



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MELLINA MODESTO LISBOA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PARA-RAIOS DE ZNO SOB
DIVERSOS CENÁRIOS DE POLUIÇÃO UTILIZANDO MÉTODO DE
ELEMENTO FINITOS**

DM: 22/2022

BELÉM - PA

2022

MELLINA MODESTO LISBOA

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PARA-RAIOS DE ZNO
SOB DIVERSOS CENÁRIOS DE POLUIÇÃO
UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTO FINITOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica — PPGEE, da Universidade Federal do Pará — UFPA, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Alta Tensão

Orientador: Prof. Tit. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes

BELÉM - PARÁ

2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

L769a Lisboa, Mellina Modesto.
Análise de desempenho de para-raios de zno sob diversos cenários de poluição utilizando método de elemento finitos / Mellina Modesto Lisboa. — 2022.
77 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2022.

1. Campo Elétrico. 2. Corrente de Fuga. 3. Método de Elementos Finitos. 4. Modelagem. 5. Para-raios. I. Título.

CDD 620.00151825

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PARA-RAIOS DE ZNO SOB DIVERSOS CENÁRIOS
DE POLUIÇÃO UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”

AUTORA: **MELLINA MODESTO LISBOA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA
ELÉTRICA.

APROVADA EM: 16/08/2022

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes

(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Allan Rodrigo Arrifano Manito

(Avaliador Externo ao Programa - FEEB/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior

(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico esse trabalho aos meus falecidos avós: Nilton, Raimunda, Humberto e Maria de Deus, cujo carinho e ensinamentos conferidos a mim são bases para a minha construção pessoal e profissional.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo benefício divino de ter vida e saúde para iniciar e concluir esse trabalho.

Aos meus pais, Humberto e Márcia, jamais deixarei de agradecer por todo apoio, amor, carinho e pela compreensão. Mas principalmente por serem os meus pilares em cada passo dado.

Às minhas irmãs, Michelle e Nirvana, pelo amor para comigo e por serem meu espelho de determinação e força.

À minha segunda família: Luis, Georgina, Louise e Laís, pelo acolhimento e carinho dados a mim durante os últimos onze anos e por sempre zelarem pela minha felicidade.

Ao meu grande amigo, Leonardo, obrigada por segurar a minha mão e ser o meu ombro amigo em todos os momentos que eu precisei.

A um dos meus melhores amigos, parceiro de pesquisa e orientando, João Henrique, esse trabalho não seria concluído se você não estivesse ao meu lado dividindo cada etapa de desenvolvimento, me apoiando com o seu bom humor e paciência.

À Stephany, por dividir a paixão de estudar um dispositivo tão desafiador quanto o para-raios.

Ao Filipe Matheus e William, cada conhecimento compartilhado foi de vital importância para que eu pudesse concluir a minha pesquisa.

Ao André e Allan, por sempre acompanharem e apoiarem cada passo dado no desenvolvimento das minhas pesquisas.

Ao meu orientador, Marcus. Obrigada por acreditar no meu potencial, pelas orientações nos últimos cinco anos e por sempre me incentivar a nunca desistir da pesquisa.

Aos novos amigos que fiz em São Luis: Rafael, Laura, Priscilla, Stephanie, Thierry, Emily, Sara, Vanessa, Diego, Cicero, Edilane, Mariana, Carlos e Ananda. Dividir a vida com vocês, nos últimos meses, permitiu que a fase final da dissertação fosse mais leve.

“Algumas batalhas são vencidas com espadas e lanças, outras com papel e caneta.”

George Martin

Resumo

O para-raios de Óxido de Zinco é um dos dispositivos de proteção de vital importância para os Sistemas Elétricos de Potência e os equipamentos que os compõe, uma vez que ele assegura a confiabilidade e a continuidade de operação desses sistemas a partir da sua capacidade de atenuar as sobretensões transitórias resultantes de descargas atmosféricas ou surtos de manobra. Esse equipamento é formado por blocos de resistores variáveis de ZnO, associados em série ou em paralelo, cuja curva de tensão-corrente apresenta alta não-linearidade. Tendo em vista a relevância da utilização do para-raios, faz-se necessária a investigação das condições de operação deste. Na literatura, são encontrados diversos procedimentos e técnicas destinadas a tal finalidade, entre as quais destaca-se o monitoramento por meio da medição e análise da corrente de fuga, dado que esta representa um dos fatores principais que contribuem para a degradação deste equipamento. Diante deste contexto, a presente dissertação de mestrado implementa um modelo bidimensional de um para-raios de Óxido de Zinco de 30 kV, utilizando o Método de Elementos Finitos, para obter-se as curvas da corrente de fuga, distribuições do potencial elétrico, da densidade de corrente e a das linhas de campo elétrico, quando este dispositivo se encontra sujeito às condições de variações de tensão e poluições. Os resultados mostram um aumento significativo dessas grandezas medidas conforme o nível de poluição se intensifica, bem como, com o aumento dos níveis de tensão.

Palavras-chave: Campo Elétrico; Corrente de Fuga; Método de Elementos Finitos; Modelagem; Para-raios.

Abstract

Metal-Oxide Surge Arrester is one of the protection devices of vital importance for Electric Power Systems and the equipment that composes them, since it ensures the reliability and continuity of operation of these systems based on their ability to attenuate transient overvoltage resulting from lightning strikes or switching surges. This equipment is formed by blocks of variable ZnO resistors, associated in series or in parallel, whose voltage-current curve presents high non-linearity. In view of the relevance of using the lightning rod, it is necessary to investigate its operating conditions. In the literature, several procedures and techniques are found for this purpose, among which monitoring through measurement and analysis of the leakage current stands out, since this represents one of the main factors that contribute to the degradation of this equipment. Given this context, the present master's dissertation implements a two-dimensional model of a 30 kV Zinc Oxide lightning arrester, using the Finite Element Method, to obtain the leakage current curves, electrical potential distributions, current density and that of electric field lines, when this device is subject to voltage variations and pollution conditions. The results show a significant increase in these measured quantities as the level of pollution intensifies, as well as with the increase in voltage levels.

Keywords: Electric field; Leakage Current; Finite Element Method; Modeling; Surge Arrester.

Lista de Ilustrações

Figura 2.1. Curva característica de um para-raios ideal.....	23
Figura 2.2. Evolução dos para-raios.....	24
Figura 2.3. Curvas Características dos Para-raios de SiC e ZnO.....	27
Figura 2.4. Estrutura física do para-raios de ZnO.....	28
Figura 2.5. Circuito equivalente simples de funcionamento do para-raios.....	30
Figura 2.6. Forma de onda da tensão e da corrente de fuga em um para-raios de ZnO ideal.	31
Figura 2.7. Forma da tensão e corrente de fuga do para-raios em operação.....	31
Figura 2.8. Forma da tensão e corrente de fuga do para-raios em operação.....	33
Figura 2.9. Dependência da temperatura na curva característica.....	34
Figura 2.10. Dependência da temperatura na curva característica	35
Figura 2.11. Dependência da temperatura na curva característica.....	35
Figura 2.12. Modelo elétrico IEEE Working Group 3.4.11.....	43
Figura 2.13. Modelo elétrico Pinceti-Gianettone.....	44
Figura 2.14. Modelo elétrico Fernandez-Diaz.....	44

Figura 3.1. Elementos finitos usuais	48
Figura 3.2. Fluxograma de modelagem	49
Figura 3.3. Para-raios de ZnO de 30 kV _{rms}	50
Figura 3.4. Goemetria do para-raios criado no AutoCAD® 2D	51
Figura 3.5. Estrutura geométrica do para-raios	51
Figura 3.6. Curva característica V-I do ZnO	53
Figura 3.7. Camada de poluição sobre a superfície do para-raios	54
Figura 3.8. Limites de contorno da geometria	55
Figura 3.9. Malha de discretização do para-raios	56
Figura 4.1. Distribuição de potencial elétrico em 2D com 25 kV aplicado ao para-raios.....	60
Figura 4.2. Distribuição de potencial elétrico, em 2D, com 35 kV aplicado ao para-raios....	61
Figura 4.3. Distribuição das linhas de potencial elétrico, em 2D, com 25 kV aplicado ao para-raios	62
Figura 4.4. Distribuição das linhas de potencial elétrico, em 2D, com 35 kV aplicado ao para-raios	63
Figura 4.5. Distribuição de campo elétrico em 3D no para-raios com poluição leve com 25 kV aplicado ao seu terminal	64
Figura 4.6. Distribuição de campo elétrico em 3D no para-raios com poluição leve com 35 kV aplicado ao seu terminal	65
Figura 4.7. Corrente de fuga do para-raios limpo resultante da aplicação da tensão com amplitude de 25 kV	66

Figura 4.8. Corrente de fuga do para-raios limpo resultante da aplicação da tensão com amplitude de 35 kV	67
Figura 4.9. Corrente de Fuga no para-raios limpo	67
Figura 4.10. Corrente de Fuga no para-raios sob poluição leve	68
Figura 4.11. Corrente de Fuga no para-raios sob poluição média	69
Figura 4.12. Corrente de Fuga no para-raios sob poluição pesada e variação de tensão	69

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Propriedades dos métodos de medição de corrente de fuga.	41
Tabela 3.1. Propriedades dos métodos de medição de corrente de fuga.	50
Tabela 3.2. Dimensões dos componentes da geometria do para-raios	52
Tabela 3.3. Permissividade e condutividade elétrica dos materiais	52
Tabela 3.4. Condutividade e permissividade elétrica das poluições	54
Tabela 3.5. Condições de contorno	56
Tabela 3.6. Estatística dos elementos da malha da geometria.....	57

Lista de Siglas e Abreviaturas

α :	Coefficiente de não-linearidade
ϵ_0 :	Permissividade do vácuo
ϵ_r :	Permissividade relativa do material
σ	Condutividade elétrica
A_0, A_1 :	Resistências não-lineares
B:	Indução magnética
C:	Capacitância
D:	Deslocamento elétrico da geometria
E:	Campo Elétrico
I:	Corrente no para-raios
I_T :	Corrente de fuga total
I_C :	Corrente de fuga capacitiva
I_R :	Corrente de fuga resistiva
J:	Densidade de corrente
J_e :	Densidade de corrente gerada externamente
k	Constante característica do para-raios
L_0, L_1 :	Indutâncias
Q_j :	Fonte de corrente
V:	Potencial Elétrico
V-I	Tensão-Corrente
t:	Tempo

IEEE:	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LEAT:	Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão
MEF:	Método de Elementos Finitos
SEP:	Sistema Elétrico de Potência
SiC:	Carboneto de Silício
UFPA:	Universidade Federal do Pará
ZnO:	Óxido de Zinco

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação e Justificativa.....	19
1.2	Objetivo Geral	20
1.2.1	Objetivos Específicos	21
1.3	Organização da Dissertação	21
2	OS PARA-RAIOS.....	22
2.1	Introdução	22
2.2	Definição de Para-raios	22
2.2.1	Evolução dos para-raios.....	23
2.2.2	Nomenclaturas	25
2.2.2.1.	Tensão nominal	25
2.2.2.2.	Máxima tensão de operação contínua.....	25
2.2.2.3.	Tensão de referência	25
2.2.2.4.	Tensão residual	25
2.2.2.5.	Corrente de referência	26
2.2.2.6.	Corrente de Descarga.....	26
2.2.2.7.	Corrente de fuga	26
2.2.3	Características gerais dos para-raios de ZnO	26
2.2.3.1.	Invólucro.....	28
2.2.4	Corrente de fuga	29
2.2.5	Comportamento térmico dos para-raios	33
2.2.6	Fatores de degradação	36

2.2.6.1.	Tensão normal de operação	36
2.2.6.2.	Descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração	36
2.2.6.3.	Penetração de umidade	37
2.2.6.4.	Contaminação externa	37
2.3	Medições de corrente de fuga	37
2.3.1	Método A: Medição direta da corrente de fuga resistiva.....	38
2.3.1.1.	A1: Usando um sinal de tensão como referência	38
2.3.1.2.	A2: Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga utilizando um sinal de tensão.....	38
2.3.1.3.	A3: Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga sem o uso do sinal de tensão	38
2.3.1.4.	A4: Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga combinando as correntes das três fases	39
2.3.2	Método B: Determinação indireta do componente resistivo por meio de análise harmônica da corrente de fuga.....	39
2.3.2.1.	B1: Análise harmônica de terceira ordem da corrente de fuga.....	39
2.3.2.2.	B2: Análise harmônica de terceira ordem com compensação de harmônicos na tensão do sistema	40
2.3.2.3.	B3: Análise harmônica de primeira ordem da corrente de fuga	40
2.3.3	Método C: Determinação direta da perda de potência	40
2.4	Modelos de simulação de para-raios	42
2.4.1	IEEE Working Group 3.4.11	43
2.4.2	Pinceti-Gianettone	43
2.4.3	Fernandez-Diaz.....	44
2.5	Conclusão	44
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	46
3.1	Introdução	46
3.2	Método de Elementos Finitos (MEF)	46

3.2.1	Modelagem via MEF	47
3.3	Metodologia	48
3.4	Desenvolvimento do Modelo	49
3.5	Atribuições dos Parâmetros Eletromagnéticos Constitutivos na Modelagem 52	
3.6	Variação de Poluição	53
3.7	Condições de Contorno	55
3.8	Malha de Discretização	56
3.9	Equação da Corrente Elétrica	57
3.10	Conclusão	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Introdução	59
4.2	Potencial Elétrico	59
4.3	Campo Elétrico	63
4.3.1	Corrente de fuga	66
4.4	Conclusão	70
5	CONCLUSÕES	71
5.1	Propostas de Trabalhos Futuros	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Justificativa

Normalmente, os sistemas elétricos de alta tensão estão sujeitos aos transitórios provenientes de descargas atmosféricas ou de sobretensões internas ou externas, o que pode danificar os equipamentos não protegidos e até mesmo gerar um *blackout* no Sistema Elétrico de Potência (SEP). A fim de evitar que equipamentos elétricos de alto custo sofram danos e garantir uma operação econômica e confiável do SEP, faz-se necessário a utilização de dispositivos de proteção que garantam a manutenção da resistência de isolamento do equipamento a ser protegido. Entre esses dispositivos, destacam-se os para-raios.

Os para-raios, ao serem conectados aos terminais dos demais equipamentos ou na entrada das subestações, são responsáveis por limitar as sobretensões a níveis suficientemente seguros ao proporcionar um caminho condutivo de baixa impedância de surto entre fase e terra (LISBOA et al, 2020). Em condições normais de operação, essa impedância é suficientemente elevada para atuar como um circuito aberto e, assim, permanecer até o para-raios ser atingido por uma sobretensão (MARDIRA et al, 1999).

Os supressores são, atualmente, constituídos por um empilhamento de elementos altamente não-lineares, os varistores de ZnO, e revestidos por um material polimérico ou de porcelana (NOVIZON et al, 2011). Os para-raios de ZnO vêm substituindo os formados por Carboneto de Silício (SiC) devido ao fato de sua maior não-linearidade em relação ao segundo, o que contribui para que os supressores de ZnO proporcionem melhor proteção contra sobretensões, auxiliando na coordenação de isolamento (GANESH, 2018).

Tendo em vista a importância dos para-raios para os sistemas elétricos, é imprescindível o monitoramento e diagnóstico das condições de operação deste dispositivo, dada que as possíveis falhas do mesmo podem acarretar danos aos demais equipamentos da subestação ou até mesmo gerar acidentes aos profissionais que desempenham atividades nessas áreas (LIRA, 2007).

Uma das formas de diagnosticar o estado de operação do para-raios é por meio da medição e análise de corrente de fuga, sendo este um bom indicador de degradação. Esta corrente flui até o terra do para-raios em condições normais de operação e aumenta diante das mais variadas situações. Isso ocorre devido ao fato deste ser conectado diretamente entre a fase e o terra (PROMOD; BUMBLE, 2018). A corrente de fuga é composta por duas componentes, capacitiva e resistiva. A componente resistiva é normalmente tida como parâmetro de análise, já que ela sofre influência dos níveis de tensão e da temperatura no para-raios, além de ser responsável pelas perdas de energia nesse equipamento (LISBOA et al, 2020).

Por mais benéfico que seja, pesquisas detalhadas sobre as condições de operação, confiabilidade e estabilidade dos para-raios não são usualmente econômicas devido ao alto custo para a realização de estudos e testes usando equipamentos (SEYYEDBARZEGAR; MIRZARE, 2015). Para reverter essa limitação, estão sendo realizadas investigações por meio de modelagem computacionais, utilizando métodos matemáticos, como, por exemplo, o Método de Elementos Finitos (LATIFF, 2016). O referido método numérico permitiu aos pesquisadores desenvolver um modelo de substituição para avaliar diversos cenários que afetam as propriedades elétricas e térmicas do para-raios (FRITZ et, 2011).

Dado o exposto, torna-se clara a necessidade de se desenvolver métodos de monitoramento e diagnóstico de para-raios que possam ser executados com maior facilidade, ser economicamente mais acessíveis e, principalmente, apresentem resultados confiáveis e precisos, de forma a auxiliar as atividades de manutenção preditiva e preventiva do referido dispositivo.

Dentro deste contexto este trabalho apresenta um modelo bi-dimensional (2D) de um para-raios de ZnO, de 30 kV, construído no software COMSOL Multiphysics®, baseado no Método de Elementos Finitos, com o intuito de analisar o comportamento da corrente de fuga em diferentes níveis de tensão aplicada e poluições.

1.2 Objetivo Geral

A presente dissertação visa apresentar os dados de corrente de fuga obtidos por meio de simulação de um modelo bi-dimensional de um para-raios de 30 kV mediante à quatro situações: Para-raios limpo, sob poluição leve, média e pesada através da análise matemática utilizando Método de Elementos Finitos.

1.2.1 Objetivos Específicos

1. Desenvolver uma geometria, em 2D, de um para-raios de ZnO para medição de corrente de fuga utilizando Método de Elementos Finitos.
2. Investigar a influência dos cenários de poluição no comportamento do para-raios por meio da medição de corrente de fuga.
3. Analisar o comportamento da corrente de fuga, que flui no para-raios, quando este é submetido a diversos níveis de tensão.
4. Analisar o comportamento da distribuição do potencial elétrico e do campo elétrico, no para-raios, quando este é submetido diversos níveis de tensão e poluição.

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho de dissertação de mestrado está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 2, são descritos conceito de atuação e as características elétricas e de construção do para-raios ZnO, bem como os fatores de degradação que comprometem o seu bom desempenho, corrente de fuga e métodos de medição desta.

No Capítulo 3, são apresentados conceitos de Método de Elementos Finitos e os procedimentos necessários para a modelagem do para-raios para a medição de corrente de fuga frente à cenários de poluição e variação de tensão aplicada, no *software* COMSOL Multiphysics®.

Em seguida, são apresentados no Capítulo 4, os resultados obtidos a partir do emprego de Método de Elementos Finitos para medição de corrente de fuga, assim como as suas respectivas análises.

Por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e contribuições desta dissertação, além das perspectivas de trabalhos futuros.

2 PARA-RAIOS

2.1 Introdução

Este capítulo traz uma revisão bibliográfica sobre a importância da utilização da proteção nos sistemas elétricos de potência, assim como o princípio de funcionamento dos para-raios, a diferença entre os para-raios de Carboneto de Silício (SiC) e Óxido de Zinco (ZnO), a estrutura, os princípios de degradação dos mesmos, o conceito e os métodos de medição de corrente de fuga. Os modelos computacionais de para-raios desenvolvidos pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), Pincetti-Gianettone e Fernandez-Diaz são também descritos.

2.2 Definição de Para-raios

São inúmeros os fenômenos transitórios aos quais as subestações e as linhas de transmissão estão sujeitas e que provocam danos aos equipamentos pertencentes a estas. As súbitas variações de corrente e tensão ocasionam o desligamento desses equipamentos, de modo que tal ocorrência influencia diretamente no índice de desempenho do sistema elétrico.

A fim de se manter a insuspeição do SEP, requer-se a instalação de dispositivos de proteção que impeçam a passagem de sobretensões superiores às suportáveis pelo equipamento. Assim, o para-raios é o equipamento mais recomendável para exercer essa função; sendo este conectado entre o condutor e a terra, e seus terminais, constantemente sujeitos à aplicação da tensão nominal do sistema (VIDEIRA, 2011). A atuação do para-raios, então, é dada pela absorção de parte da corrente referente ao sinal de tensão que se direciona aos terminais dos equipamentos protegidos, mantendo-os dentro do nível máximo de tensão permitido. (D'ALUZ et al, 1985).

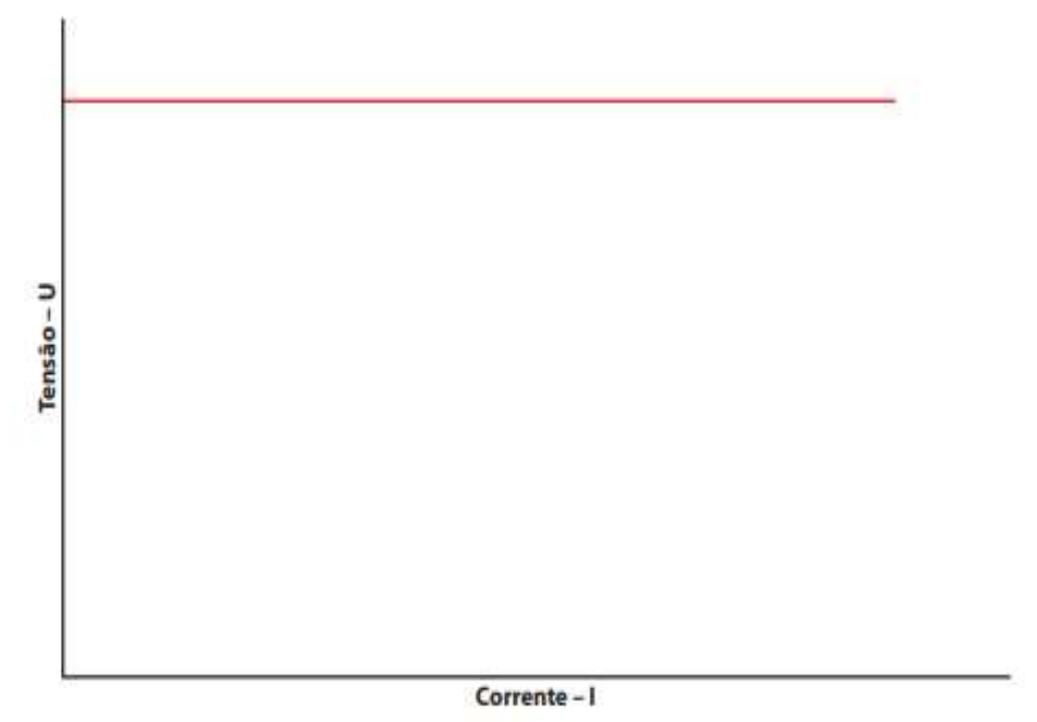
De modo geral, as condições de operação ideal do para-raios podem ser descritas como (BRITTO, 2006; LIMA JÚNIOR, 2014; ABDUL-MALEK et al, 2008):

- Impedância infinita em seus terminais, nas condições normais de operação, mantendo um comportamento de circuito aberto até à ocorrência de uma sobretensão;
- Capacidade de condução no mesmo instante de detecção da sobretensão, ou seja, baixa impedância, mantendo a amplitude da tensão próxima à nominal do sistema durante todo o processo;

- Interrupção da condução e retorno momentâneo à condição de origem quando da cessação da sobretensão;
- Ausência de limitações térmicas;

A partir desses parâmetros, o gráfico da curva característica do para-raios ideal – uma relação entre a tensão e a corrente do mesmo – pode ser representado pela Figura 2.1, da qual se nota que, independentemente da amplitude da corrente circulante, o nível de tensão permanece inalterado.

Figura 2.1. Curva característica de um para-raios ideal.



Fonte: FRONTIN, 2013

Contudo, apesar de nenhum para-raios fabricado até o momento conseguir atender a todos os requisitos mencionados – criteriosamente, desde o primeiro modelo utilizado até os dias atuais, estes vêm sofrendo mudanças para alcançarem as condições ideais.

2.2.1 Evolução dos para-raios

As primeiras projeções de para-raios, restrita aos centelhadores, eram conectadas à terra e usavam o ar como dielétrico, como mostra a Figura 2.2 (a). Ao sinal de sobretensão, o centelhador disparava, limitando os efeitos indesejáveis de tensão no equipamento protegido. No entanto, esses centelhadores eram suscetíveis às variações climáticas, o que reduzia sua

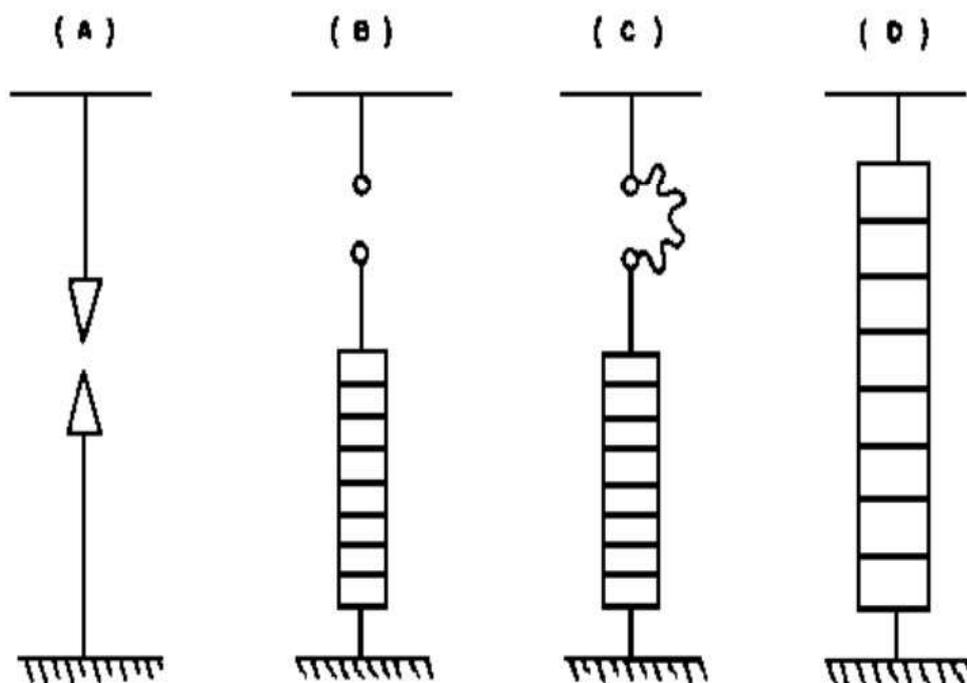
confiabilidade. Ademais, era comum a existência de curtos-circuitos acidentais, bem como a incapacidade de interromper correntes subsequentes.

Com o intuito de amenizar tais problemas, associou-se, em série, o centelhador e os resistores não-lineares (Figura 2.2. (b)). Em seguida, adotou-se a utilização de resistores à base de Carboneto de Silício (SiC) com gap ativo (Figura 2.2. (c)).

Entretanto, por mais que as melhorias fossem proporcionais às mudanças efetuadas no aspecto construtivo dos para-raios, a presença dos centelhadores tornou-se indesejada, uma vez que a disrupção do mesmo significa um transitório na tensão (ÁLVARES, 2008). Essa eventualidade, por sua vez, provoca o aumento da variação da tensão e, concomitantemente, da corrente no equipamento ligado ao para-raios (CEPEL, 1977).

A fim de se obter uma amplitude maior de corrente em frequências industriais sem o uso de centelhadores, projetou-se o que é tido como atual configuração: um para-raios com pastilhas de Óxido de Zinco (ZnO), visto na Figura 2.2 (d) a seguir, cuja alta não-linearidade proporciona um baixo valor de corrente (na ordem de mili ou micro Ampéres) e boa estabilidade na região de operação, eliminando a necessidade da presença de centelhadores. Além disso, o modelo vigente detém alta impedância para estágios normais de tensão, assim como, menor tempo de resposta que os de SiC e menor tensão residual.

Figura 2.2. Evolução dos para-raios



Fonte: FRONTIN, 2013

A equação (2.1), a seguir, relaciona a tensão e a corrente no para-raios, onde k é uma constante e α é o coeficiente de não-linearidade, o qual depende do material e dos parâmetros construtivos utilizados na fabricação do varistor. Nos para-raios de SiC, esse coeficiente assumia valores entre 2 e 7, enquanto nos de ZnO, varia de 25 a 50 (BARBOSA, 2007)

$$I = kV^\alpha \quad (2.1)$$

2.2.2 Nomenclaturas

O para-raios possui alguns termos técnicos utilizados, definidos por normas como a NBR 16050 (ABNT, 2010) e IEC 60099-4 (IEC, 2009), para que seja possível o entendimento dos seus ensaios e especificações. Estas nomenclaturas serão descritas a seguir:

2.2.2.1. Tensão nominal

É o valor da tensão eficaz na frequência industrial aplicada aos terminais do para-raios durante o ensaio de ciclo de serviço (durante 10 segundos consecutivos), para o qual ele foi projetado a operar corretamente sob condições de sobretensões temporárias.

2.2.2.2. Máxima tensão de operação contínua

É o valor de tensão limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis no sistema, que pode ser aplicado aos terminais do para-raios sem que haja alterações significativas em suas propriedades elétricas e térmicas.

2.2.2.3. Tensão de referência

É a razão entre o valor de crista e a constante $\sqrt{2}$. Corresponde à tensão à frequência industrial quando flui uma corrente de referência no para-raios. Ela define o ponto de transição entre as regiões de baixa corrente e alta não-linearidade

2.2.2.4. Tensão residual

É o maior valor de crista da tensão durante uma descarga, o qual depende da forma de onda do impulso aplicado. A tensão residual define o nível de proteção do para-raios contra surtos e é utilizada para coordenação de isolamento dos equipamentos a serem protegidos, de modo que o nível básico de isolamento seja superior a ela.

2.2.2.5. Corrente de referência

É o maior valor de crista da componente resistiva da corrente à frequência industrial. Normalmente, os valores assumidos encontram-se na faixa de 1 mA e 20 mA

2.2.2.6. Corrente de Descarga

É o valor de crista do impulso de corrente com forma de onda de 8/20 μ s. É usada para classificar os para-raios.

2.2.2.7. Corrente de fuga

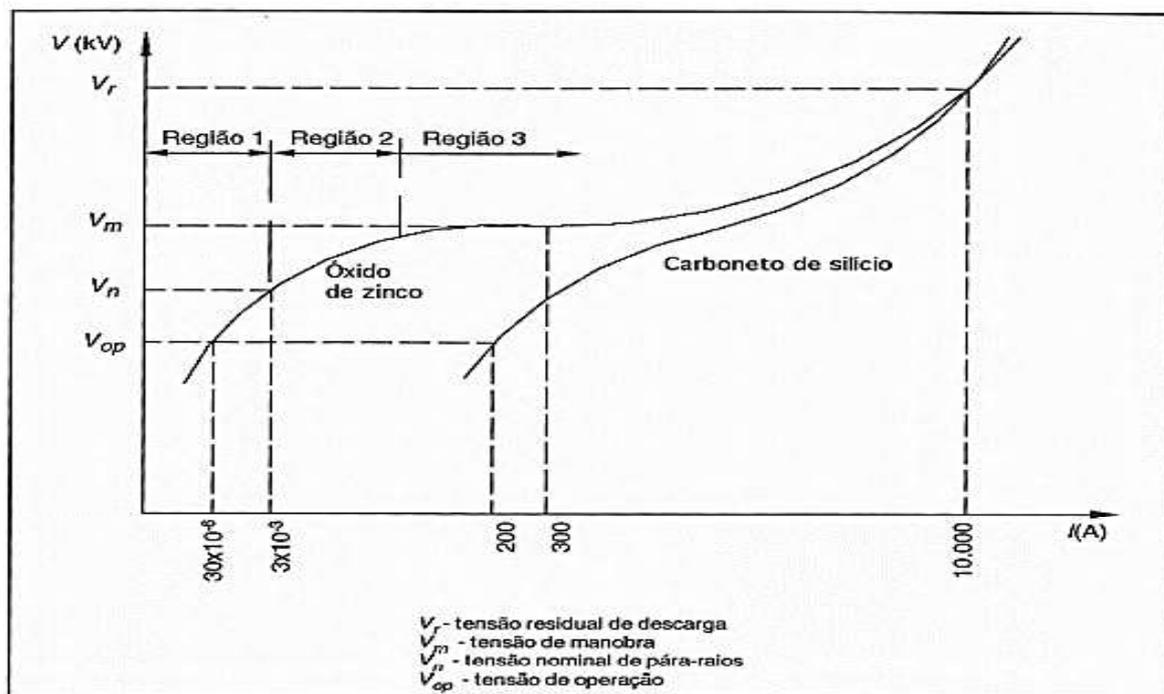
É a corrente interna total que flui através do para-raios e é expressa por seu valor eficaz ou de crista. Ela é composta por uma componente resistiva e uma componente capacitiva, e pode variar com a temperatura e com os efeitos de capacitâncias parasitas.

2.2.3 Características gerais dos para-raios de ZnO

O uso dos para-raios de ZnO iniciou-se na década de 70 a fim de substituir os para-raios de SiC. Essa mudança ocorreu pelo fato do primeiro apresentar um comportamento isolante com alta impedância em condições de operações normais e, portanto, não conduzindo corrente. Em cenários de sobretensões, o para-raios torna-se um condutor, permitindo o escoamento da corrente à terra. Esse princípio ocorre graças ao alto grau de não-linearidade que a curva V-I do ZnO apresenta.

Na Figura 2.3, é possível observar a comparação das curvas características dos para-raios de SiC e ZnO, onde fica explícita a superioridade da não-linearidade dos resistores óxido-metálicos, o que proporciona a circulação de valores pequenos de corrente para níveis de tensão próximos da nominal. Ao dividir as referidas curvas em três regiões, é possível compreender o comportamento do para-raios com relação ao aumento da corrente e da tensão.

Figura 2.3. Curvas Características dos Para-raios de SiC e ZnO



Fonte: MAMEDE FILHO, 2005 (Adaptado).

A Região 1, conhecida como zona de ruptura e limitada pelas tensões de operação e nominal, possui baixa densidade de corrente, em ordem de mA, e, nela, o para-raios assume um comportamento majoritariamente capacitivo, mantendo-se em regime permanente (PEDROSA, 2013). Além disso, este se apresenta suscetível à variação da temperatura, o que faz suas características de proteção sofrerem alterações; as propriedades relacionadas a essa região dependem do contorno dos grãos de ZnO.

Na Região 2 – zona de ruptura e de média corrente –, há um pequeno aumento da tensão, mesmo com o aumento da corrente. Esse aumento da tensão ocasiona um efeito em cascata: do aumento do campo elétrico à redução da barreira de potencial, o que leva o ZnO a assumir um comportamento altamente não-linear, e o para-raios, um caráter resistivo. Cabe ressaltar que, na Região 2, se o para-raios operar por mais de 10 segundos, a corrente de fuga provocará o aumento da temperatura das pastilhas de ZnO e, conseqüentemente, gerará danos ao para-raios (VIANNA, 2009). Ademais, nota-se que o SiC não possui característica não-linear suficiente para operar sem centelhadores.

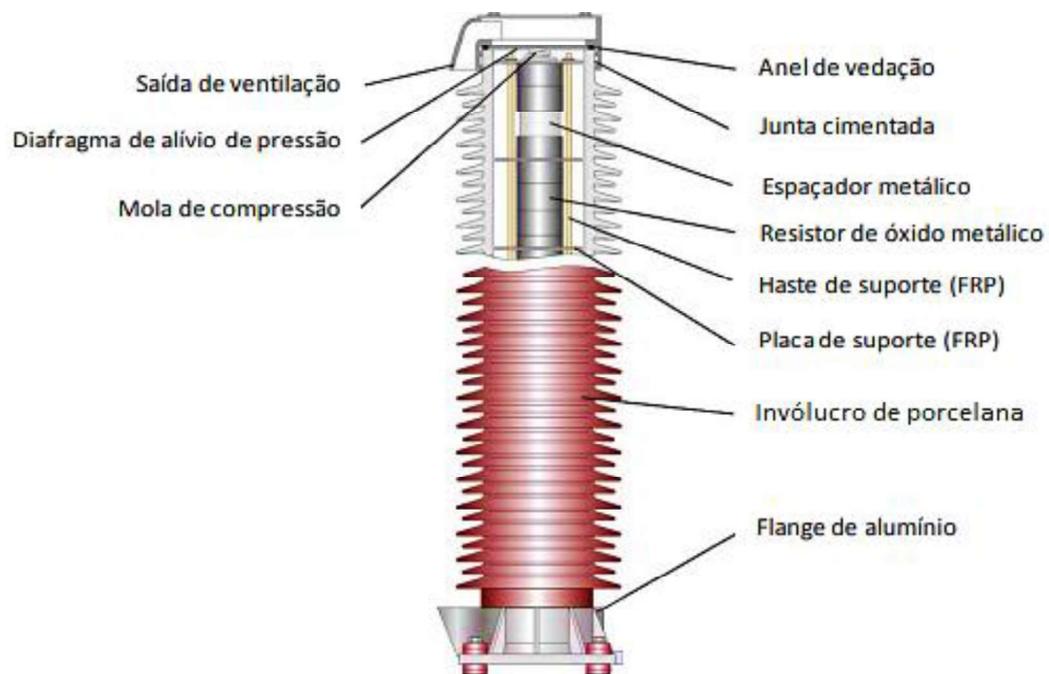
A zona de retorno, ou Região 3, apresenta uma relação linear entre a tensão e a corrente e se encontra entre os valores de tensão de manobra e de tensão residual. O aumento rápido da tensão decorre da impedância dos grãos, a qual tende ao infinito. Desse modo, se o dispositivo

permanecer muito tempo sob efeito de uma alta corrente fluindo em seus terminais, há duas possibilidades: ocorrência de avalanche térmica ou alterações no seu desempenho de proteção.

2.2.3.1. Invólucro

A estrutura de um para-raios de ZnO, como um todo, é apresentada na Figura 2.4, e no que se refere especificamente a uma de suas partes, o invólucro – responsável pelo armazenamento da estrutura dos resistores não-lineares –, atualmente, possui duas filosofias de construção: de porcelana e polimérico;

Figura 2.4. Estrutura física do para-raios de ZnO.



Fonte: HINRICHSEN, 2012. (Adaptado).

Os para-raios de invólucro de porcelana foram os primeiros a serem introduzidos no mercado de energia. Este para-raios possui uma composição não-porosa, com espaçadores metálicos cuja intenção era facilitar a dissipação de calor do equipamento.

Por outro lado, os de corpo polimérico são divididos em duas categorias: com e sem espaçamento de ar. No primeiro, é adicionado um tubo de fibra de vidro entre os varistores e o invólucro polimérico, o que aumenta a resistência mecânica do dispositivo; enquanto que no segundo, os blocos de ZnO são envolvidos por um tubo de vidro banhado em resina de epóxi, sobre o qual o invólucro polimérico é aplicado a partir do processo de injeção de borracha.

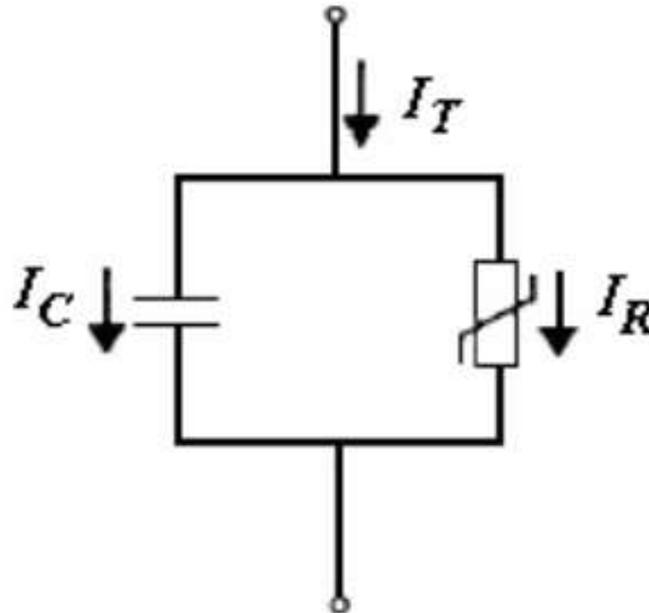
Há algumas vantagens dos para-raios poliméricos em relação aos de porcelana, das quais se destacam (COLOMBO et al, 1996; DE NIGRIS et al, 1998; LAHTI et al, 2001; BARRADAS, 2014):

- Melhor comportamento mecânico;
- Facilidade de transporte, armazenamento, manuseio e instalação, por possuírem peso e tamanho de invólucro reduzidos; gerando menos custo;
- Melhor desempenho sob situações de intempéries (poluição, maresia e etc) e variação de temperatura;
- Menor corrente de fuga, reduzindo as perdas energéticas;
- Melhor capacidade de dissipação de calor. Portanto, a absorção de energia é mais eficaz;
- Melhor isolamento dos componentes internos contra a umidade;
- Como os para-raios sem espaçamento de ar não precisam de alívio de sobretensão, o projeto dos mesmos torna-se mais econômicos;
- Em caso de trincas provenientes do transporte, manuseio, instalação ou, até mesmo, explosões, não há a liberação de fragmentos.

2.2.4 Corrente de fuga

Em condições normais de operação, uma corrente flui pelos terminais do para-raios, na ordem de mA (mili Ampère) ou μ A (micro Ampère) a alguns Ampères, denominada corrente de fuga. A Figura 2.5 mostra o circuito equivalente do equipamento na faixa de operação de corrente de fuga.

Figura 2.5. Circuito equivalente simples de funcionamento do para-raios.



Fonte: LIRA, 2007.

A corrente de fuga é composta por duas componentes: capacitiva e resistiva. A primeira é muito superior em relação à segunda, por isso, a corrente de fuga total é majoritariamente capacitiva (URSINE, 2013).

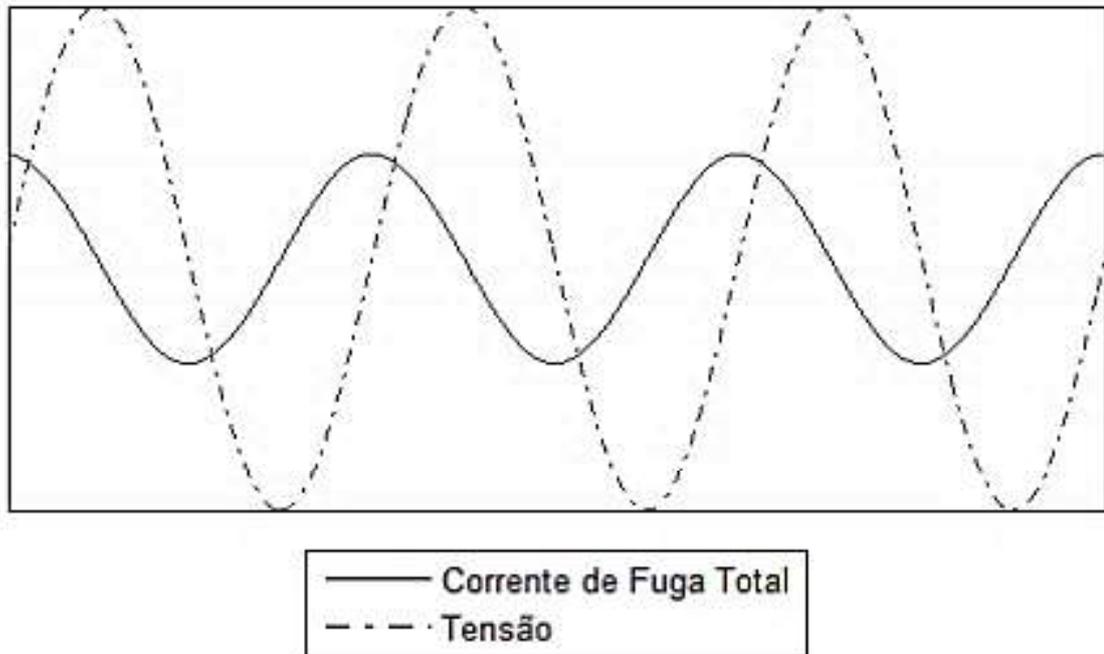
A componente capacitiva está relacionada às capacitâncias parasitas e à permissividade dos grãos de ZnO. Assim, a forma de onda da corrente é predominantemente senoidal, com valores de pico iguais a 0,1 mA a 3 mA durante a tensão de operação do para-raios; e pouco dependente da variação de temperatura.

Por outro lado, a componente resistiva se mantém em fase com a tensão aplicada ao para-raios e possui forma de onda distorcida, devido às características não-lineares da resistência R_{ci} , a qual varia com o aumento da tensão. Enquanto o para-raios está sujeito à tensão máxima em seus terminais, o valor de pico de tal componente varia de 5% a 20% do valor de pico da corrente de fuga total. Como possui caráter dissipativo, esta é responsável pelo aumento da temperatura no para-raios por efeito Joule; e passível à variação da frequência e da temperatura dos componentes dos varistores (BARRADAS, 2014). Desse modo, a medição da componente resistiva tornou-se um dos métodos de monitoramento de degradação do para-raios.

A Figura 2.6 apresenta a corrente de fuga total durante a tensão de operação contínua. Adicionalmente, a Figura 2.7 mostra a situação quando a corrente resistiva é suficientemente alta a ponto de distorcer a forma de onda da corrente de fuga total. A elevação do valor da

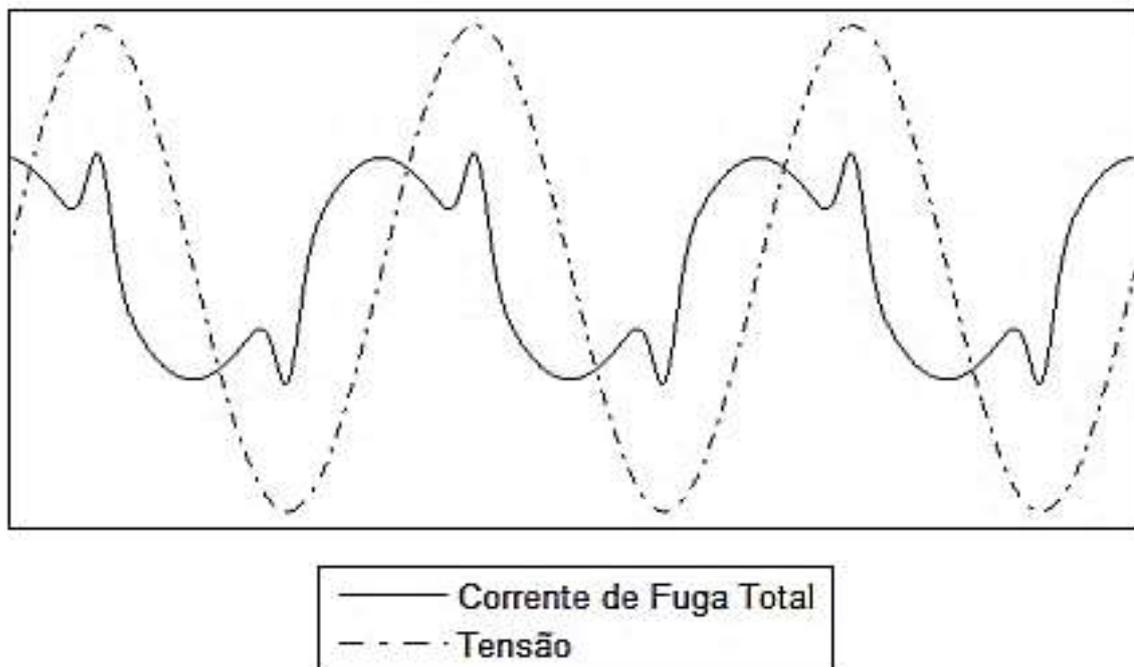
referida componente torna o para-raios sujeito a uma avalanche térmica, contribuindo para uma possível degradação do mesmo.

Figura 2.6. Forma de onda da tensão e da corrente de fuga em um para-raios de ZnO ideal.



Fonte: Fonte: URSINE, 2013

Figura 2.7. Forma da tensão e corrente de fuga do para-raios em operação



Fonte: URSINE, 2013

Visto que a corrente de fuga total não é uma senoide pura, pode-se representá-la a partir das Séries de Fourier, onde identificam-se as suas componentes e o seu conteúdo harmônico. Portanto, a corrente de fuga total será igual ao somatório contido na Equação (2.2).

$$I_f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.2)$$

Em razão da forma de onda em questão apresentar uma simetria em seus ciclos positivos e negativos, o termo $\frac{a_0}{2}$ será nulo, e a Série de Fourier apresentará somente os harmônicos ímpares. Devido à tensão não apresentar harmônicos significativos, ela será formada apenas por sua componente fundamental, de modo que poderá assumir uma função de operação igual à equação (2.3).

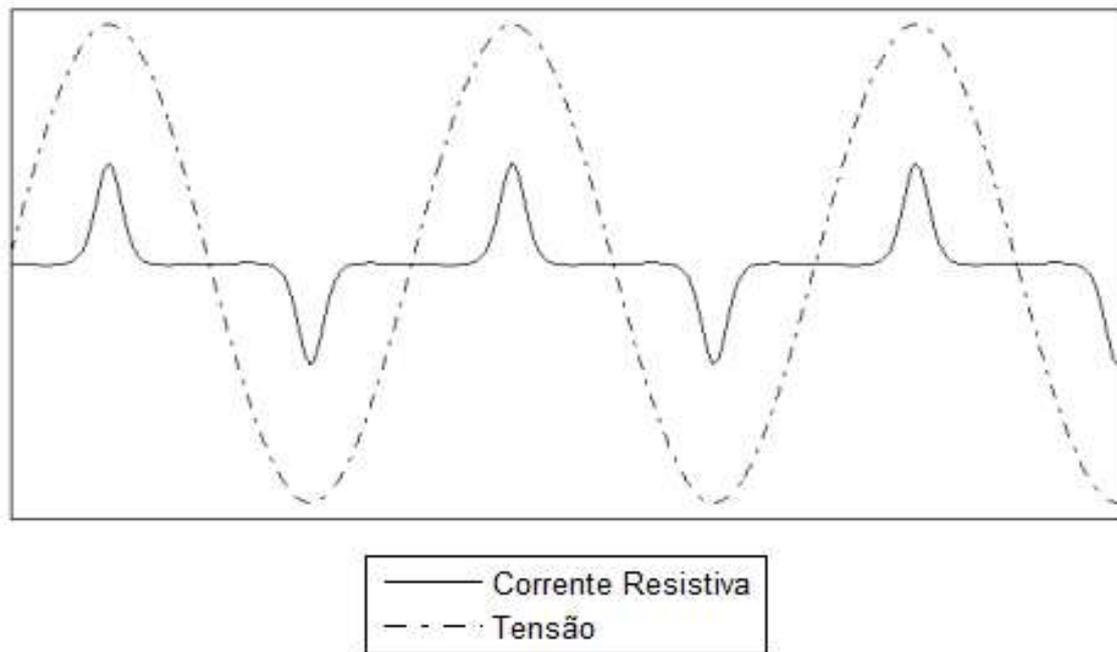
$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sin(n\omega t) \quad (2.3)$$

Uma vez que a corrente resistiva está em fase com a tensão, representada pela equação (2) e vista na Figura 2.8, essa será formada pela componente Seno da Série, enquanto a corrente capacitiva, estando defasada de 90° em relação à tensão, será constituída pela componente Cosseno. Por conseguinte, as duas correntes serão equivalentes às equações (2.4) e (2.5), respectivamente.

$$I_r(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t) \quad (2.4)$$

$$I_c(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) \quad (2.5)$$

Figura 2.8. Forma da tensão e corrente de fuga do para-raios em operação.

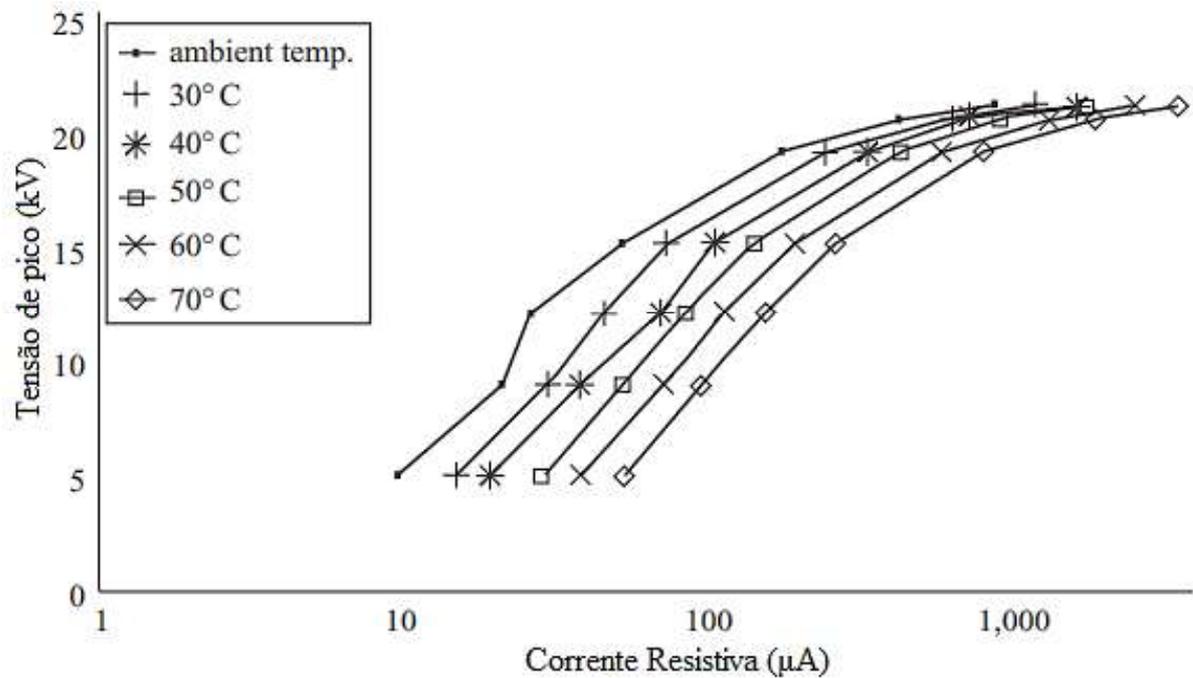


Fonte: URSINE, 2013

2.2.5 Comportamento térmico dos para-raios

Por não conterem centelhadores, a corrente de fuga que flui através dos para-raios de óxido metálico ocasiona perdas de energia e aquecimento nos resistores não-lineares, levando à sua degradação. O aquecimento dá-se pelo consumo de potência, em meio à frequência industrial, e pela influência da radiação solar (DINIZ, 2011). As referidas situações são de extremo perigo na zona de ruptura, mencionada no item 2.3.3, onde o para-raios é sensível à variação da temperatura. Como pode ser visto na Figura 2.9, à medida que é aplicado um certo nível de tensão, a sensibilidade da corrente de fuga aumenta na região de baixa condução, devido à ocorrência do processo de realimentação no sistema, o que eleva a potência consumida. Nesse caso, se o calor gerado não for dissipado, o para-raios poderá sofrer danos e ter seu desempenho comprometido.

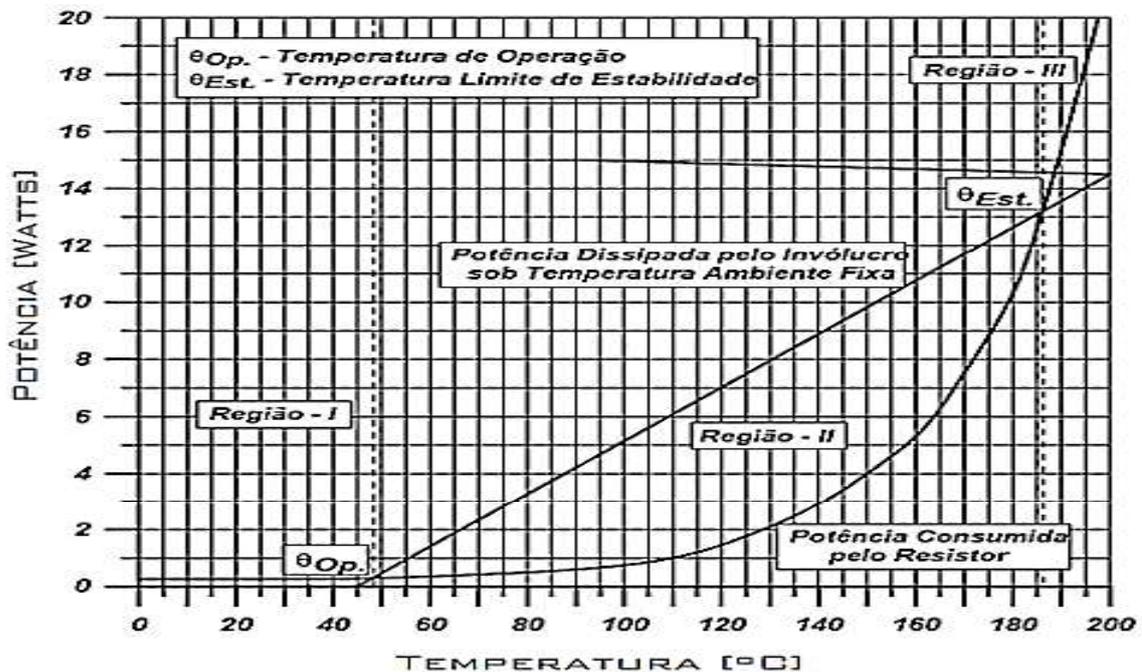
Figura 2.9. Dependência da temperatura na curva característica.



Fonte: HADDAD; WARNE, 2007 (Adaptado).

O comportamento ideal de um para-raios após um surto seria o de retornar às suas configurações normais e manter a capacidade de dissipação de energia em regime de operação contínua. Quando a capacidade de dissipação de calor é maior que a de absorção do mesmo, o equipamento tende a retornar ao seu estado de equilíbrio. No entanto, quando ocorre a situação inversa, a energia excedida é armazenada, portanto, há o aumento da temperatura, resultando no fenômeno denominado de avalanche térmica. Se a perda de calor for maior que a dissipação de energia, a temperatura do para-raios reduz. O comportamento térmico mencionado pode ser observado a partir das curvas (potência x temperatura) presentes na Figura 2.10.

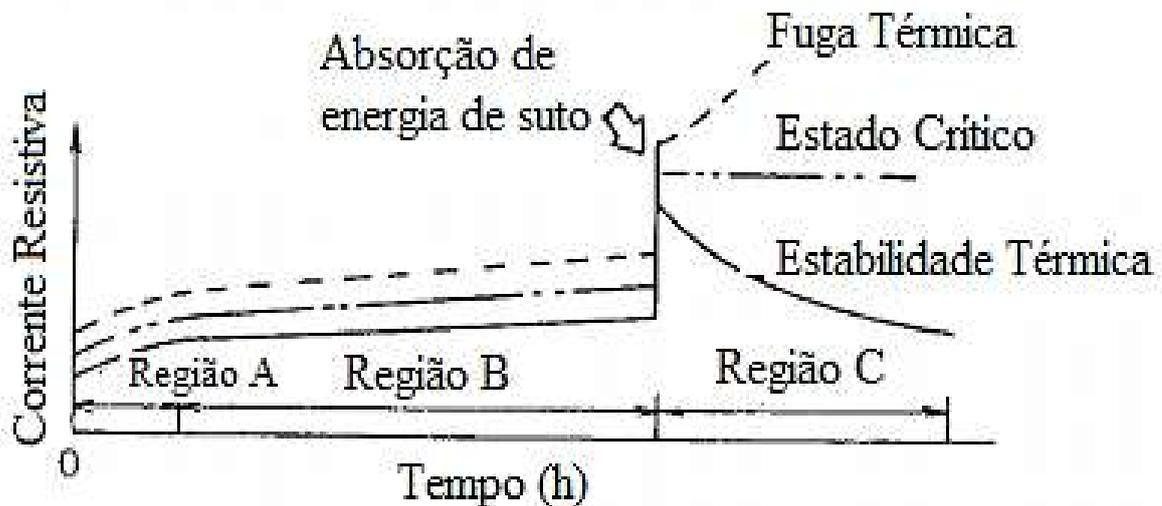
Figura 2.10. Dependência da temperatura na curva característica



Fonte: DINIZ, 2011

A Figura 2.11 exibe o padrão de mudança da corrente de fuga no para-raios à medida que este é deteriorado, onde as curvas apresentadas são divididas em três regiões (A, B e C).

Figura 2.11. Dependência da temperatura na curva característica



Fonte: SHIRAKAWA et al, 1988 (Adaptado)

Na Região A, é aplicada uma tensão ao dispositivo ainda não deteriorado. Na Região B, ocorre a degradação gradual juntamente com o aumento da componente resistiva da corrente de fuga. Por fim, a Região C é onde os elementos de óxido de zinco deterioram-se e apresentam

um comportamento termicamente instável. Com isso, é possível afirmar que a corrente de fuga se torna facilmente detectável em virtude do aumento não-linear da componente resistiva

2.2.6 Fatores de degradação

A degradação dos para-raios de ZnO pode ocorrer sob diferentes fatores naturalmente elétrico, térmicos e ambientais. Entre eles, destaca-se a poluição no invólucro deste; tal condição pode acarretar um efeito em cascata: ocorrência de descargas parciais internas e início da degradação dos discos de ZnO.

A presença de defeitos no disco de ZnO resulta no aumento excessivo da corrente de fuga que flui no corpo do para-raios, o que pode mudar as características dos referidos discos e, por consequência, resultar em uma avalanche térmica e falha do para-raios (LATIFF, 2018).

A seguir, são listados alguns dos possíveis fatores de degradação do para-raios.

2.2.6.1. Tensão normal de operação

A aplicação contínua da tensão de operação degrada progressivamente os resistores de ZnO, envelhecendo o mesmo e acarretando a avalanche térmica (SILVA, 2016). Com isso, tem-se uma situação de efeito em cascata: aquecimento do equipamento em razão das perdas por efeito Joule, aumento da temperatura, da corrente resistiva e da potência, até o para-raios falhar (ÁLVARES, 2008).

2.2.6.2. Descargas de longa duração ou de alta intensidade com curta duração

As descargas de longa duração, conhecidas como surtos de manobra, normalmente provenientes do chaveamento dos bancos de capacitores ou linhas longas a vazio, provocam queima, rachaduras, trincas e/ou descargas externas.

Já os surtos atmosféricos (descargas de alta intensidade de curta duração), quando ocorrem, podem se concentrar em um único ponto de referência, perfurando os blocos de ZnO.

A degradação decorrente desses surtos provoca a redução da máxima temperatura de operação com a qual o para-raios dissipa energia. E, como mencionado no tópico 2.3.4, caso a capacidade de absorção de energia seja maior que a de dissipação, é gerada uma instabilidade térmica no supressor (ÁLVARES, 2008).

2.2.6.3. Penetração de umidade

A umidade nos para-raios é um dos principais motivos de falha neste. Sua penetração ocorre através das trincas presentes no invólucro (em sua grande maioria, os de porcelana) ou da deterioração do sistema de vedação ou do dispositivo de alívio de pressão. Ela resulta na corrosão dos componentes metálicos, muda o perfil da corrente – devido ao aumento da permissividade do material – e, conseqüentemente, altera a curva característica, aumenta a corrente de fuga e reduz o isolamento externo e a capacidade de absorção de energia.

2.2.6.4. Contaminação externa

A contaminação externa é mais comum nos para-raios de porcelana do que nos poliméricos e ocorre por efeito da poeira e/ou umidade em torno do invólucro. Geralmente, proporciona a ionização interna, gerando as descargas internas. Essas descargas, ao gerarem uma reação química no gás de enchimento, bem como a queima do oxigênio, produzem compostos agressivos ao para-raios, afetando as propriedades químicas e elétricas dos elementos de ZnO. Logo, há a possibilidade de desvios de corrente para a superfície dos varistores, prejudicando a atuação do para-raios na limitação e eliminação das correntes derivadas dos surtos de tensão (VIDEIRA, 2011).

2.3 Medições de corrente de fuga

São diversos os métodos de medição de corrente de fuga, os quais, segundo a IEC 60099-5 (1999), podem ser divididos em métodos online e off-line. O primeiro fundamenta-se em conectar o supressor de surtos ao sistema de energia e energizá-lo com a tensão de serviço durante uma situação de operação normal. Enquanto o off-line se baseia em testes fora do ambiente de operação normal, ou seja, em laboratórios com fontes de tensão separada, como um gerador de testes, por exemplo.

Nas seguintes subseções, são apresentados três métodos de medição da componente resistiva da corrente fuga – A, B e C –, contidos na sexta seção da IEC 60099-5 (IEC, 1999). Cada método exposto contém suas vantagens, desvantagens e incertezas durante o processo de medição, como são mostrados na Tabela 3.1.

2.3.1 Método A: Medição direta da corrente de fuga resistiva

2.3.1.1. A1: Usando um sinal de tensão como referência

Utiliza-se um sinal de tensão como referência para determinar a componente resistiva da corrente de fuga. Isto é possível quando é efetuada a medição simultânea da tensão aplicada aos terminais do para-raios e da corrente de fuga total.

Como a taxa de variação da tensão é zero ($dV/dt=0$), portanto, seu valor é máximo, e ainda, como a componente capacitiva da corrente de fuga está em fase com a tensão, essa também será igual a zero. Nesse instante, a corrente de fuga total é igual ao valor de pico da componente resistiva.

Contudo, esse método não é comumente utilizado na prática em razão da rara disponibilidade do sinal de referência ser igual ao aplicado aos terminais do para-raios (ALVES, 2013). A precisão pode ser limitada visto que é necessário o deslocamento de fase da tensão do sinal de referência, além dos desvios na magnitude e fase da tensão na extremidade aterrada do para-raios.

2.3.1.2. A2: Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga utilizando um sinal de tensão

A mesma tensão aplicada ao para-raios analisado deve ser aplicada a um circuito de ponte de compensação capacitiva (com mesmo valor de capacitância do para-raios). Com isso, obtém-se um sinal de corrente capacitiva de mesma fase e magnitude da componente capacitiva da corrente de fuga a fim de subtrair a corrente obtida da corrente de fuga total, restando apenas a componente resistiva.

Dado que esse método também necessita de uma tensão de referência, ele é restrito a testes em laboratório, tornando-se não viável o uso dele em campo. Semelhante ao método A1, a precisão pode ser reduzida por mudanças de fase nas tensões e correntes devido à influência de fases adjacentes.

2.3.1.3. A3: Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga sem o uso do sinal de tensão

Nesse método, não há necessidade de um sinal de referência de tensão, pois o mesmo é gerado sinteticamente. Assim, a subtração entre as correntes de fuga total e a capacitiva ocorre por meio de hardware ou software (ALVES, 2013).

A corrente capacitiva deve ser gerada levando em consideração as amplitudes e os ângulos de fase corretos, os quais podem ser calibrados usando um osciloscópio para que ambos se adequem aos dados de fabricação dos resistores não-lineares do para-raios.

Apesar de ser facilmente utilizado para medições em serviço, o método A3 pode estar sujeito a falhas devido à presença de harmônicos na tensão, o que gera correntes capacitivas harmônicas que podem interferir na componente resistiva da corrente de fuga. Além disso, como o sinal gerado representa a corrente em uma capacitância linear, o referido método apresenta algumas imprecisões tal qual ocorre no método A2.

2.3.1.4. A4: Compensando a componente capacitiva da corrente de fuga combinando as correntes das três fases

No método A4, não há a necessidade de um sinal de referência de tensão, pois a corrente de fuga e as componentes fundamentais (iguais em magnitude) nas três fases são somadas. Desse modo, a componente capacitiva é anulada e a corrente resultante é composta pela soma dos componentes harmônicos das correntes resistivas das três fases.

Para medições em serviço, a principal desvantagem do método é que as correntes capacitivas das três fases geralmente não são iguais. Outra preocupação é a influência das harmônicas na tensão do sistema, o que resultará em harmônicos na corrente somada.

2.3.2 Método B: Determinação indireta do componente resistivo por meio de análise harmônica da corrente de fuga

2.3.2.1. B1: Análise harmônica de terceira ordem da corrente de fuga

O método consiste no fato de que as componentes harmônicas são provenientes da magnitude da componente resistiva e da curva característica do varistor. Isto é, o conteúdo harmônico é suscetível à variação da tensão e da temperatura do para-raios. A conversão do nível de corrente harmônico para resistivo, quando necessário ser efetuada, depende de informações fornecidas pelo fabricante do para-raios ou de medições no laboratório.

Apesar de ser de fácil uso em campo, a sensibilidade aos harmônicos da tensão no sistema torna-se um empecilho por conta da possibilidade de formação de correntes harmônicas capacitivas.

2.3.2.2. B2: Análise harmônica de terceira ordem com compensação de harmônicos na tensão do sistema

O método segue o mesmo princípio do método B1, mas a sensibilidade a harmônicos na tensão é reduzida ao inserir um sinal compensatório da terceira harmônica da corrente de fuga capacitiva no para-raios. O sinal de corrente de compensação é derivado de uma sonda de campo elétrico posicionada na base do para-raios. Após a escala adequada, a corrente harmônica induzida é subtraída da corrente harmônica total. O resultado é a corrente harmônica gerada pela corrente resistiva não-linear do para-raios. Assim o método torna-se mais viável para a execução em campo.

2.3.2.3. B3: Análise harmônica de primeira ordem da corrente de fuga

O método B3 fundamenta-se na aquisição da componente fundamental da corrente resistiva a partir da filtragem e integração da corrente de fuga. Assim como o método B2, a influência dos harmônicos da tensão é praticamente eliminada ao utilizar apenas os componentes fundamentais de tensão e corrente. A limitação do método ocorre devido a necessidade de obter um sinal de tensão de referência semelhante ao que é aplicado aos terminais do para-raios. Com isso, a precisão depende das mudanças de fase nas tensões e correntes.

2.3.3 Método C: Determinação direta da perda de potência

As perdas dielétricas, ou perda de potência, são expressas em termos da integral do produto entre os valores de tensão e corrente de fuga resistiva, tendo em vista que elas são diretamente proporcionais a essa última.

O método C sofre uma influência quase que desconsiderada dos harmônicos em virtude dos métodos de integração e multiplicação utilizados. Entretanto, assim como nos métodos A1-A3, ele necessita de um sinal de referência da tensão, o que torna a sua medição limitada em situações de serviço; dadas as mudanças de fase nas tensões e correntes, causadas pelas fases adjacentes.

Tabela 2.1. Propriedades dos métodos de medição de corrente de fuga.

Método de medição de corrente de fuga	Nº do método	Sensibilidade do Método			Eficiência no Diagnóstico		Experiência em Serviço
		Harmônicos na tensão	Deslocamento de fase na medição de tensão ou	Corrente superficial	Qualidade da informação	Complexidade de manuseio	
Medição de corrente de fuga total		Baixa	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Extensiva
Medição de corrente de fuga resistiva							
Usando tensão de referência	A1	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Usando capacitor de compensação	A2	Média	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Usando compensação sintética	A3	Média	Alta	Alta	Média	Baixa	Sem avaliação
Usando cancelamento da corrente capacitiva	A4	Alta	Alta	Alta	Baixa	Baixa	Limitada
Análise harmônica da corrente de fuga							
Usando terceira harmônica	B1	Alta	Baixa	Baixa	Média	Baixa	Extensiva

Usando terceira harmônica com compensação	B2	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Extensiva
Usando harmônica de primeira ordem	B3	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Limitada
Medindo as perdas ativas	C	Baixa	Alta	Alta	Média	Alta	Sem avaliação

Fonte: IEC 60099-5, 2000 (Adaptado)

A partir das descrições dos métodos e das avaliações dos mesmos contidas na Tabela 3.1, pode-se notar que os métodos A1, B3 e C, além de necessitarem do sinal de tensão aplicado ao para-raios, são passíveis ao deslocamento de fase durante a medição da corrente ou da tensão, bem como uma alta complexidade de manuseio, média eficiência na obtenção de informação e limitada experiência em serviço.

Os métodos A4 e B1 são suscetíveis a erros durante a medição devido aos harmônicos presentes na tensão. Mas ao contrário do A4, que possui alta sensibilidade ao deslocamento de fases e correntes superficiais, consequentemente, baixo qualidade de informação, o B1 detém baixa sensibilidade aos dois últimos itens mencionados, qualidade média de informação e extensiva experiência em serviço.

Por fim, o método B2 é o que detém o melhor rendimento entre os métodos sugeridos pela IEC 60099-5. Ele não sofre tanta influência dos harmônicos na tensão, deslocamento de fases e corrente superficial. Em vista disso, há uma extensiva experiência em serviço e alta eficiência no diagnóstico, graças a alta qualidade de informação.

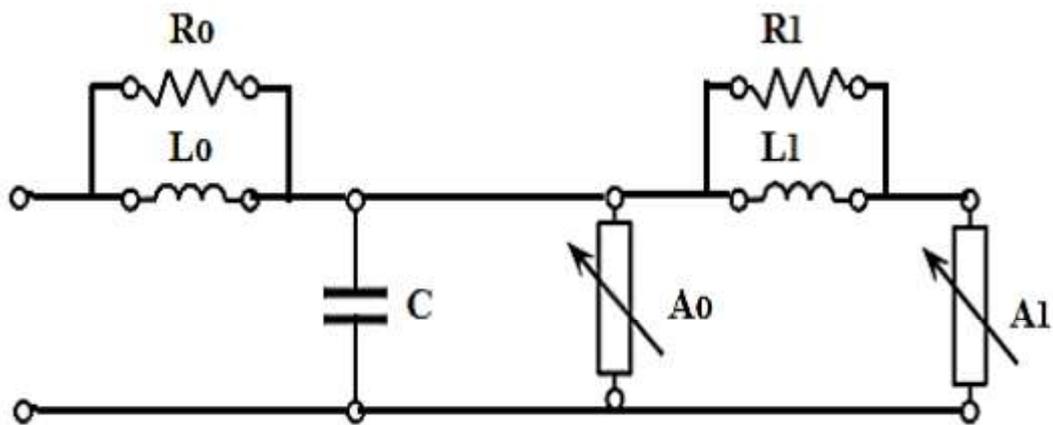
2.4 Modelos de simulação de para-raios

Há diversos modelos de para-raios desenvolvidos por pesquisadores com o intuito de mostrar e explicar o desempenho deste equipamento frente às solicitações de operações. Entre os modelos mais renomados presentes na literatura, são destacados nesse trabalho: IEEE, Pinceti-Gianettoni e Fernandez-Diaz.

2.4.1 IEEE Working Group 3.4.11

O modelo proposto pelo grupo de estudos do IEEE (1992), visto na Figura 2.12 a seguir, é composto por duas resistências não-lineares, A_0 e A_1 , separadas por um filtro R_1-L_1 ; as resistências dos dois filtros têm como função evitar oscilações numéricas durante as simulações computacionais; o indutor, L_0 , representa as características do campo magnético resultante da corrente que flui no corpo do para-raios; o L_2 é responsável por retratar a resposta dinâmica em função da frequência apresentada pelo para-raios; enquanto C é a capacitância presente entre os terminais do para-raios. Este modelo depende unicamente dos dados físicos fornecidos pelo fabricante do equipamento.

Figura 2.12. Modelo elétrico IEEE Working Group 3.4.11

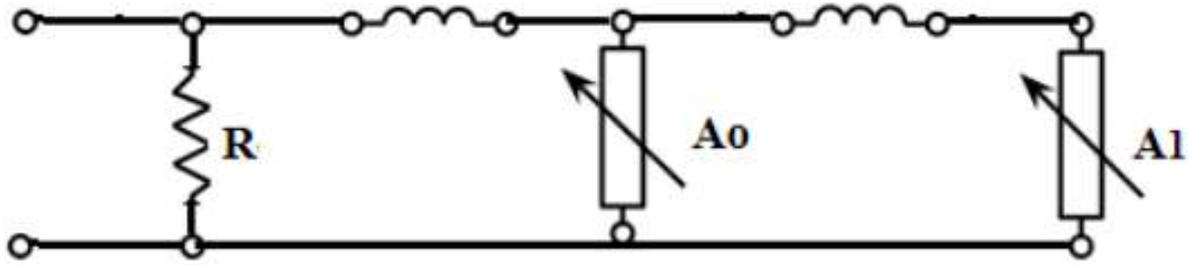


Fonte: IEEE WORKING GROUP, 1992 (Adaptado)

2.4.2 Pinceti-Gianettone

O modelo de Pinceti-Gianettone (1999) é uma modificação do modelo do IEEE, como apresentado na Figura 2.13, de modo que há a remoção da capacitância e os filtros R-L, substituídos por indutâncias. Uma resistência R é inserida na entrada do circuito a fim de evitar possíveis problemas numéricos. Ao contrário do modelo do IEEE, neste circuito, os parâmetros requerem somente os dados provenientes de ensaios elétricos.

Figura 2.13. Modelo elétrico Pinceti-Gianettone

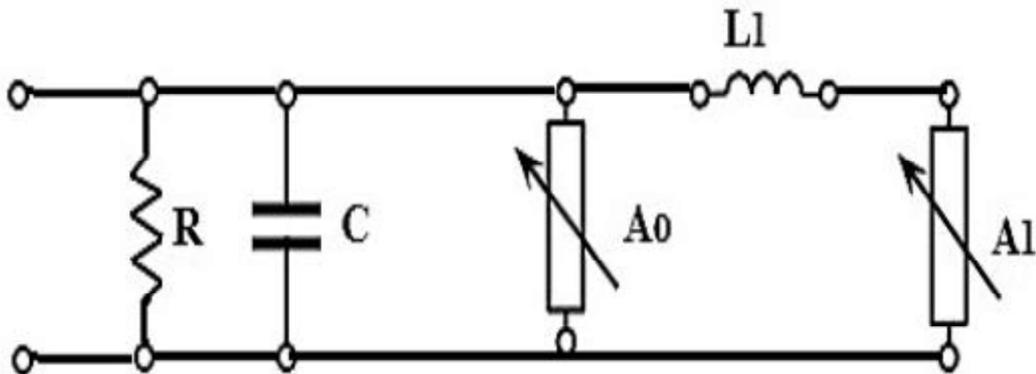


Fonte: Pinceti-Gianettoni, 1999 (Adaptado)

2.4.3 Fernandez-Diaz

O modelo de Fernandez-Diaz (2001), apresentado na Figura 2.14, é mais um baseado no modelo do IEEE, em que a resistência R_0 e L_0 são desprezadas, permanecendo somente a indutância L_1 em série com A_1 e paralelo com A_0 . A indutância L_1 será responsável por reduzir a queda de tensão no para-raios quando este for sujeito a uma descarga atmosférica.

Figura 2.14. Modelo elétrico Fernandez-Diaz



Fonte: Fernandez-Diazx, 2001 (Adaptado)

2.5 Conclusão

Neste capítulo, foram apresentados conceitos básicos e características operacionais dos para-raios de ZnO, com o objetivo de possibilitar o entendimento do trabalho. Foi dada ênfase especial às características elétricas e térmicas, pois juntas definem o estado de operação do para-raios, assim como influenciam na vida útil do equipamento. Do mesmo modo, foi apresentado conceito de corrente de fuga como parâmetro de diagnóstico de possíveis falhas deste equipamento. A partir disso, pode-se concluir que o para-raios formado por discos de ZnO possui melhor operacionalidade que o de SiC. Além disso, notou-se que a corrente de fuga, em

especial a componente resistiva (por possuir caráter dissipativo), é um importante indicador de nível de degradação dos para-raios. Contudo, a maioria dos métodos para medi-la possui diversas restrições quanto às suas aplicabilidades em campo, uma vez que necessitam da medição da tensão de referência ou sofrem influência das mudanças de fase. A exceção fica a cargo do método B2, dado que este possui um melhor rendimento.

3 MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados o para-raios, como objeto desta pesquisa, e os métodos empregados para realização das simulações computacionais. As simulações são realizadas a partir da geometria de um para-raios de classe de tensão de 30 kV, sob quatro cenários: limpo, poluição leve, média e pesada sob uma variação de níveis de tensão aplicada, de 25 kV a 35 kV, aos terminais do equipamento. As análises são realizadas a partir do software COMSOL Multiphysics®, baseado no Método de Elementos Finitos, descrito a seguir.

3.2 Método de Elementos Finitos (MEF)

O Método de Elementos Finitos (MEF) é amplamente utilizado para solucionar, principalmente, equações diferenciais parciais em situações onde a obtenção de soluções analíticas exatas seja mais complexa.

O MEF torna-se vantajoso por não possuir restrições geométricas ou de materiais. Por conta disso, é comumente utilizado na engenharia para soluções e análise de problemas que envolvam campos elétricos ou magnéticos, correntes, transferência de calor, máquinas elétricas etc (XAVIER, 2017). Este método consiste em fazer uma análise matemática por meio da discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original (SADIKU, 2004). Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados.

Para a aplicação do MEF, o modelo a ser simulado deve estar bem caracterizado de acordo com as condições particulares de cada material preservando suas características geométricas e físicas, além das condições de fronteira ou, em alguns casos limite, devem ser bem estabelecidas. A partir disto, o método decompõe a estrutura ou domínio em um número finito de elementos (Florentino, 2015). A união completa de todos os elementos discretizados é conhecida como malha, onde cada elemento desta malha assume as características físicas do domínio contínuo.

O MEF tem sido amplamente empregado e apresenta resultados de fácil visualização e interpretação, independentemente da complexidade do problema analisado. Devido às suas

características de flexibilidade e de estabilidade numérica, pode ser implementado na forma de um sistema computacional de forma consistente e sistemática.

Além de permitir a análise de problemas práticos, o MEF diminui os custos de projeto, pois permite a simulação computacional de vários fenômenos físicos e seus efeitos antes da construção de um protótipo do equipamento, proporcionando, assim, a viabilidade e durabilidade desses equipamentos, o que acentua a confiabilidade desses produtos.

Atualmente, algoritmos sofisticados adaptam automaticamente o número, tipo, tamanho e disposição dos elementos para melhor solução. Um exemplo de aplicação seria a utilização do Software COMSOL Multiphysics®, que por sua vez, permite a utilização do MEF necessário para a modelagem apresentada neste trabalho.

Tighilt e Bayadi (2007) desenvolveram um trabalho no qual era analisada a influência da poluição na distribuição de tensão e de campo no para-raios de ZnO utilizando MEF. Os autores notaram que a camada de poluição aplicada ao equipamento resultou em uma distribuição não uniforme das grandezas mencionada, de modo que se destaca um intenso aumento de níveis de tensão tanto nos varistores quanto no invólucro de para-raios.

O MEF também pode ser utilizado para calcular a indutância ao fazer uso do acoplamento de fluxo magnético e capacitância para diversas configurações de linha de transmissão (ILLIAS; CHEN; LEWIN, 2011). Os resultados obtidos mostram a praticidade de associar o MEF a outros métodos analíticos.

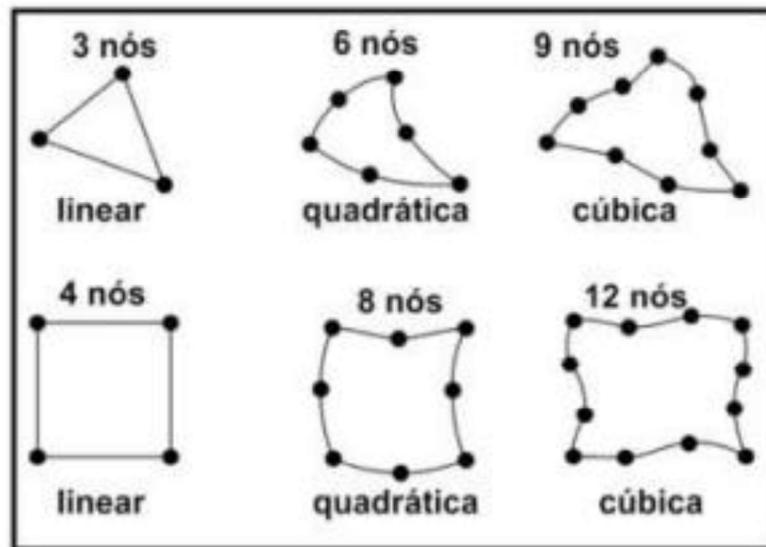
Em 2016, Narul Latiff simulou a variação de parâmetros na geometria de um para-raios e identificaram, por meio de Método de Elementos Finitos, que a largura da pastilha de ZnO afeta, significativamente, a distribuição de temperatura no corpo do para-raios, o mesmo não ocorreu quando outros parâmetros foram alterados (LATIFF; ILLIAS; BAKAR, 2016). A mesma autora, ao utilizar a mesma metodologia, em outro trabalho, constatou que, quanto maior era o raio do ZnO, menor era a corrente de fuga medida no equipamento, uma vez que a seção transversal aumenta (LATIFF et al, 2021).

3.2.1 Modelagem via MEF

A solução de um problema utilizando o Método dos Elementos Finitos é um processo que consiste em quatro etapas: a discretização, a derivação das equações que regem os fenômenos estudados de um elemento, determinação das equações matriciais que definem as propriedades dos elementos individuais na região da solução e a solução do sistema de equações. A

discretização é a subdivisão do domínio original em uma série de subdomínios menores, chamados de elementos, os quais podem ser qualquer forma geométrica: como triângulos, retângulo, quadriláteros, pentágonos etc. Cada elemento é interligado por nós e a união destes é denominada malha. A Figura 3.1 exibe os elementos finitos mais usuais.

Figura 3.1. Elementos finitos usuais



Fonte: BASTOS; SADOWSKI, 2003.

Após a criação da malha, cada elemento é analisado individualmente através das equações que modelam cada caso em análise. Para se obter as propriedades do sistema como um todo, é necessário combinar as equações matriciais de cada elemento de tal maneira que a matriz resultante represente o comportamento do domínio a ser estudado.

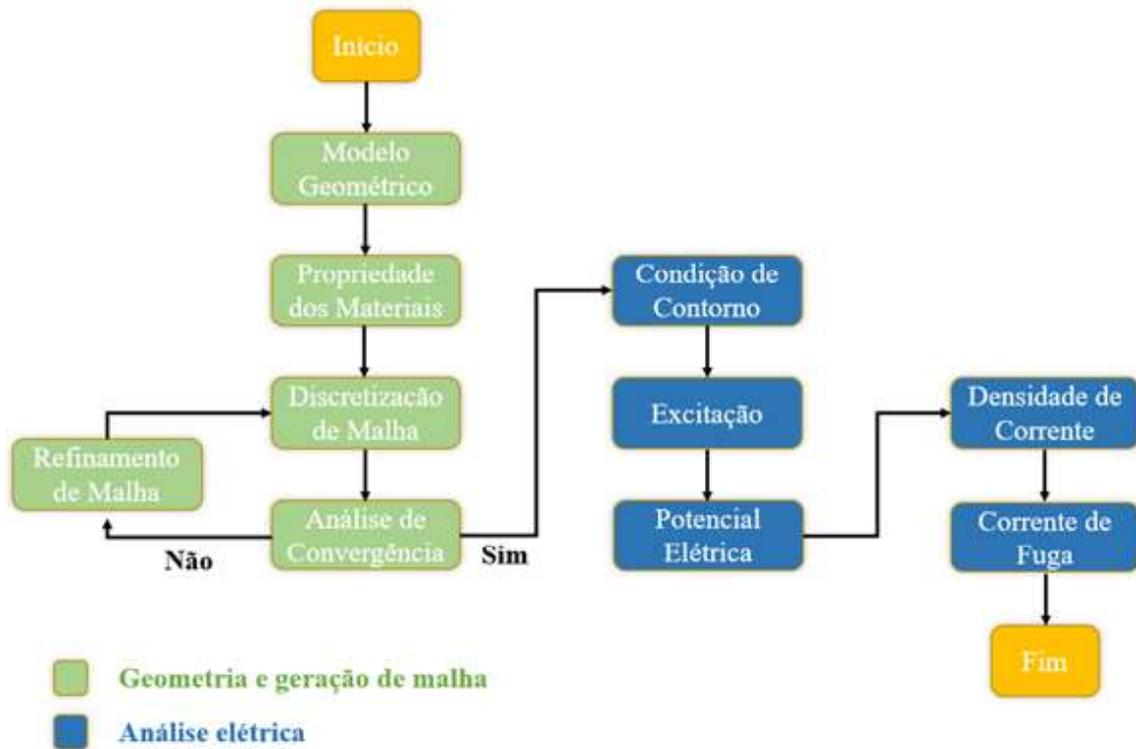
3.3 Metodologia

A metodologia empregada no presente trabalho consiste, inicialmente, na aferição das características geométricas do para-raios de ZnO, classe de tensão 30 kV, seguida da modelagem e simulação do mesmo no software baseado em MEF, o COMSOL *Multiphysics*®, a fim de analisar o comportamento elétrico do equipamento a partir da medição do potencial elétrico, densidade de corrente e corrente de fuga frente à quatro cenários: limpo, também chamado de caso base, e poluído em níveis de poluição leve, médio e pesado, conforme Volat (2013).

Em todos os cenários citados, o modelo do para-raios também foi sujeito a uma variação de tensão de pico ideal e sem harmônicos, com passo de 1 kV, entre 25 kV e 35 kV. Esta

metodologia foi empregada com o intuito de avaliar se a corrente de fuga é sensível à elevação da tensão aplicada. A Figura 3.2 ilustra o fluxograma seguido para a modelagem do para-raios, a qual está dividida em duas categorias: geometria/geração de malha e análise elétrica.

Figura 3.2. Fluxograma de modelagem



Fonte: Autora

3.4 Desenvolvimento do Modelo

O modelo desenvolvido para as simulações foi baseado em um para-raios de ZnO, classe de tensão de 30 kV, pertencente ao LEAT. O equipamento pode ser visto na Figura 3.3. As dimensões e os parâmetros do mesmo são mostrados na Tabela 3.1.

Figura 3.3. Para-raios de ZnO de 30 kV_{rms}

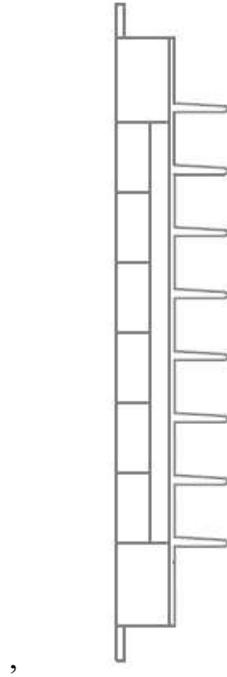
Fonte: Autora

Tabela 3.1. Propriedades dos métodos de medição de corrente de fuga.

Características	Dado
Tensão Nominal	30 kV _{rms}
Tensão de Operação Contínua	24,4 kV _{rms}
Corrente Nominal de Descarga	10 kA
Distância de escoamento	660 mm
Altura	300 mm
Invólucro	Silicone
Número de saias	8

Para o desenho do modelo, utilizou-se o software AutoCAD®, conforme mostrado na Figura 3.4. O modelo foi desenvolvido em 2D no MEF devido ao fato de o equipamento possuir simetria cilíndrica. Por conta da simetria, os esforços computacionais necessários para o processamento são menores.

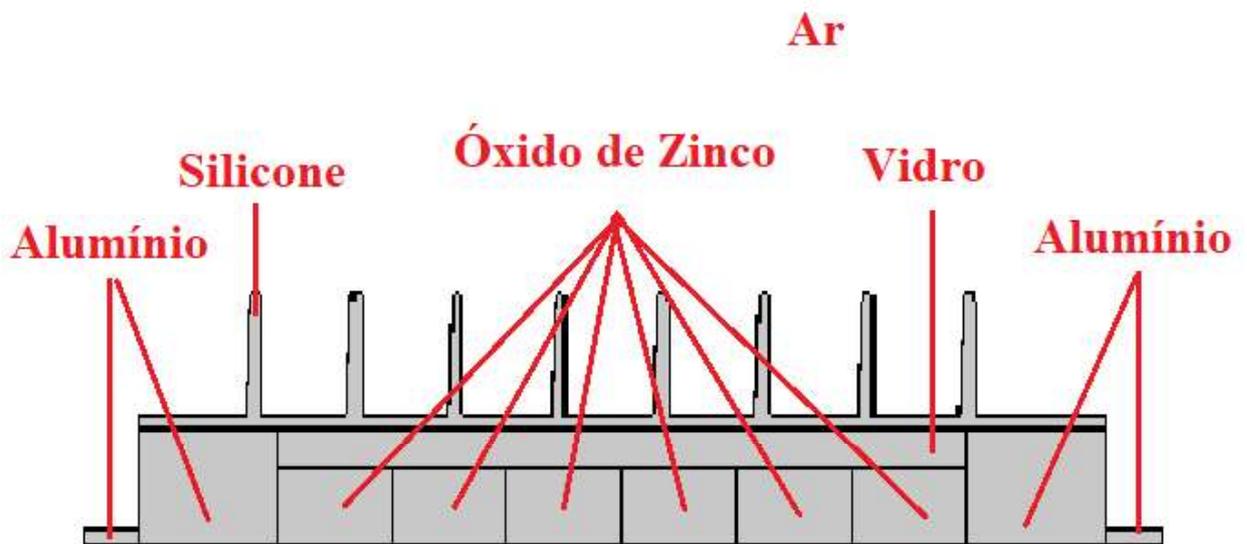
Figura 3.4. Geometria do para-raios criado no AutoCAD® 2D



Fonte: Autora

A geometria modelada é composta por seis discos de ZnO; uma camada de vidro, blocos de alumínio nas extremidades internas e externas. O isolamento do para-raios é formado de silicone, com uma espessura de 3 mm. Toda a estrutura do equipamento é envolvida por uma camada de ar, como pode ser visto na Figura 3.5. As medidas de cada componente são apresentadas na Tabela 3.2.

Figura 3.5. Estrutura geométrica do para-raios



Fonte: Autora

Tabela 3.2. Dimensões dos componentes da geometria do para-raios

Material	Altura (mm)	Largura (mm)
Disco de ZnO	17	35
Camada de Vidro	210	9
Blocos de Alumínio Interno	42	26
Blocos de alumínio Externo	17	4

Fonte: Autora

3.5 Atribuições dos Parâmetros Eletromagnéticos Constitutivos na Modelagem

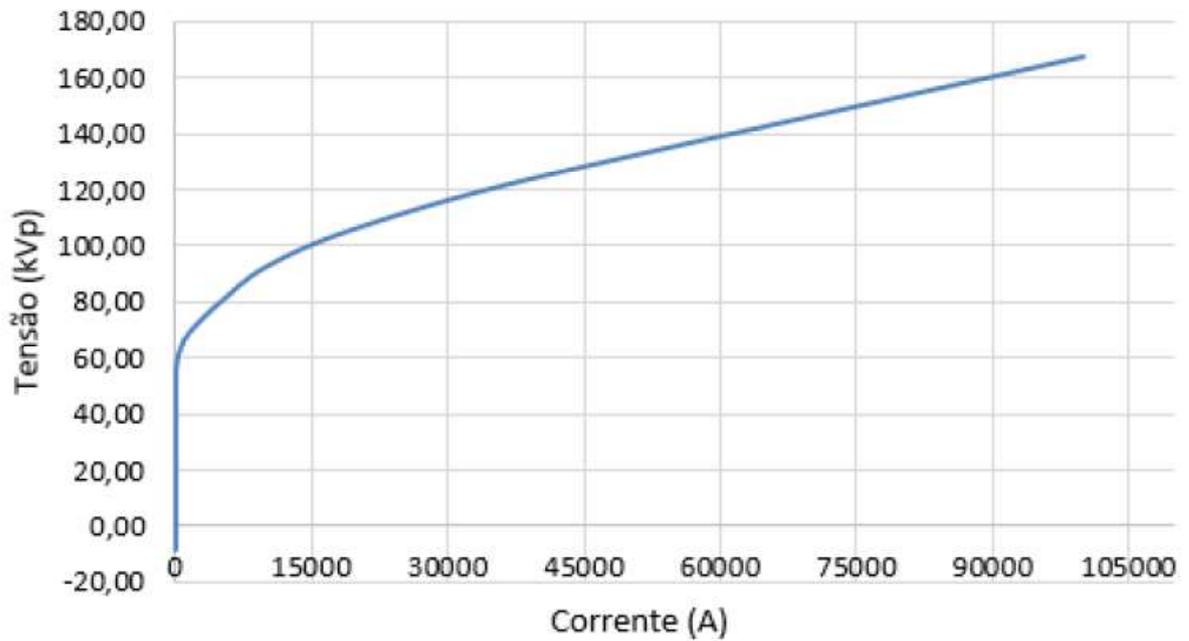
Após a finalização da modelagem geométrica do para-raios, é necessário inserir os parâmetros eletromagnéticos constitutivos que caracterizam cada material utilizado, condutividade (σ) e permissividade relativa (ϵ_r), como é mostrado na Tabela 3.3 a seguir. Dado que o disco de ZnO possuem características não-lineares, a condutividade elétrica é um parâmetro variável, sendo obtido, pois, de acordo com cada ponto da curva característica V-I mostrada na Figura 3.6.

Tabela 3.3. Permissividade e condutividade elétrica dos materiais

Material	Permissividade relativa - ϵ_r	Condutividade elétrica - σ (S/m)
Ar ^(A)	1	0
Silicone ^(A)	11.7	1×10^{-12}
Alumínio ^(A)	1	3.77×10^7
Vidro ^(A)	4.2	1×10^{-14}
ZnO	500	Curva V-I

Fonte: (A) Latiff et al (2018)

Figura 3.6. Curva característica V-I do ZnO



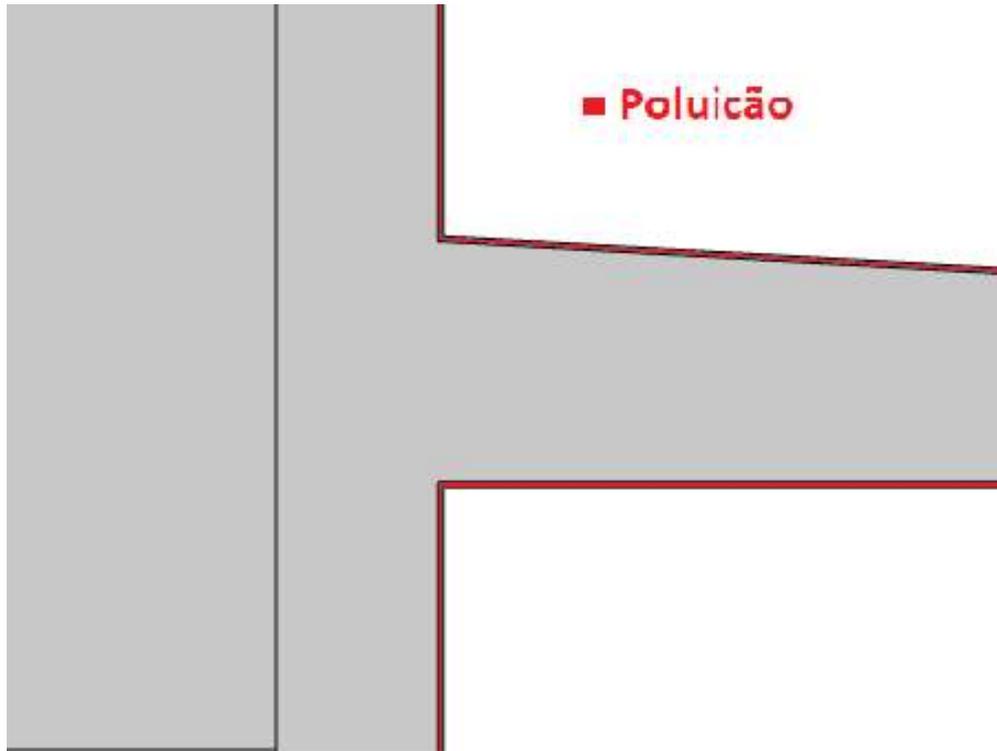
Fonte: Autora

3.6 Variação de Poluição

A poluição superficial é uma das principais causas de degradação das características isolantes do revestimento externo dos para-raios, devido à ocorrência de descargas externas. A presença de uma camada de poluição no para-raios aumenta a condutividade deste, o que resulta no aumento da corrente de fuga, degradação, temperatura e início de descargas parciais.

Para representar a poluição no equipamento simulado, uma camada de 0,1 mm sobre a superfície de todo o para-raios foi aplicada. As geometrias para ambos os cenários são mostradas na Figura 3.7.

Figura 3.7. Camada de poluição sobre a superfície do para-raios



Fonte: Autora

Para que um modelo computacional apresente um comportamento mais próximo ao realístico no quesito poluição - a qual estão sujeitos à região, ao tempo de exposição etc -, é necessária a variação das características elétricas da camada poluente, tais como a permissividade e a condutividade elétrica.

Neste trabalho, foram modelados e avaliados três níveis de poluição: leve, médio e pesado, os quais podem representar partículas do terreno em suspensão, resíduo de indústrias, depósito de material biológico (limo e fezes de aves, por exemplo), partículas de sal (particularmente em regiões litorâneas), etc. Na modelagem de cada nível de poluição foram alterados valores de condutividade a uma razão de 10^{-3} . Os valores de condutividade e permissividade utilizados são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Condutividade e permissividade elétrica das poluições

Material	Permissividade relativa - ϵ_r	Condutividade elétrica - σ (S/m)
Poluição Leve ^(B)	15	1×10^{-9}
Poluição Média ^(B)	15	1×10^{-6}
Poluição Pesada ^(B)	15	1×10^{-3}

Fonte: (B) Volat (2013)

3.7 Condições de Contorno

Após as atribuições dos parâmetros eletromagnéticos constitutivos de cada material ao respectivo domínio da geometria do para-raios, foram aplicadas as condições de contorno em cada limite na geometria. A Figura 3.8 ilustra os limites atribuídos no modelo e a Tabela 3.5 descreve as condições desses limites. O campo elétrico, E , e o deslocamento do gradiente da tensão, ∇V , são obtidos pela Equação 3.1 e a condição de contorno do deslocamento elétrico da geometria é obtido pela Equação 3.2

$$E = -\nabla V, \quad (3.1)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (3.2)$$

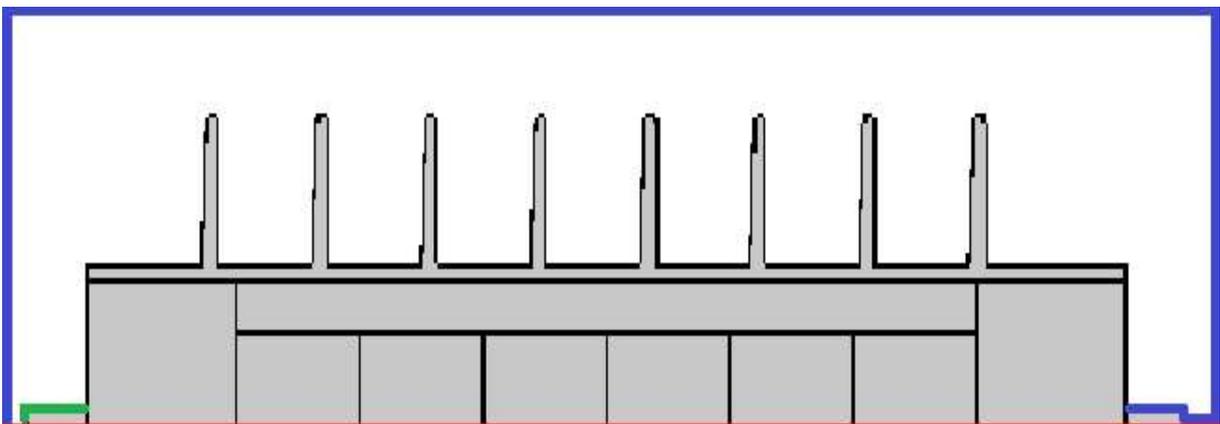
onde D representa a densidade de fluxo elétrico. ε_0 é a permissividade do vácuo e ε_r , a permissividade relativa do material.

No terminal superior do para-raios, a tensão de 25 kV a 35 kV, com passo de 1 kV, dependente do tempo, a uma frequência de 60 Hz, enquanto a parte inferior foi aterrada, com um potencial elétrico igual a zero. Todos os limites interiores da geometria foram definidos como continuidade, expressa pela Equação 3.3, onde J é a densidade de corrente elétrica. O lado externo do para-raios foi delimitado pelo domínio de ar esférico, de modo que foi atribuído a uma condição apresentada pela Equação 3.4

$$n \cdot J = 0, \quad (3.3)$$

$$n_2 (J_1 - J_2) = 0. \quad (3.4)$$

Figura 3.8. Limites de contorno da geometria



Fonte: Autora

Tabela 3.5. Condições de contorno

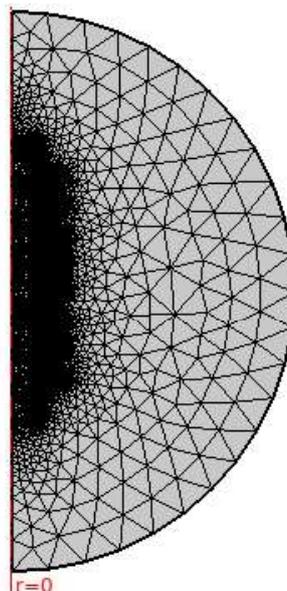
Linha de contorno	Condições de contorno	Descrição
Azul	Aterramento	Terminal de aterramento e limite de ar
Verde	Terminal	Contorno de tensão aplicada
Preto	Continuidade	Contornos internos e externos
Vermelho	Assimetria Axial	Contorno ao longo do eixo $r = 0$

Fonte: Autora

3.8 Malha de Discretização

Após a determinação dos materiais e das linhas de contorno, foi aplicada a malha de discretização à geometria. O elemento escolhido para a discretização dos domínios da geometria foi o triângulo. A fim de obter uma melhor acurácia nos resultados da simulação, optou-se por utilizar uma malha extremamente fina na geometria do para-raios e normal na camada de ar, como é mostrado na Figura 3.9. O número de elementos utilizados no modelo, tanto nos domínios de cada material e nos limites de contorno, e a estatística destes são mostrados na Tabela 3.6.

Figura 3.9. Malha de discretização do para-raios



Fonte: Autora

Tabela 3.6. Estatística dos elementos da malha da geometria

Tipo de geometria	Tipo de elemento	Número de elementos	Estatística do elemento
Ar	Triangular	6726	Vértices da malha: 3583
Silicone	Triangular	915	Vértices da malha: 1380
Vidro	Triangular	221	Vértices da malha: 327
ZnO	Triangular	414	Vértices da malha: 708
Alumínio	Triangular	294	Vértices da malha: 485
Limites de Contorno	Borda	10841	Vértices da malha: 10841

Fonte: Autora

Cenário Atual	Cenário Anterior	Aumento (%)
Poluição leve	Limpo	49,6
	Limpo	53,54
Poluição média	Poluição leve	2,63
	Limpo	55,11
Poluição Alta	Poluição média	1,08

3.9 Equação da Corrente Elétrica

A geometria do para-raios foi simulada por meio do uso das Equações Diferenciais Parciais (EDP). No Comsol, o módulo *electric current* obtém a distribuição do campo elétrico e da densidade de corrente. A corrente elétrica é calculada por meio da integração de superfície da densidade de corrente. As equações utilizadas pelo software de Método de Elementos Finitos são dadas pelas Equações 3.5 e 3.6

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_j \quad (3.5)$$

$$\mathbf{J} = \left(\sigma + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial}{\partial t} \right) \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (3.6)$$

de modo que Q_j é a fonte de corrente \mathbf{J}_e é a densidade de corrente gerada externamente.

A solução do problema é dada por meio das equações de Maxwell, apresentada em 3.7.

$$\nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0 \quad (3.7)$$

Ao aplicar a suposição quase-estática, a Equação 3.5 torna-se a Equação 3.8.

$$\nabla \times E = 0 \quad (3.8)$$

3.10 Conclusão

Esta seção descreveu os conceitos de Método de Elementos Finitos. A partir das informações apresentadas, depreende-se que ele é um método matemático altamente vantajoso tendo em vista que não possui limitações geométricas e de materiais. Ademais, o MEF permite a simulação computacional de vários fenômenos físicos antes da construção de um protótipo do equipamento, sendo capaz gerar distribuições de campo elétrico e de densidade de corrente. Por conta da sua aplicabilidade, foi modelado um para-raios de 30 kV em quatro cenários: limpo, três níveis de poluição (baixo, médio e pesado), em um software computacional baseado em Método de Elementos Finitos, o Comsol. A modelagem do equipamento foi realizada em 2D, uma vez que o para-raios possui simetria cilíndrica e, desse modo, requer menos esforços computacionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

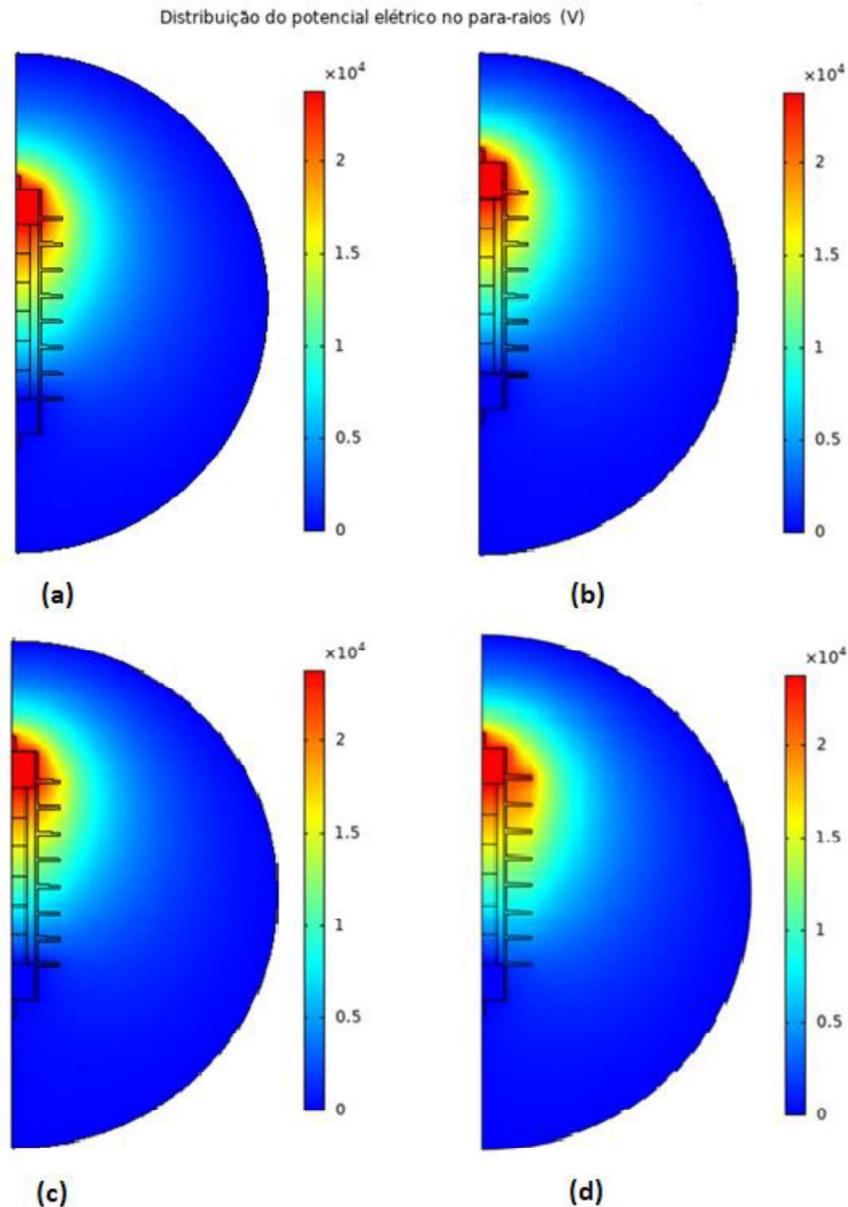
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nesse trabalho, bem como as discussões sobre eles. Os resultados incluem a corrente de fuga, a distribuição de potencial elétrico e o campo elétrico no modelo do para-raios quando este se encontra limpo e sujeito a variáveis de níveis de tensão aplicada aos seus terminais e poluição sobre a sua superfície polimérica.

4.2 Potencial Elétrico

As distribuições do potencial elétrico puderam ser determinadas a partir do modelo de método de elemento finitos. A Figura 4.1 mostra a distribuição do potencial elétrico, em 2D, quando é aplicada uma tensão de 25 kV ao terminal do para-raios em condições limpa (Figura 4.1 (a)) e sob os três níveis de poluição: leve, média e pesada, representadas, respectivamente, pelas Figuras 4.1 (b), (c) e (d).

Nota-se a concentração do potencial elétrico no condutor superior do para-raios devido ao fato de que nesse ponto é onde ocorre a excitação com alta tensão no equipamento. Além disso, pode-se observar que à medida que a condutividade da camada de poluição é aumentada para 1×10^{-9} , 1×10^{-6} e 1×10^{-3} S/m, há uma maior concentração de potencial elétrico no corpo para-raios, em especial nos discos de ZnO e nas saias superiores.

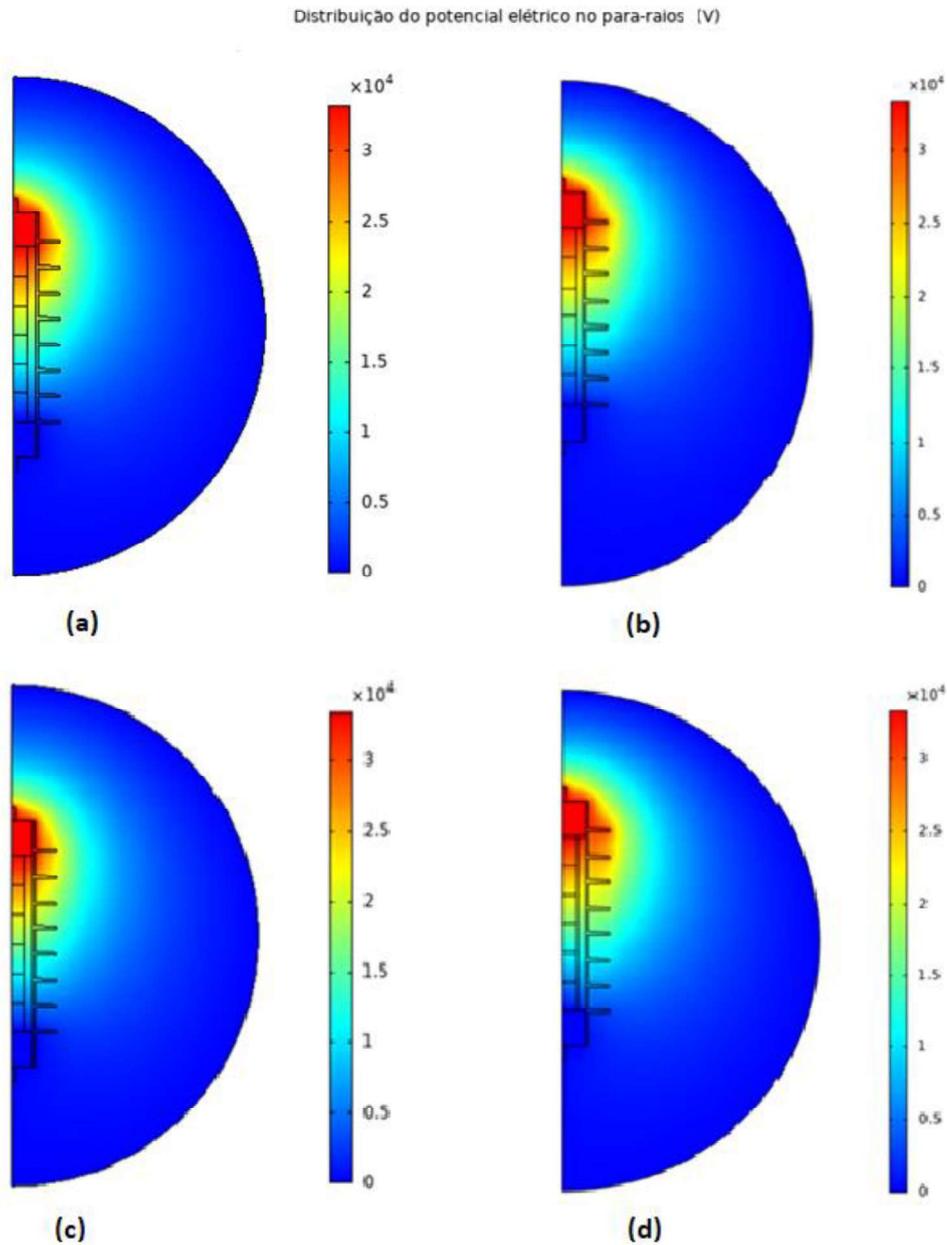
Figura 4.1. Distribuição de potencial elétrico em 2D com 25 kV aplicado ao para-raios
 (a) Para-raios limpo, (b) para-raios sub poluição leve, (c) para-raios sob poluição média e
 (d) para-raios sob poluição pesada.



Fonte: Autora

Da mesma forma, a Figura 4.2 mostra as distribuições do potencial elétrico resultantes de uma tensão de excitação de 35 kV para os 4 cenários mencionados. Assim como ocorre para a tensão de 25 kV, na excitação de 35 kV há uma maior concentração do potencial elétrico no para-raios principalmente ele se encontra sob uma camada de poluição. Pode-se observar na Figura 4.2 (d), no cenário com a camada de poluição de condutividade igual a 1×10^{-3} S/m, uma intensidade de potencial elétrico maior que 20 kV nas saias superiores.

Figura 4.2. Distribuição de potencial elétrico, em 2D, com 35 kV aplicado ao para-raios
 (a) Para-raios limpo, (b) para-raios sub poluição leve, (c) para-raios sob poluição média e
 (d) para-raios sob poluição pesada.



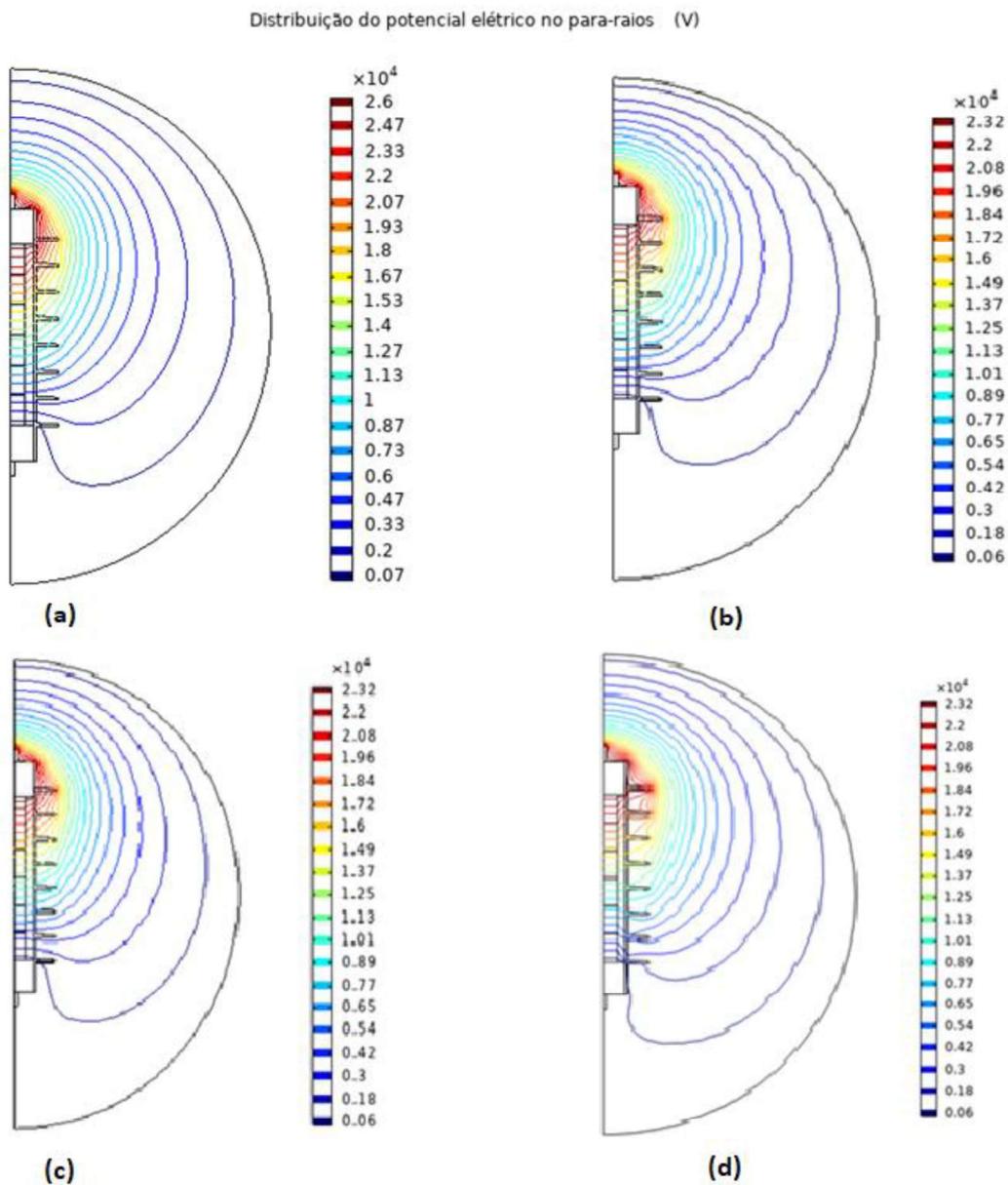
Fonte: Autora

A Figuras 4.3 e 4.4 mostram as distribuições das linhas de potencial elétrico com tensões de 25 e 35 kV, respectivamente, aplicadas ao terminal do para-raios limpo e sob poluições leve, média e pesada. Nota-se uma uniformidade nos para-raios limpos. Contudo, com o aumento da tensão de excitação e da condutividade na camada de poluição, a distribuição das linhas de potencial se torna disforme e é igualmente evidente a concentração de linhas nas saias do para-

raios nos casos de poluição. Esse comportamento ocorre, pois, conforme a poluição aumenta, a condutividade na superfície do para-raios também aumenta. Em geral, a camada externa do para-raios possui uma resistência muito alta, o que contribui para a distribuição do potencial linear ao longo do para-raios. Mas quando esta camada é contaminada, ela passa a ser condutiva, o que proporciona a distribuição de tensão desigual no interior do dispositivo (varistores de ZnO) e exterior (camada de poluição) (TIGHILT; BAYADI, 2007)

Figura 4.3. Distribuição das linhas de potencial elétrico, em 2D, com 25 kV aplicado ao para-raios

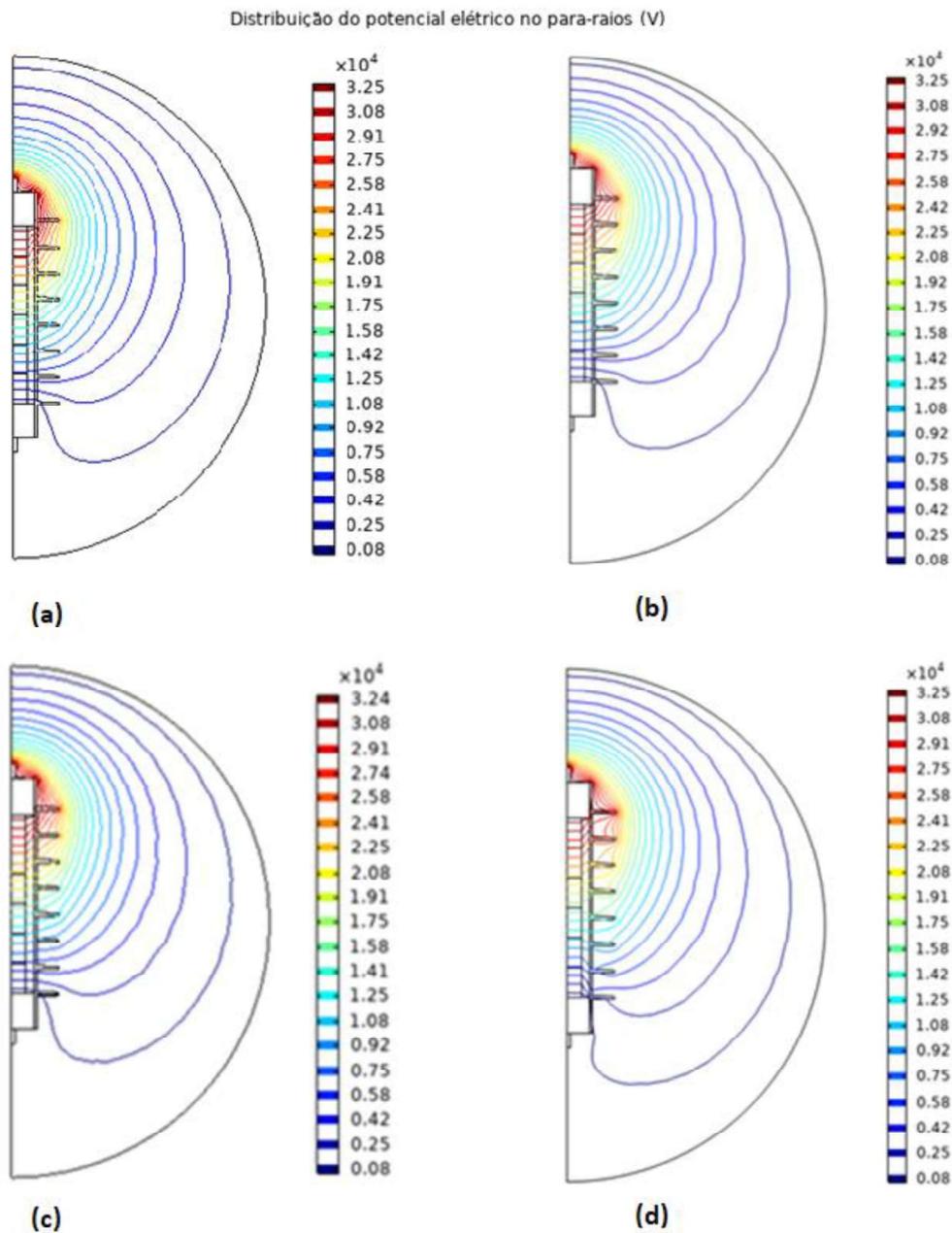
- (a) Para-raios limpo, (b) para-raios sub poluição leve, (c) para-raios sob poluição média e (d) para-raios sob poluição pesada.



Fonte: Autora

Figura 4.4. Distribuição das linhas de potencial eléctrico, em 2D, com 35 kV aplicado ao para-raios

- (a) Para-raios limpo, (b) para-raios sub poluição leve, (c) para-raios sob poluição média e (d) para-raios sob poluição pesada.



Fonte: Autora

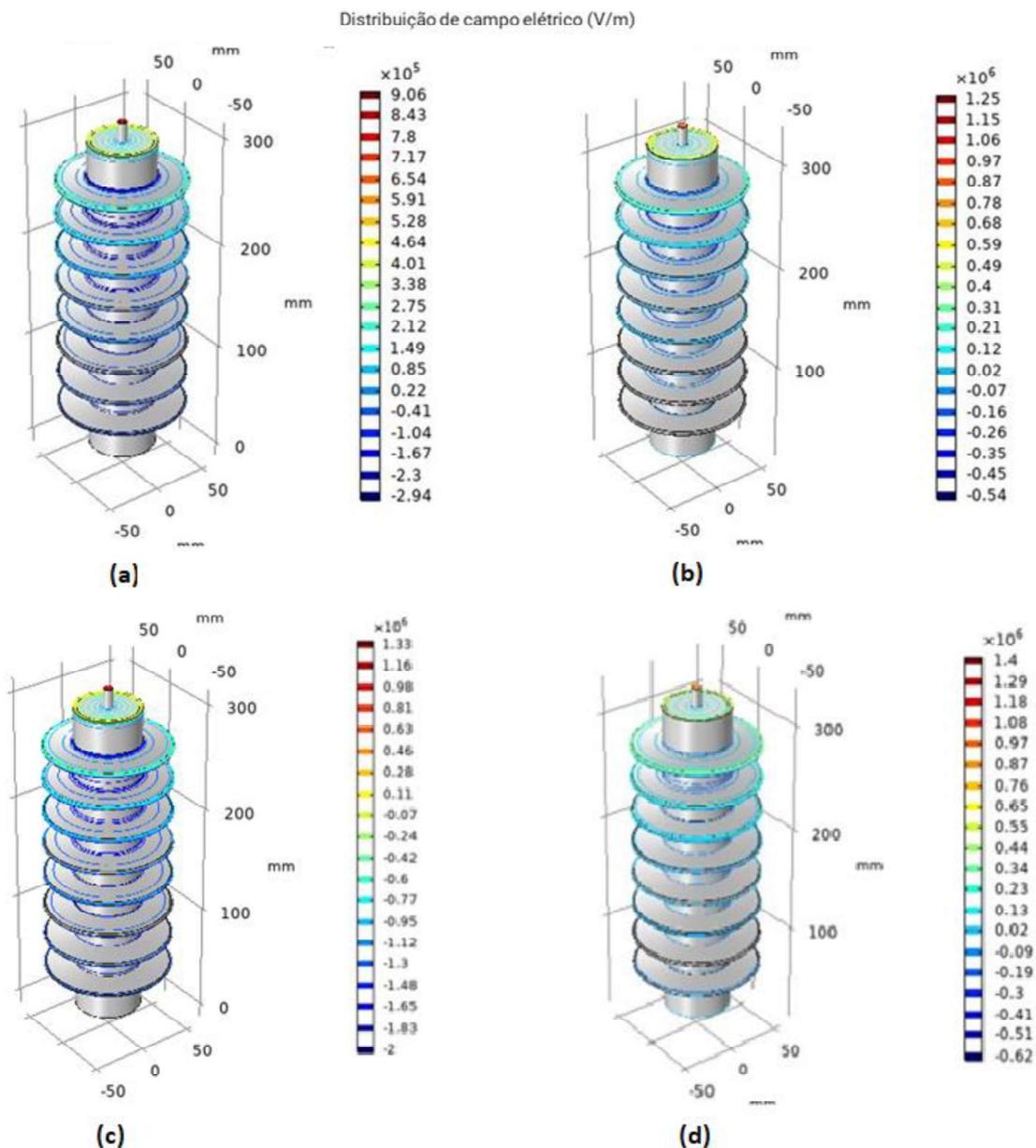
4.3 Campo Eléctrico

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 ilustram as linhas de campo eléctrico distribuídas no para-raios quando este está sujeito às amplitudes de tensão de 25 e 35 kV, respectivamente. Pode-se notar

que, por conta da distribuição do campo elétrico, a maior concentração de potencial elétrico (vide Equação 3.1) está localizada na parte superior do para-raios; este cenário ocorre devido à alta tensão aplicada nos terminais do dispositivo. Observa-se que a intensidade do campo elétrico reduz em direção ao condutor inferior aterrado; essa é uma condição que garante ao para-raios de retomar o seu estado de operação estável (ILLIAS et al, 2014).

Figura 4.5. Distribuição de campo elétrico em 3D no para-raios com poluição leve com 25 kV aplicado ao seu terminal

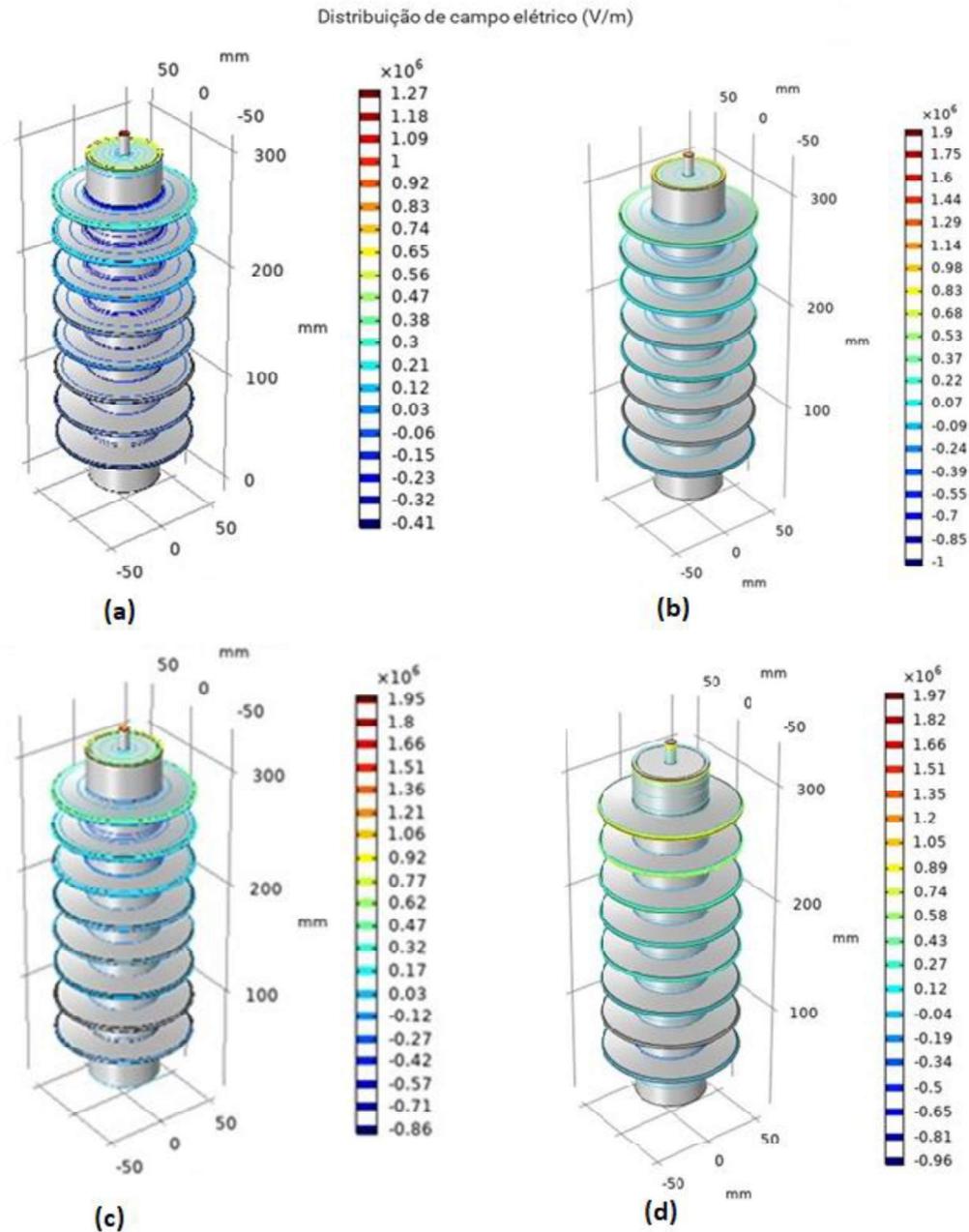
(a) Para-raios limpo, (b) para-raios sub poluição leve, (c) para-raios sob poluição média e (d) para-raios sob poluição pesada.



Fonte: Autora

Figura 4.6. Distribuição de campo elétrico em 3D no para-raios com poluição leve com 35 kV aplicado ao seu terminal

(a) Para-raios limpo, (b) para-raios sub poluição leve, (c) para-raios sob poluição média e (d) para-raios sob poluição pesada.



Fonte: Autora

A Figura 4.5 (b) e a Figura 4.6 (b) mostram as linhas de campo elétrico distribuídas no para-raios com poluição leve com 25 e 35 kV de tensão aplicada ao terminal do dispositivo, onde nota-se um aumento de, aproximadamente, 38% e 49,6%, respectivamente, em relação ao para-raios limpo.

Quando comparadas as distribuições das linhas de campo elétrico da poluição média (ver Figura 4.5 (c) e Figura 4.6 (c)) com as do caso limpo e poluição leve, constata-se um aumento de, aproximadamente, 49% para o caso limpo com e 8% em relação à poluição leve com 25kV de excitação. Para a excitação de 30 kV, o aumento foi de 49,61% em relação ao para-raios limpo e 2,63% ao para-raios com poluição leve.

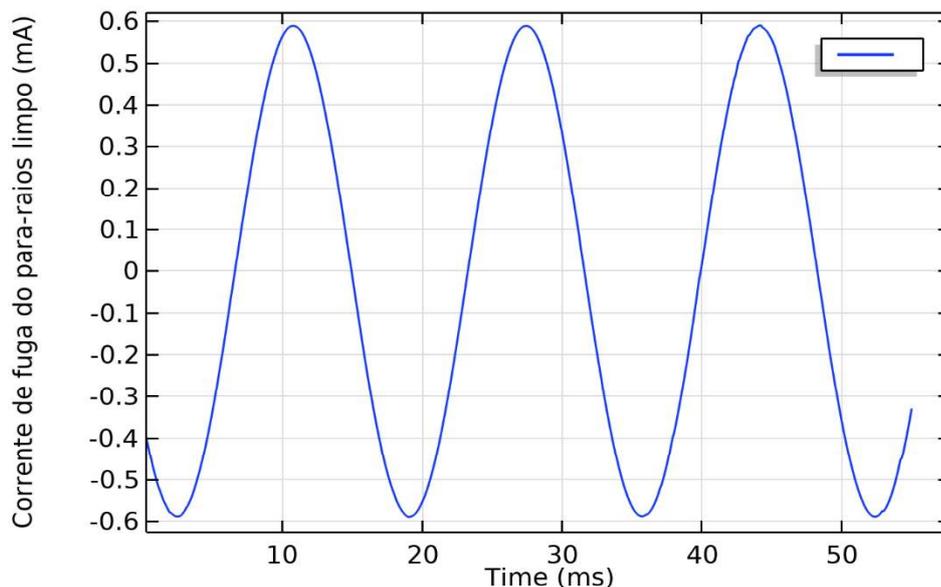
A partir das Figuras 4.5. (d) e 4.6 (d) mostradas, nota-se que para a excitação de 25 kV a variação da distribuição do campo elétrico, para a poluição pesada, em relação ao para-raios limpo foi de 54,53% e 3,7% ao para-raios com poluição média. Para a excitação de 35 kV, o aumento foi de 55,12% em comparação ao para-raios limpo e 1,03% ao com poluição média.

O campo elétrico é mais intenso ao redor do para-raios poluído em comparação do para-raios limpo, sendo notavelmente mais elevado próximo às saias do supressor, o que pode resultar em grande risco de descargas parciais no isolamento externo. Essa ocorrência pode acarretar a deterioração do material isolante e, conseqüentemente, na falha do para-raios.

4.3.1 Corrente de fuga

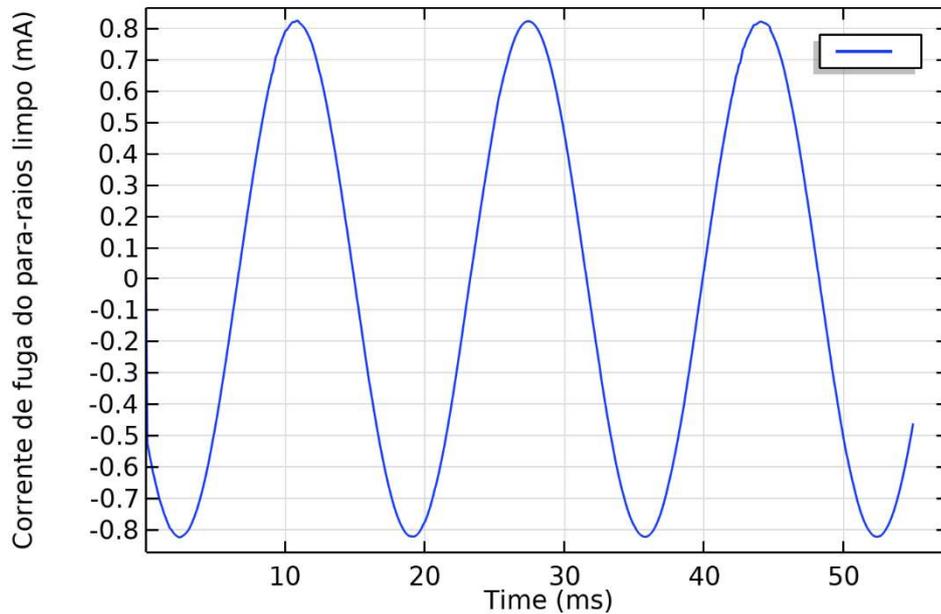
A forma de onda da corrente de fuga do para-raios limpo sujeito às amplitudes de tensão iguais à 25 kV e 35 kV, adquirida por meio da simulação, pode ser vista na Figura 4.7 e Figura 4.8, de modo que os valores de pico para ambos os cenários foram, respectivamente, 0,5897 mA e 0,8241 mA.

Figura 4.7. Corrente de fuga do para-raios limpo resultante da aplicação da tensão com amplitude de 25 kV



Fonte: Autora

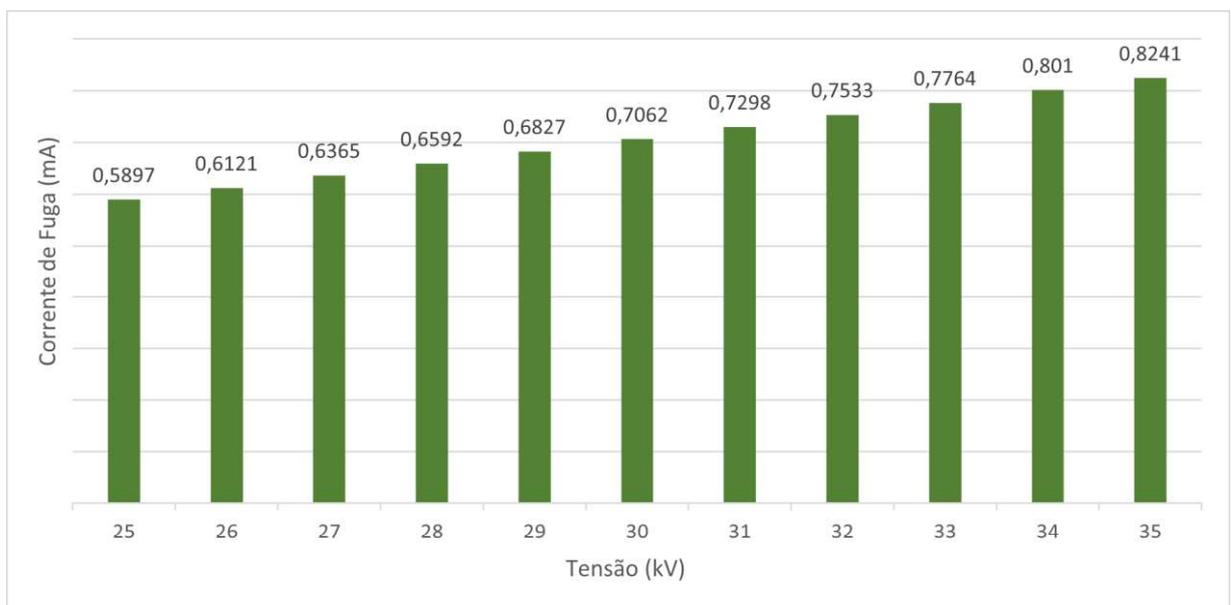
Figura 4.8. Corrente de fuga do para-raios limpo resultante da aplicação da tensão com amplitude de 35 kV



Fonte: Autora

Os valores de pico da corrente de fuga do para-raios limpo, com variação de tensão de 25 a 35 kV, com passo de 1 kV, podem ser vistos na Figura 4.9. Nota-se o aumento da corrente à medida que a amplitude da tensão aplicada aumenta. Esse comportamento ocorre devido à proporcionalidade direta entre a tensão e a corrente, a qual é resultado de uma impedância capacitiva equivalente (LATIFF, 2018).

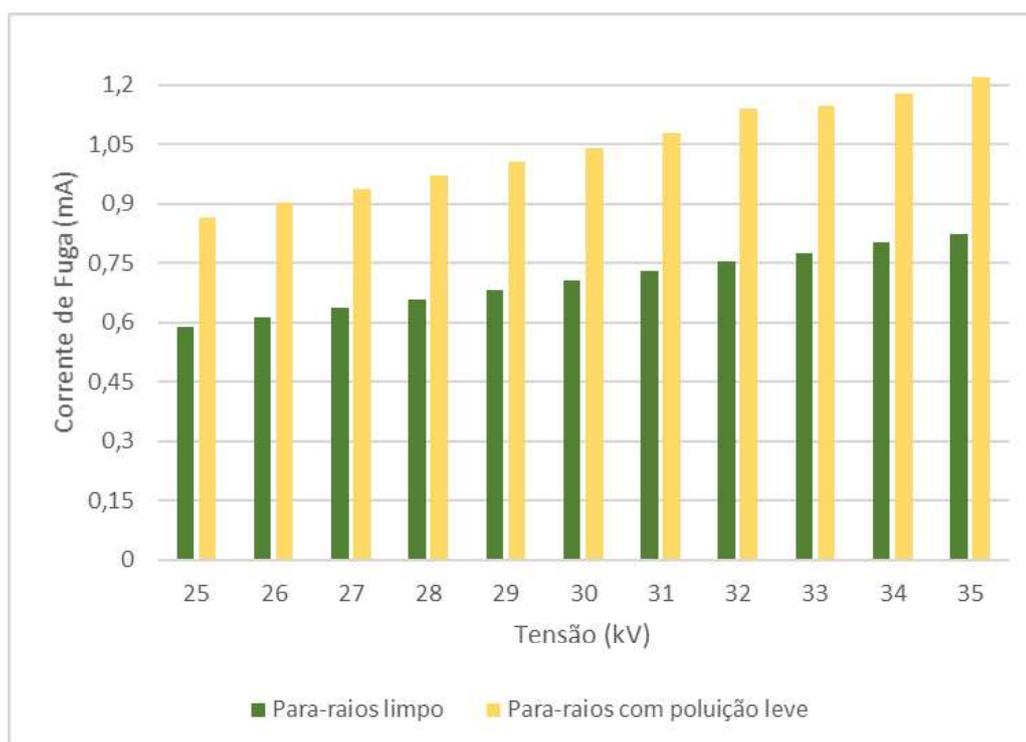
Figura 4.9. Corrente de Fuga no para-raios limpo



Fonte: Autora

A Figura 4.10 ilustra a evolução da corrente de fuga medida no para-raios com poluição leve em onze cenários de níveis de tensão aplicada ao seu terminal. Para todos os cenários de poluição, não houve deformação nas curvas de corrente devido ao fato de que as curvas de tensão de excitação utilizadas não possuem harmônicos.

Figura 4.10. Corrente de Fuga no para-raios sob poluição leve

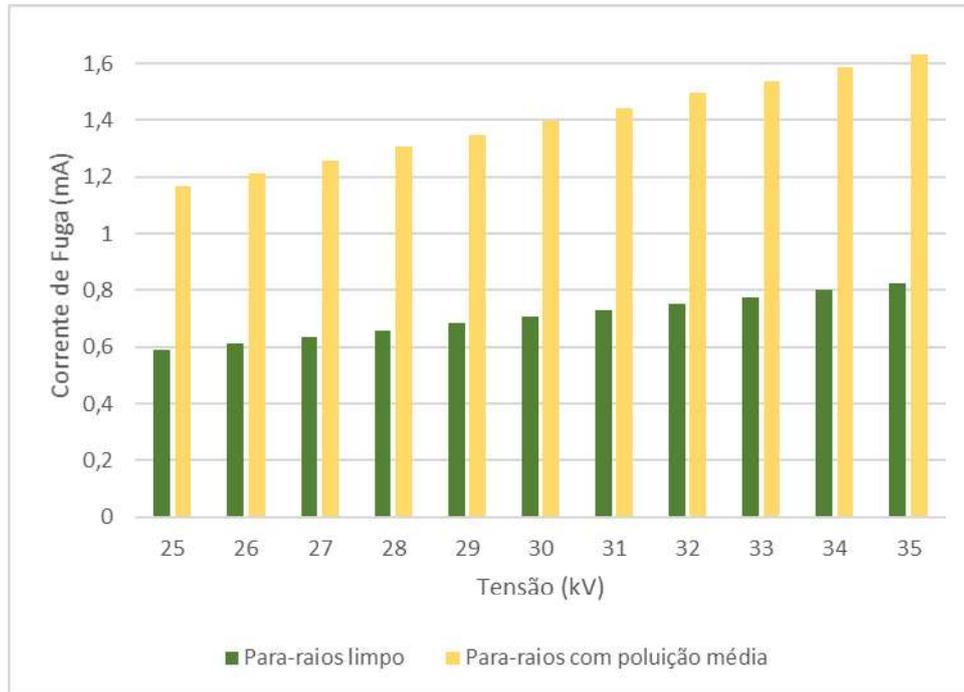


Fonte: Autora

Salienta-se que para uma tensão de 25 kV, por exemplo, um aumento da corrente de fuga foi de 46,74% em comparação ao/ para-raios limpo. Com uma tensão de 30 kV, a variação foi de 47,27% para mais e, com 35 kV, 48,28%. Isto é, para os onze cenários simulados com poluição leve, a média do aumento da corrente de fuga foi de 47,82%. As

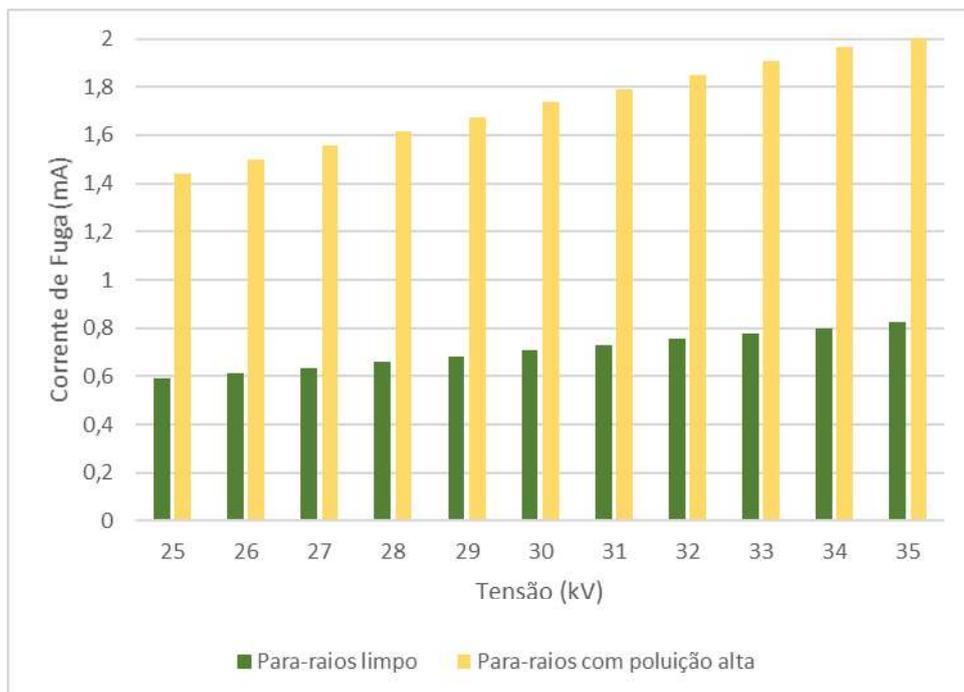
A Figura 4.11 ilustra o comportamento da corrente de fuga medida no para-raios com poluição média à medida que a tensão era aumentada, a cada 1 kV, de 25 kV a 35 kV. Verificase que em relação a corrente medida no para-raios limpo, a corrente teve um maior crescimento quando este estava sujeito a uma tensão de 32 kV, de modo que o aumento foi de 98,46%. A menor variação ocorreu quando a tensão aplicada foi de 25 kV, 97,58%. A média de aumento da corrente de fuga foi de 97,87%.

Figura 4.11. Corrente de Fuga no para-raios sob poluição média



Ao inserir a camada de poluição pesada sobre a superfície do para-raios, adquiriu-se os valores de pico da corrente de fuga de corrente de fuga. A Figura 4.12 expõe os valores de pico da corrente de fuga no para-raios quando este se encontra sob o aumento de níveis de tensão aplicado ao seu terminal, de 25 a 35 kV.

Figura 4.12. Corrente de Fuga no para-raios sob poluição pesada e variação de tensão



Fonte: Autora

A partir dos resultados, depreende-se que a corrente de fuga aumenta tanto com o aumento da camada condutiva na superfície do para-raios quanto com o nível de tensão de excitação. Como pode-se observar, o maior valor medido foi de 2,028 mA para condutividade de 10^{-4} S/m, com 35 kV de injetado ao terminal do para-raios. Tal cenário reflete um aumento de 145,46% em relação à corrente medida no para-raios limpo.

Além disso, a menor variação, 144,51%, ocorreu quando foi utilizada a tensão de excitação de 25 kV ao terminal do para-raios; e a maior variação da corrente de fuga, 145,78%, ocorreu quando a tensão de 30 kV. Essas condições ocorrem devido à condutividade ao longo da superfície do para-raios proporcionar um caminho de baixa impedância para a corrente fluir.

4.4 Conclusão

Neste capítulo, os resultados obtidos no presente trabalho foram apresentados e discutidos. Destacam-se as distribuições de potencial elétrico, campo elétrico, além das curvas e dos valores de pico de corrente de fuga. Os resultados mostraram que as referidas grandezas são diretamente influenciadas pelo aumento tensão aplicada e das condições de poluição. Destacam-se o aumento de 55,11% da intensidade de campo elétrico e 145,78% da corrente de fuga quando o para-raios encontrava-se sujeito a um nível de poluição pesada. Tais ocorrências podem se tornar prejudiciais ao funcionamento do para-raios, dado que o excessivo fluxo de corrente e a alta concentração de linhas de campo elétrico presente em sua geometria acarretará a degradação nas características elétricas do material isolante externo do supressor, e, conseqüentemente, solicitações térmicas e perdas de energia elétrica, até culminar na falha do equipamento.

5 CONCLUSÕES

É inegável a importância da utilização do para-raios no sistema elétrico, dado que este exerce a função de proteção atuando como supressor de surtos, isto é, atenuando os níveis de sobretensões, interrompendo correntes subsequentes e garantindo a integridade dos demais equipamentos de uma subestação, por exemplo.

Entretanto, assumindo que esses supressores estão sujeitos às mais diversas intempéries ambientais e físicas, recomenda-se a inspeção periódica nos mesmos a fim de se diagnosticar possíveis falhas. As práticas mais comuns baseiam-se na análise de distribuição do potencial elétrico e linhas de campo elétrico, e, de modo particular, da corrente de fuga,

Nesse contexto, o presente trabalho mostrou uma metodologia de avaliação de condições de operação de um para-raios de ZnO e invólucro polimérico, de 30 kV, a partir da determinação de corrente de fuga total por meio da modelagem do supressor de surto utilizando Método de Elementos Finitos.

A corrente de fuga total, a distribuição do potencial elétrico e do campo elétrico foram avaliados e, conseqüentemente, o comportamento do para-raios sob diferentes níveis de poluição e aumento de amplitude de tensão. As simulações foram realizadas em uma geometria em 2D baseada no dispositivo pertencente ao Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão utilizando o *software* COMSOL *Multiphysics*, o qual baseia-se no Método dos Elementos Finitos. A incidência da poluição modelada foi por meio da inserção de uma camada condutiva sobre a superfície do para-raios, variando parâmetros de condutividade em três níveis: 1×10^{-9} S/m, 1×10^{-6} S/m e 1×10^{-3} S/m, classificados como poluição leve, média e pesada, respectivamente. Além disso, fez-se uso de um range de tensão de excitação, de 25 kV a 35 kV, a um passo de 1 kV.

A partir dos resultados adquiridos, observou-se que a progressão de intensidade de níveis de poluição e de tensão alteram o comportamento elétrico do para-raios, o qual é refletido no aumento da concentração do potencial elétrico, principalmente em torno do discos de ZnO e nas saias do para-raios. A distribuição do campo elétrico também foi afetada, de modo que houve o aumento significativo, de 54,53% e 55,11%, quando para-raios estava sujeito à camada poluição pesada e à 35 kV e 25 kV de tensão de excitação, respectivamente. Os aumentos das

grandezas mencionadas, quando ocorridas com muita frequência, tornam-se fatores determinantes para a manifestação de descargas parciais no isolamento do para-raios.

No que se refere à corrente de fuga, notou-se também uma elevação nos níveis desta. Quando o para-raios se encontrava limpo e sujeito à variação da tensão de excitação, houve um crescimento médio de 47,82%. Sob os cenários de poluição leve, média e pesada, quando comparada ao caso limpo, a ascensão média das amplitudes das correntes foram, respectivamente, 47,82%, 97,87% e 145,26%.

Portanto, pode-se afirmar que a junção da alta concentração de campo e o excessivo fluxo corrente de fuga no para-raios podem gerar a degradação do material isolante externo do para-raios, avalanche térmica e perda de estanqueidade e, por fim, a falha do equipamento.

Dessa maneira, conclui-se que a utilização de técnicas de modelagem utilizando Método de Elementos Finitos para monitoramento e diagnóstico de falhas para-raios de ZnO é satisfatória. Além disso, o referido método matemático pode-se tornar uma excelente alternativa no auxílio de melhorias de projetos de para-raios de ZnO através da análise de potencial elétrico, campo elétrico e corrente de fuga.

5.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Decorrente da presente dissertação, são propostos trabalhos para desenvolvimento a posteriori:

- Validação do modelo do para-raios desenvolvido a partir da realização de ensaios reais de medição de corrente de fuga em laboratório, utilizando as mesmas condições de poluição e variação de tensão;
- Otimizar o modelo computacional buscando permitir que a variação: da condutividade das pastilhas de ZnO do para-raios; e, da permissividade da camada poluente, sejam levadas em consideração;
- Otimização de modelo desenvolvido a fim de reduzir as amplitudes de corrente de fuga utilizando algoritmos de busca gravitacional e/ou competitivo imperialista;
- Otimização do para-raios modelado para reduzir os níveis de degradações deste dispositivo, aumentar sua confiabilidade operacional e o tempo de vida útil do mesmo.

Referências

- ABB – High Voltage Surge Arresters/Buyer’s Guide, 2018.
- ABDUL-MALEK, Z.; NOVIZON; AULIA A new method to extract the resistive component of the metal oxide surge arrester leakage current, 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, 2008, pp. 399-402. DOI: 10.1109/PECON.2008.4762507
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. NBR 16050: “Para-raios de resistor não linear de óxido metálico sem centelhadores, para circuitos de potência de corrente alternada”. Rio de Janeiro, 2010.
- ABREU, B. G. Desenvolvimento de um sistema Web para utilização e gerenciamento de dados de cupons fiscais e saúde. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, João Monlevade, 2016.
- ALVES, M. E. G. Metodologia para diagnóstico em tempo real de para-raios em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2013.
- ÁLVARES, R. C. Diagnóstico de falhas em para-raios utilizando termografia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2008.
- AOUBED, F., BAYADI, A., RAHMANI, A. E. E BOUDISSA, R. Finite element modelling of electric field and voltage distribution on a silicone insulating surface covered with water droplets, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 25, no. 2, pp. 413-420, April 2018.
- BARBOSA, F. B. Técnicas de Diagnóstico e Correlação com Fenômenos de Degradação em Varistores ZnO. Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2007..
- BARRADAS, R. P. S. Para-raios de óxido de zinco: Teoria e ensaios. Estudo de caso: Ensaios de recebimento em para-raios de 12 kV. Monografia. Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 2014.
- BASTOS, J. P.; SADOWSKI, N. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods. New York, USA.: Marcel Dekker, Inc, 2003..
- BRITTO, T. M. Metodologia da manutenção centrada em confiabilidade aplicada a para-raios de alta tensão. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2011.
- BRITO, V. S; LIRA, G. R. S; COSTA, E. G. Estudo comparativo de métodos de decomposição de corrente de fuga total em para-raios ZnO, IV SBSE, 96877, Goiânia, Goiás, BR, Maio, 2012

- BORGES, L. E. Python para desenvolvedores. Rio de Janeiro - Brasil: Editora Novatec, 2014. 360 p. 27, 29
- CARDOSO, A. F. M. Análise de modelos, simulações e ensaios de impulso em um transformador de distribuição. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 2019.
- CEPEL - ELETROBRAS. Curso sobre para-raios de distribuição, Estação e Linha de Transmissão, 53p., 1977.
- COLOMBO, E., DE NIGRIS, M.; SIRONI, A. Failure Mode Tests for Distribution Type Metal-Oxide Surge Arresters with Polymeric Housing. IEEE Transactions ON Power Delivery, Vol. 11, nº, January, 1996.
- D’AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S. et al. Equipamentos Elétricos – especificação e aplicação em subestação de alta tensão, Rio de Janeiro, FURNAS, 1985.
- DE NIGRIS, M.; SIRONE, A.; BONFANTI, I. et al. Most Recent Developments in Surge Arresters Technology and Testing. POWERCON 89, International Conference on Power System Technology, Beijing, China, pp 194-201, August, 1998.
- FERNANDEZ, F.; DIAZ, R. Metal Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations. Paper 144, International Conference on Power System Transients, IPST’01, 20 -24 June 2001.
- FILHO, O. B. O. Determinação dos coeficientes da Série de Fourier a partir de dados experimentais. Relatório Técnico do CEPEL, Abril, 1984.
- FLORENTINO, M. T. B. Análise de sensibilidade do Método dos vetores de energia dos centroides das Sub-bandas espectrais aplicado ao monitoramento de Isoladores poliméricos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2015.
- FRONTIN, S. O. Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013. 934 p.
- GANESH, K. S. A Review of Zinc Oxide Varistors for Surge Arrester. 2018 4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), 2018, pp. 470-474, doi: 10.1109/ICEES.2018.8443207.
- GONTIJO, G. M.; ROCHA, A. C. O.; FRANCO, E. M. Falha com Para-raios de ZnO de 500 kV no Sistema CEMIG. In: XVII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Uberlandia – Minas Gerais, 2003.
- HADDAD, A.; WARNE, D. Advances in High Voltage Engineering. London, United Kingdom: Institution of Engineering and Technology, 2007. 647 p.
- HINRICHSEN, Volker. Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems. Fundamentals. Siemens AG, Erlangen, Germany, 2012.
- IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 7, n. 1, p. 302309, January 1992.

- ILLIAS, H. A.; CHEN, G.; LEWIN, P. L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(24), 245202. 2011.
- ILLIAS, H. A.; SYAHIRAH, A. H.; BAKAR, A. H. A.; MOKHLIS, H. Determination of surge arrester discharge energy using finite element analysis method. *IET Science, Measurement & Technology* 9. 10.1049/iet-smt.2014.0240.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60099-4: Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Geneva, 2009.
- 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.
- LATIFF, N. A. A.; ILLIAS, H. A.; BAKAR, A. H. A. Condition monitoring of discharged ZnO surge arrester on temperature distribution under various design conditions. *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016, pp. 562-565.
- LATIFF, N. A. A.; ILLIAS, H.A.; BAKAR, A.H.A.; DABBAK, S. Z.A. Measurement and Modelling of Leakage Current Behaviour in ZnO Surge Arresters under Various Applied Voltage Amplitudes and Pollution Conditions. *Energies* 2018, 11, 875.
- LATIFF, N. A. A. Optimization of zinc oxide surge arrester in reducing leakage. Tese de Doutorado. Universidade da Malasia, Kuala Lumpur, 2018.
- LATIFF, N. A. A.; DABBAK, S. Z.A.; ILLIAS, H. A.; BAKAR, A. H. A. Parametric Evaluation of 11kV Zinc Oxide Surge Arrester using Finite Element Analysis Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021.
- LEE, B.; KANG, S. A new on-line leakage current monitoring system of ZnO surge arresters. *Materials Science and Engineering: B*, Vol. 19, April. 2005
- LIMA JÚNIOR, G. B. Monitoramento de para-raios de Óxido de Zinco em campo. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2014.
- LIRA, J. G. A. Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de para-raios de Óxido de Zinco. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2007.
- LIRA, G. R. S., K.; COSTA, G. E. MOSA monitoring technique based on analysis of total leakage current. *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 28, No. 2, May. 2005.
- LISBOA, M. M.; ASSIS, W. M.; RIBEIRO, J. H. R.; RIBEIRO, A. R.; BARBOSA, P. H. M.; NUNES, M. V. A. Medição de corrente de fuga total em para-raios de ZnO no LEAT-UFGA e aquisição da componente resistiva a partir da utilização do método de filtragem digital. VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2020.
- LISBOA, M. M.; BARBOSA, P. H. M.; RIBEIRO, J. H. R.; COSTA, S. C. C.; NUNES, M. V. A. Metodologia de aquisição da componente resistiva da corrente de fuga de para-raios

de ZnO utilizando Transformada Rápida de Fourier. XLVIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2020.

MAMEDE FILHO, J. Manual de Equipamentos Elétricos. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MARDIRA, K., DARVENIZA, M., AND SAHA, K. (1999). A new monitoring system for metal oxide surge arrester. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, UK.

MATOS, A. P. F. Metodologia e programa para decomposição da corrente de fuga de para-raios de Oxido de Zinco. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.

NOVIZON; ABDUL-MALEK, Z. Electrical and temperature correlation to monitor fault condition of ZnO surge arrester. 3rd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, 2016.

PEDROSA, R. O. Estudo de absorção de energia de para-raios de ZnO instalados em linhas de transmissão de 135 kV. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2013.

PINCETI, P.; GIANNETTONI, M. A Simplified Model for Zinc Oxide Surge Arresters. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, Nº 2, pp.393-398, 1999.

PROMOD, K. P.; BOMBLE, U. L. Concepts and health monitoring of ZnO surge arrester. International Journal of Electronics Engineering, Vol. 10, Nº 2, pp. 14-17, 2018.

SADIKU, M. N. O. Elementos de eletromagnetismo, 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SANTOS, D. M. Estudo do THD da Corrente de Fuga de Para-raios como Parâmetro Indicador de Degradação. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

SEYYEDBARZEGAR, S. M.; MIRZAIE, M. Heat transfer analysis of metal oxide surge arrester under power frequency applied voltage. Energy, 93, 141–153, 2015.

SHIRAKAWA, S. et al. Maintenance of surge arrester by a portable arrester leakage current detector. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 3, No. 3, July, 1988.

SILVA, D. A. Metodologia de análise qualitativa em para-raios poliméricos sujeitos à umidade interna. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, Campinas, 2016.

TIGHILT, F.; BAYADI, A. Computed voltage distribution in ZnO arrester under pollution by finite element method. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007. Setif, Algeria, 2007.

VIANNA, J. C. C. Estudo de aplicação de para-raios ZnO em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2009.

- VIDEIRA, A. G. Desenvolvimento de subsídios para aplicação em testes de avaliação de para-raios de ZnO. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2011.
- VINHAIS, M. L. Sistemas de provas online com desenvolvimento em Python com Django. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - UNIRIO, Rio de Janeiro, 2013.
- VOLAT, C. Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin layer. In: 2013 IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE, 2013, Ottawa. Proceedings [...].Ottawa: [s. n.], 2013. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554278..
- XAVIER, J. A. R. Ajustamento de técnica de monitoração remota de poluição em cadeias de isoladores a partir de aferições laboratoriais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Recife, 2017.