operação normal do para-raios em campo não é exatamente a mesma observada durante o processo de degradação artificial, mas a degradação real em operação deverá promover um aumento na condutividade dos varistores de óxido metálico, estabelecendo assim a validade das técnicas diagnósticas adotadas em laboratório. Além disso, testes extensivos e testes de campo seriam necessários para estabelecer critérios de manutenção em para-raios, devido à grande variedade de tensões nominais e aplicações, mas a avaliação dos parâmetros dielétricos derivados das correntes de polarização e despolarização pode servir como uma ferramenta para avaliar a confiabilidade de para-raios.

Na busca em apresentar um modelo para o varistor de óxido metálico de Zinco (ZnO) usado em para-raios de média tensão, foi elaborado uma função por meio de um modelo matemático baseado na relação tensão por corrente do para-raios. Quando comparado com as curvas experimentais, a representação dos varistores por meio da função proposta fornece resultados próximos à realidade.

O modelo proposto pode ser correlaciona aos fenômenos que regem os efeitos de corrente de fuga, bem como permite avaliar o processo de degradação do varistor ao longo da vida útil do para-raios.

4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para fins de análise do comportamento típico e do levantamento de modelo matemático de relacionamento de grandezas elétricas dos para-raios, foram separados uma amostra aleatória dos para-raios utilizados pela concessionária EDP, afim de que o projeto de P&D estivesse customizado para os padrão atualmente usados pela distribuidora, assim foram realizados ensaios em para-raios novos do tipo PBP 10/10, em que a sigla 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 nas Tabela 4 e Tabela 5. Ressalta-se que as características mecânicas se referem as várias apresentadas na Figura 32, a seguir.

Tabela 4: Características Elétricas.

Modelo	Tensão Nominal Ur (kV rms)	Tensão de Operação Contínua Uc (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 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

Figura 33: Dimensões do para-raios PBP 10/10.

Nos presentes ensaios trabalhou-se com uma amostra de 10 para-raios, os quais 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.

Os dados resultantes dos ensaios estão documentados no ANEXO I, onde são apresentados os resultados dos testes realizados para cada um dos 10 para-raios participantes dos ensaios em duas situações distintas. Inicialmente, a temperatura ambiente é de aproximadamente 25°C e, posteriormente, após aquecimento, até cerca de 130°C em estufa apropriada.

A fim de avaliar o comportamento e vida útil dos para-raios foram realizados ensaios em laboratório para desenvolvimento de um modelo de estimação da degradação dos mesmos. Os ensaios nos para-raios foram feitos com o objetivo de compilar informações de estado sadio de dispositivos novos, para posteriormente compará-las com dispositivos retirados de campo instalados na área do Projeto Piloto, e assim viabilizarem a determinação do modelo de

degradação do dispositivo. Os ensaios foram conduzidos em 10 para-raios novos, cujos dados nominais são 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
 - ✓ 10 kA → 33.0 kV
 - ✓ 20 kA → 37.4 kV

Nos presentes ensaios os para-raios foram submetidos a diferentes valores de corrente, tensão e temperatura, para que se pudessem medir seus parâmetros de operação, cujos resultados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resultados dos modelos de estimação.

	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 500 A (kV pico)	Máximas tensões residuais (kV pico)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT01	3,94	25,7	24,3	24,6	24,7	24,8
DUT02	10,15	50,7	32,3	34,0	34,5	34,9
DUT03	4,25	26,2	24,4	24,8	24,9	25,0
DUT04	7,44	34,5	28,0	29,0	29,2	29,5
DUT05	3,82	26,1	24,4	24,8	24,9	25,0
DUT06	5,16	30,5	26,3	27,0	27,2	27,4
DUT07	4,96	23,1	22,5	22,6	22,7	22,7
DUT08	9,43	32,2	27,9	28,7	28,9	29,1
DUT09	6,24	28,9	26,1	26,6	26,8	26,9
DUT10	5,24	22,6	22,1	22,3	22,3	22,4

Verificam-se pelos resultados dos parâmetros nominais estimados que os para-raios, com exceção do identificado como DUT02, possuem tensões residuais dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante.

Além disso, foi realizada uma análise comparativa do comportamento da relação corrente x tensão dos para-raios em relação ao modelo matemático da Equação 4-1, com um intervalo de confiança de 90%, conforme exposto na Figura 34 para o para-raios DUT01.

$$V_{PR} = V_{\infty} - R \cdot I_{PR}^{-b} \quad (4-1)$$

Em que 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_{PR} é a corrente e b é o expoente responsável pela representação do não-linear relação entre tensão e corrente.

É possível notar que a curva do modelo (azul) desenvolvido para os para-raios, na grande maioria dos testes, está entre as curvas do intervalo de confiança (vermelhas) e próxima à curva (preta) que representa o comportamento dos para-raios segundo seus dados nominais fornecidos pelo fabricante.

Figura 34: Estimativa dos parâmetros nominais do para-raios DUT01.

4.3 O MODELO DE DEGRADAÇÃO

A degradação do funcionamento de um para-raios de ZnO está associada a diversos fatores técnicos e ambientais que alteram as condições normais de operação. Quando essas alterações são severas, ultrapassando limites especificados para atuação no sistema, podem resultar em sérios problemas ao próprio para-raios e, conseqüentemente, ao sistema elétrico. Os danos causados nos componentes do para-raios podem comprometer imediatamente a sua atuação ou em eventos futuros.

Com o propósito de encontrar um modelo que representasse o comportamento do para-raios e com isso parametrizar o sistema especialista oriundo do projeto de P&D, cujo esta pesquisa também faz parte, buscou-se então o modelo de degradação de para-raios usado em sistemas de distribuição de energia elétrica, baseando-se na seguinte metodologia:

- 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.

- Com base nesse modelo é possível calcular a dissipação de potência.
- Considerando-se o perfil de temperatura diária média é também possível determinar a temperatura de operação do para-raios.
- Empregando-se os procedimentos descrito na NBR 16050 de acordo com lei de Arrhenius é então possível estimar a redução de vida útil para o para-raios.

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
- 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. Na Figura 35 tem-se o registro térmico de um dos dispositivos ensaiados no início do referido experimento. Já na Figura 36, tem-se o registro ao fim do ensaio.

Figura 35: Registro térmico para um para-raios no início do ensaio.

Figura 36: Registro térmico para um para-raios no final do ensaio.

Agregando tais critérios, foi então desenvolvido o modelo de degradação dos para-raios, cujo resultado da degradação de vida útil de para-raios submetidos a sobretensões de origem atmosférica em função da temperatura é ilustrado na Figura 37.

Figura 37: Degradação da vida útil de para-raios em função da temperatura.

4.4 PROJETO PILOTO

Afim de comprovar o modelo, assim como refina-lo, foi realizado ainda em tempo de projeto junto a EDP, a execução de um experimento em campo com a instalação de para-raios novos, a uma rede conhecidamente atingida por descargas atmosféricas com uma considerável frequência. Os para-raios novos foram então instalados em sistemas pilotos, de acordo com a seguinte metodologia:

- Foram realizadas atividades de prospecção nas bases de ocorrências com o objetivo de elencar critérios de escolha das áreas pilotos onde seriam instalados os contadores de descargas atmosféricas.
- Conforme esta análise consolidada, outras causas de interesse foram inseridas para refinar os locais candidatos a sistema piloto do projeto, sendo elas: Causa 011-Descarga Atmosférica; Causa 020-Vento Forte; Causa 180-Galho de Árvore; Causa 181-Árvore Caída Sobre a Rede; Causa 343-Defeito Interno; Causa 440-Sobrecarga; Causa 491-Deterioração de Equipamento; Causa 880-Causas não classificadas; Causa 890-Causas não determinadas.
- As informações provenientes de descargas atmosféricas contemplam o período entre os anos de 2014 e 2015, sendo observadas 50.077 descargas em 2014 e 74.452 descargas em 2015.
- Para a determinação de candidatos à área piloto foram realizados cruzamentos de informações de ocorrências com descargas atmosféricas, podendo-se destacar a região de Suzano (Figura 36). As áreas em vermelho indicam conteúdo relevante de descargas

atmosféricas para o desenvolvimento deste projeto. Esta região coincide com o alimentador RSUZ-1306.

- O cruzamento de informações com a base de ocorrências, considerando-se as causas mais prováveis de falhas associadas com descargas (011, 020, 880 e 890), no período 2014-2015, mostrou que aproximadamente 30% do total de registros (986) referem-se a tais causas apontadas na base de dados (Figura 39).

- Foram definidos os aspectos técnicos das montagens dos para-raios novos em áreas pilotos com base na disponibilidade de instalação, tempo de instalação e condições favoráveis de instalação. Juntamente com os para-raios novos foram instalados os contadores de descargas atmosféricas que iriam contabilizar as ocorrências deste fenômeno na área de atuação do para-raios, tal como exemplificado pela Figura 40.

Figura 38: Descargas Atmosféricas para Suzano

Figura 39: Ocorrências 011, 020, 880 e 890 para o alimentador RSUZ 1306.

Figura 40: Exemplo da montagem dos para-raios novos.

Como resultado do experimento, não houve ocorrência de descargas no período da pesquisa, e conseqüentemente não houve contribuição para o refinamento do modelo estudado, porém os equipamentos continuam instalados e podem ser complementar a pesquisa em trabalhos futuros.

Capítulo 5. Conclusões E Trabalhos Futuros

5.1 CONCLUSÕES

As redes elétricas de distribuição e os equipamentos que a constituem, estão sempre expostas às sobretensões provenientes de distúrbios e falhas no próprio sistema e às ocorrências de descargas atmosféricas. Com o objetivo de impedir que estes equipamentos sejam danificados faz-se necessária a instalação de dispositivos de proteção contra sobretensões, sendo os para-raios os mais adequados para esta finalidade.

Devido à atuação dos para-raios na absorção e dissipação do excesso de energia das sobretensões, estes estão sujeitos à degradação e estresse de seus componentes ao longo de anos de utilização, além da ação de fatores ambientais como o sol, a chuva e a poluição, que podem levar a contaminações internas.

Dessa forma, seu desempenho pode reduzir-se gradualmente ao longo do tempo, até o ponto em que não seja mais capaz de absorver a energia de uma sobretensão, deixando de atuar adequadamente na proteção dos demais equipamentos e instalações dos sistemas elétricos dos quais fazem parte.

Torna-se necessário então o acompanhamento da degradação dos para-raios a fim de se conseguir prolongar a vida útil de campo destes equipamentos o máximo possível, uma vez que o diagnóstico de anormalidades operacionais do para-raios pode minimizar ou até mesmo evitar, desde pequenas perdas de equipamentos até acidentes de proporções catastróficas.

Dentre os fatores que contribuem para a degradação dos para-raios, destacam-se os seguintes: degradação dos varistores, perda de estanqueidade e penetração de umidade; contaminação externa do invólucro; descargas parciais internas, descargas de longa duração ou de curta duração com alta intensidade.

Neste contexto, buscou se abordar as mais proeminentes técnicas encontradas em literatura para a detecção prematura de avarias e degradação em para-raios instalados em sistemas de distribuição.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios realizados em uma amostra de 10 para-raios Balestro empregados pela EDP, sendo tais resultados parte da pesquisa realizada dentro do projeto de P&D junto a concessionária de distribuição de energia elétrica EDP.

É possível pontuar que analisando os resultados dos ensaios observa-se que a curva do modelo (azul) exemplificado na Figura 34, a ser desenvolvida para os para-raios, na grande maioria dos testes está abaixo da curva (preta) Figura 34 que representa o comportamento dos para-raios segundo seus dados nominais fornecidos pelo fabricante.

Com isso os ensaios forneceram uma base de dados por meio da qual foi possível modelar o comportamento de degradação apresentado pelos para-raios, conhecendo assim o desempenho do para raios e sua resposta em relação as condições de operação.

Associando aos resultados dos ensaios realizados, foi possível cruzar com as informações dos modelos estudos de tensões induzidas, o qual foi adotado o modelo de RUSCK, o qual é possível calcular as sobretensões aplicada a rede por meio de descargas indiretas, ocorridas nas proximidades da rede.

Também fez-se o uso das informações de descargas ocorridas, com a sua localização e intensidade de descarga, para correlacionar todas as informações, foi desenvolvido durante o projeto, um sistema especialista capaz de calcular todas sobretensões induzidas a rede, e estimar a degradação do dispositivo de proteção instalado, indicando os equipamento que possuem pouco tempo de vida útil, ou até mesmo aqueles em já não tem mas as propriedade de proteção esperadas.

Com isso espera-se alcançar um novo patamar a estratégia de manutenção, previsão, e prevenção da proteção da rede elétrica, pois no modo convencional de operação e manutenção, é esperado um defeito aparente no equipamento, o que por sua vez não ocorre na maioria das vezes, e leva a sua operação sem suas plenas condições de proteção, e ocasionar em caso de problemas indiretos como queima de transformadores, equipamentos de clientes.

Nesta conjuntura, a originalidade da pesquisa apresentada decorre da proposição de uma metodologia fundamentada em análises experimentais, em laboratório e em campo, e na relação entre a quantidade e a intensidade das correntes de descargas atmosféricas a que são submetidos os para-raios, afim de estabelecer critérios para substituição preventiva dos mesmos.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste trabalho, tendo em vista a grande quantidade de ocorrências de falta na rede de distribuição e os indicadores associados aos para raios apresentados pelas concessionárias. Seria interessante realizar uma medição dos resultados, seguindo a projeção da degradação dos mesmos, tendo em vista a quebra de paradigma na execução da manutenção,

instalação e prevenção destes dispositivos de proteção, desta forma refinando a modelagem de acordo com a resposta medida.

Uma outra oportunidade de continuidade deste trabalho, seria a associação da modelagem da degradação dos demais equipamentos instalados a rede, e qual a influência dos mesmos nas ocorrências de causas desconhecidas. Para tal, o uso de um sistema de controle integrado a base de ocorrências e as descargas atmosféricas sobre a área de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. High Voltage Surge Arresters Buyer's Guide. Edition 9.1, English, February, 2012.
- AGRAWAL, A. K.; PRICE, H. J.; GURBAXANI, S. H. Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-22, nº 2, p. 119-129, May, 1980.
- ALMEIDA, D. R. Um Novo Modelo de Representação de Corrente de Retorno do Canal de Torre de Medição para Estudos de Contaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.
- ALVES, L. C. Modelagem de Para-raios de ZnO para o Cálculo de Tensão Induzida por Descargas Atmosféricas em Redes de Distribuição. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Minas Gerais, Belo Horizonte, Agosto, 2010.
- 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.
- ARAÚJO, M.A. Estudo de metodologia para modelagem e simulação de tensões induzidas de Origem atmosféricas em linhas de Distribuição protegidas por para-raios de ZnO. Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, area de concentração em Sistemas Dinâmicos, 2013.
- BABA, Y.; ISHII, M. Characteristics of Electromagnetic Return-Stroke Models. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, nº 1, February, 2003.
- BABA, Y.; ISHII, M. Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, nº. 3, p. 324-328, April, 2001.
- BARBOSA, C. F.; PAULINO, J. O. S. An approximate time domain formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 49, nº 3, pp. 593-601, August, 2007.
- BARBOSA, C. F.; PAULINO, J. O. S.; MIRANDA, G. C.; BOAVENTURA, W. C.; NALLIN, F. E.; PERSON, S.; ZEDDAM A. Measured and modeled horizontal electric field from rocket-triggered lightning. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 50, nº 4, pp. 913-920, November, 2008.

- BARKER, P. P.; MANCAO, R. T.; KVALTINE, D. J.; PARRISH D. E. Characteristics of Lightning Surges Measured at Metal Oxide Distribution Arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº 1, p. 301- 310, 1993.
- BARKER, P. P.; SHORT, T. A.; EYBERT-BERARD, A. R.; BERLANDIS J. P. Induced Voltage Measurements on an Experimental Distribution Line During Nearby Rocket Triggered Lightning Flashes. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, nº 2, p. 980-995, 1996.
- 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.
- BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A.; PALONE, M. An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and Its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, nº 1, January, 2007.
- 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.
- BUENO, H.; MINETA, C. T. N.; MONTEIRO, A. J.; ALVES, J. M.; MENDONÇA, P. H.; BACHEGA, R. J.; MARTINEZ, M. L. B. Lightning Performance Improved Method Applied to AES – Eletropaulo Utility 13,8 kV Medium Voltage Distribution. Power Tech, IEEE Russian, 27-30 June, 2005.
- BURKE, G. J.; POGGIO, A. J. Numerical electromagnetic code (NEC) - method of moments, Vol. 1 – Program Description Theory. Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, California, 1977.
- CEPEL - ELETROBRAS, Curso sobre Para-raios de distribuição, Estação e Linhas de Transmissão. 53 p., 1977.
- CHOWDHURI, P.; GROSS, E. T. B. Voltage surges induced on overhead lines by lighting strokes. Proc. IEE, Vol. 114, nº12, pp. 1899-1907, December, 1967.
- 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.
- CIREN/CIGRÉ, Working group 05. Protection of MV and LV networks against lightning: basic information. International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, Proceedings CIREN 97, Conference Publication nº 438, p. 2191-2196, Birmingham, 1997.

- 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.
- CONTI A. R. Modelos para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativas das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas. Dissertação de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Agosto, 2006.
- 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.
- DURBAK, D. W. Surge arrester modeling. Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, USA, Vol. 2, pp. 728-730, 2001.
- ELAT, página inicial do site do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT), disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/>, acessado em 09/07/2012.
- EPRI. Transmission Line Lightning and Grounding Reference Book. Gray Book, Electric Power Research Institute (EPRI), Power Delivery & Utilization, December, 2011.
- ERIKSSON, A. J.; STRINGFELLOW, M. F.; MEAL, D. V. Lightning-Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, nº 4, p. 960-968, April, 1982.
- FELIPE, M. A. Sobretensões em Redes de Distribuição Decorrentes da Incidência de Descargas Atmosféricas em Torres de Telecomunicações. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Dezembro, 2007.
- 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. Curso sobre Para-raios: Aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão. Franco Engenharia, São Paulo, p. 174, 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. 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.
- GOLDE, R. H. Indirect lightning surges on overhead distribution lines. The Electrical Research Association, S/T 75, Leatherhead, 1954.
- HARRINGTON, R. F. Field Computation by Moment Methods. New York: McMillan, 1968.
- HINRICHSSEN, V. Metal-oxide Surge Arrester, Fundamentals. 1 st Edition, Siemens AG, Berlin, Germany, 2001.
- 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 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.
- JANKOV, V. Estimation of the Maximal Voltage Induced on an Overhead Line Due to the Nearby Lightning. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, nº 1, January, 1997.
- 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.
- KINDERMANN, G. Descargas Atmosféricas. 1ª Ed, Sagra-DC Luzzatto Editores, Porto Alegre, RS, 1992.
- 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.
- MARTINEZ J. A.; GONZALEZ-MOLINA F.; CHOWDHURI P. Calculation of Lightning Flashover Rates of Overhead Distribution Line, a Comparative Study. Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 4, p. 2577-1582, 2000.
- 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.
- 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.
- MICROTRAN, Power System Analysis Corporation, Transients Analysis Program Reference Manual, Vancouver, Canada, 1991.
- MODRUSAN, M. Tests on High-Voltage Metal Oxide Surge Arresters with Impulse Currents. Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, Athens, Greece, 1983.
- MOTA, P. C. A. Um Estudo sobre Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.
- 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.
- 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 nº 168, 1994.

- NUCCI C. A.; RACHIDI F. Lightning-Induced Overvoltages. IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session Distribution Lightning Protection, New Orleans, April, 1999.
- NUCCI, C. A.; DIENDORFER, G.; UMAN, M. A.; RACHIDI, F.; IANOZ, M.; MAZZETTI, C. Lightning Return Stroke Models With Specified Channel-Base Current: A Review and Comparison. Journal of Geophysical Research, Vol. 95, n°. D12, p. 20395-20408, November, 1990.
- 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.
- PAULINO, J. O. S. Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por descargas atmosféricas. Dissertação de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.
- PAULINO, J. O. S.; BARBOSA, C. F.; LOPES, I. J. S.; BOAVENTURA, W. C. An approximate formula for the peak value of lightning-induced voltages in overhead lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 25, n° 2, pp. 843-851, April, 2010.
- PAULINO, J. O. S.; BARBOSA, C. F.; LOPES, I. J. S.; BOAVENTURA, W. C. The Peak Value of Lightning-Induced Voltages in Overhead Lines Considering the Ground Resistivity and Typical Return Stroke Parameters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, n° 2, pp. 920-927 April, 2011.
- 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.
- PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A simplified model for zinc oxide surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, n° 2, April, 1999.
- 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.

- POKHAREL, R.K.; ISHII, M.; BABA, Y. Numerical Electromagnetic Analysis of Lightning-Induced Voltage over Ground of Finite Conductivity. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 45, n° 4, November, 2003.
- RACHIDI, F. Formulation of the Field-to-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Fields. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 35, n° 3, August, 1993.
- RAKOV, V. A. Characterization of Lightning Electromagnetic Fields and Their Modeling. Proceedings of the 14th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurique, Switzerland, p. 3-16, February, 2001.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of their Application. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, Vol. 4, n° 4, 1998.
- 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.
- RONDÓN, D. A.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. F. A Varying Surge Impedance Transmission Line Model for Simulation of Lightning Return Current in Time Domain. Proceedings of GROUND 2002 – International Conference on Grounding and Earthing, Rio de Janeiro, Brazil, November, 2002.
- RUBINSTEIN, M. An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate and long range. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol.38, n° 3, 1996.
- RUSCK, S. Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks. Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 1957.
- RUSCK, S. Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines With Special Reference to the Overvoltage Protection of Low Voltage Networks. Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, n° 120, 1958.
- SAKSHAUG, E. C. A Brief History of AC Surge Arresters. IEEE Power Engineering Review, Vol. 11, n° 8, p. 11-13, August, 1991.
- 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.

- SANTOS, P. H. M. Análise de desempenho frente a impulsos atmosféricos induzidos em circuitos de media tensão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- SARAN, M. A. M. Sobretensões de Origem Atmosférica em Linhas de Media Tensão. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Fevereiro, 2009.
- SCHEI, A.; FRANCO, J. L. Experiência no Monitoramento de Para-raios de Óxido Metálico em Serviço. Anais do VIII ERLAC, Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ, Ciudad del Este, Paraguay, 1999.
- SILVA J. P. Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica: Implementação da Teoria de Rusck no EMTP. Dissertação de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2001.
- SILVA NETO, A.; PIANTINI, A. Sobretensões Induzidas por Descargas Atmosféricas em Redes Secundárias. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, VII SBQEE, Vol. único, p. 1-6, 2007.
- SILVEIRA, F. H. Aplicação de um Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Julho, 2001.
- 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.
- SILVEIRA, J. Modelagem e análise de varistores de óxido metálico de zinco. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica, 2009.
- 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.
- TAYLOR, C. D.; SATTERWHITE, R. S.; HARRISON, C. W. The Response of a Terminated Two- Wire Transmission Line Excited by a Non-Uniform Electromagnetic Field. IEEE Transaction on Antennas and Propagations, Vol. AP-13, p. 987-989, 1965.
- THANASAKSIRI T. Improving the Lightning Performance of Overhead Distribution Line. TENCON 2004, IEEE Region 10 Conference, Vol. 3, p. 369-372, 2004.
- THOMAZELLA R. Implementação Computacional Para Avaliar os Níveis de Sobretensões Atmosféricas Induzidas em Linhas de Distribuição. Dissertação de Mestrado submetida

ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Dezembro, 2004.

TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NICHIDA, S. Protective performance of metal oxide surge arrester based on the dynamic V-I characteristics. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, nº 6, November/December, 1979.

UMAN, M. A. Lightning. Ed. McGraw-Hill Book Company, 1984.

VISACRO, S. F. Descargas Atmosféricas: uma Abordagem de Engenharia. Editora Artiber, São Paulo, SP, 2005.

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. Induced voltages on transmission lines. AIEE Transaction, nº 61, pp. 916-930, 1942.

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.

WAGNER, K. W. Elektromagnetische ausgleichvorgänge in freileitungen und kabeln. Per. 5, Leipzig, 1908.

YOKOYAMA, S.; MIYAKE, K.; MITANI, H.; YAMAZAKI, N. Advanced Observations of Lightning Induced Voltage on Power Distribution Lines. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 1, nº 2, p. 129-139, April, 1986.

YOKOYAMA, S.; YAMAMOTO, K.; KINOSHITA, H. Analogue simulation of lightning induced voltages and its application for analysis of overhead-ground-wire effects. IEEE Proceedings, Vol. 132, nº 4, July, 1985.

ZANETTA Jr, L. C. Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência. Editora EDUSP, 2003.

EXPEDITO VIANA, FABRICIO; Sistema Especialista para Cálculo de Sobreensões Induzidas em Sistemas de Distribuição Frente às Descargas Atmosféricas. São Carlos, 2019.

PERGENTINO, LUIZ ANTONIO; Avaliação do Impacto de Descargas Atmosféricas em Sistemas de Distribuição a Partir de Medidas em Campo. São Carlos, 2019.

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

1. PARA-RAIOS A TEMPERATURA AMBIENTE

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	9.7	24.3				
2	10.6	24.4				
3	11.2	24.4				
4	11.8	24.5				
6	12.4	24.6				
8	12.9	24.7				
10	13.2	24.7				
13	13.6	24.8				
18	14.2	24.9				
24	14.6	24.9				
32	15.1	25.0				
42	15.4	25.1				
56	15.8	25.1				
77	16.2	25.2				
104	16.6	25.3				
138	16.9	25.4				
180	17.1	25.4				
235	17.4	25.5				
322	17.7	25.6				
422	17.9	25.6				
588	18.2	25.7				
758	18.3	25.8				
1030	18.5	25.9				
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)		
				5 kA	10 kA	20 kA
DUT01	3.94	25.7	24.3	24.6	24.7	24.8

Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva		
Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT01
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Imagem térmica no término do ensaio</p> </div> </div>		
Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva		

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			
Corrente de ensaio (uA)	Tensão (kV)	Temp. (oC)				
1	8.2	25.4				
2	9.2	25.4				
3	9.8	25.4				
4	10.2	25.5				
6	10.9	25.5				
8	11.4	25.6				
10	11.7	25.6				
13	12.1	25.7				
18	12.7	25.7				
24	13.3	25.7				
33	13.8	25.8				
43	14.3	25.8				
55	14.7	25.9				
75	15.2	25.9				
100	15.6	25.9				
135	16.1	26.0				
175	16.5	26.0				
235	16.9	26.1				
316	17.3	26.1				
430	17.6	26.2				
577	18.0	26.2				
756	18.3	26.2				
1016	18.5	26.3				
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)		
				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

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT03
<div> <div> <p>Máx. = 26.27 Média = 25.24 Min. = 24.58</p> <p>27.14 27.33</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 27.67 Média = 26.41 Min. = 25.27</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>

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT04
<div> <p>Máx. = 25.47 Média = 24.81 Min. = 24.33</p> <p>27.23</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 26.95 Média = 26.01 Min. = 24.98</p> <p>27.77 27.30</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>

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

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>Bauru, Dezembro de 2016</div> <div>Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</div> </div> </div></div>

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 style="text-align: right;">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT08
<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>		
<p align="right">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>

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 style="text-align: right;">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT10
<div> <p>Máx. = 25.64 Média = 24.44 Min. = 23.94</p> <p>29.28</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 26.33 Média = 25.41 Min. = 24.58</p> <p>27.95</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>		

2. PARA-RAIOS APÓS AQUECIMENTO

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

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT02
<div> <div> <div> <div>Máx. = 131.11</div> <div>Média = 103.45</div> <div>Min. = 26.70</div> </div> <div>Imagem térmica no início do ensaio</div> </div> <div> <div> <div>Máx. = 101.84</div> <div>Média = 88.17</div> <div>Min. = 26.94</div> </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>

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

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> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 103.64 Média = 88.77 Min. = 27.47</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>

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>

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT06
<div> <div> <p>Máx. = 105.33 Média = 89.11 Min. = 27.08</p> <p>Imagem térmica no início do ensaio</p> </div> <div> <p>Máx. = 89.61 Média = 77.98 Min. = 26.94</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>

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT07
<div> </div> <div> </div> <div> <p>Imagem térmica no início do ensaio</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>

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 style="text-align: right;">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>

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

Imagem térmica do para-raios		
Fabricante: Balestro	Modelo: PBP10/10	Identificação: DUT10
<div> <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> </div>		
<p style="text-align: right;">Bauru, Dezembro de 2016 Eng. Responsável João Luis de Lima Silva</p>		

ANEXO II - PROCEDIMENTO DE ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO — LEI DE ARRHENIUS — PROBLEMAS COM TEMPERATURAS ELEVADAS

1. INTRODUÇÃO

Este material é um anexo da NBR16050 (ANEXO E), que aborda as tratativas para os ensaios de envelhecimento dos resistores de óxido metálico.

2. ABNT NBR16050: 2012 – ANEXO E

A lei de Arrhenius tem demonstrado bom resultado na avaliação da expectativa de vida dos resistores de óxido metálico. Isso é a base para o presente procedimento de ensaio de envelhecimento (ver 7.5.4). O limite superior da temperatura ambiente para os para-raios de óxido metálico de acordo com esta Norma é de 40 °C. Para alguns tipos de para-raios, como os imersos em líquidos, o limite superior da temperatura ambiente do meio no qual o para-raios opera é maior (+ 95 °C).

A taxa de envelhecimento acelerado é razoavelmente estimada pelo fator de aceleração $AFT = 2,5^{(AT/10)}$ sendo AT é a diferença entre a temperatura de ensaio e o limite superior da temperatura ambiente associada ao para-raios.

A Tabela E. 1 fornece exemplos da previsão da vida útil mínima demonstrada pelo ensaio de envelhecimento de 1 000 h a 115 °C, como descrito em 7.5.4.

Tabela E.1 — Previsão de vida útil mínima demonstrada

Limite superior da temperatura ambiente (°C)	Previsão de vida útil mínima (anos)
40	110
65	11
95	0,7

Se estes tempos equivalentes à temperatura de uso contínuo não forem aceitáveis para o comprador, o tempo de ensaio pode ser aumentado após acordo entre o fabricante e o comprador. Alternativamente, se ficar demonstrado que a lei de Arrhenius ainda se aplica, uma temperatura maior pode ser usada durante o ensaio, após acordo entre o fabricante e o comprador.