

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Ayrlw Maynyson de Carvalho Arcanjo

**AVALIAÇÃO DE ESPAÇADORES DE 13,8KV EM
AMBIENTES CONTAMINADOS**

Recife
2017

Ayrlw Maynyson de Carvalho Arcanjo

AVALIAÇÃO DE ESPAÇADORES DE 13,8KV EM AMBIENTES CONTAMINADOS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Zaroni Dueire Lins, *D.Sc.*

Coorientador: José Maurício de Barros Bezerra, *D.Sc.*

Recife
2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A668a Arcanjo, Ayrilw Maynyson de Carvalho.
Avaliação de espaçadores de 13.8 kV em ambientes contaminados / Ayrilw
Maynyson de Carvalho Arcanjo. – 2017.
103 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Zaroni Dueire Lins.

Coorientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2017.

Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Linhas compactas. 3. Espaçador losangular.
4. Poluição. 5. Ensaio de câmara de neblina. 6. Corrente de fuga. 7. Simulações
I. Lins, Zaroni Dueire. (Orientador). II. Bezerra, José Maurício de Barros.
(Coorientador). III. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-145



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

AYRLW MAYNYSON DE CARVALHO ARCANJO

TÍTULO

**“AVALIAÇÃO DE ESPAÇADORES DE 13,8 kV
EM AMBIENTES CONTAMINADOS.”**

A comissão examinadora composta pelos professores: ZANONI DUEIRE LINS, DEE/UFPE; JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEE/UFPE, MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR, DEE/UFPE e LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, DEE/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **AYRLW MAYNYSON DE CARVALHO ARCANJO APROVADO.**

Recife, 23 de fevereiro de 2017.

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Coordenador do PPGEE

ZANONI DUEIRE LINS
Orientador e Membro Titular Interno

LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS
Membro Titular Externo

JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA
Coorientador e Membro Titular Interno

MANOEL AFONSO DE CARVALHO JÚNIOR
Membro Titular Interno

*Dedico este trabalho à minha família, e aos meus amigos,
com eles o trabalho foi possível.*

Agradecimentos

Agradeço à Deus por disponibilizar saúde e paz na realização deste trabalho. Agradeço aos meus pais Manoel Arcanjo e Alda Valéria, pelo alicerce profundo para o meu crescimento como homem e cidadão. Aos meus tios e tias que sempre encorajaram este trabalho para ser finalizado com sucesso. Ao meu irmão Maherbson de Carvalho, por ser exemplo de determinação e caráter em minha vida. Aos Professores José Maurício e Zanoni Lins, pelo acompanhamento e sugestões no decorrer deste trabalho. Aos Professores Afonso de Carvalho e Luiz Henrique, pelas contribuições para o enriquecimento do trabalho. À Ieda Costa por contribuir neste trabalho, não poupando esforços para dar bons conselhos na hora da dúvida no decorrer deste trabalho e da minha vida. Aos amigos José Alexandre, Diego Lopes, Samuel Honorato e Alexsandro Aleixo por abraçarem comigo o desafio do mestrado e fornecerem um pouco de seus conhecimentos. Aos amigos Victor Andrade, Caio e Oscar por disponibilizarem tempo para contribuir com os processos práticos realizados neste trabalho. À toda equipe do GpTD por participar e acompanhar o crescimento desta dissertação. À Eletrobrás Distribuição Alagoas por fornecerem recursos e conhecimentos para que o trabalho fosse realizado com sucesso. A todos que contribuíram para este trabalho de forma direta ou indireta que não foram citados por algum motivo, meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Esta dissertação avalia o comportamento elétrico de espaçadores losangulares de linhas compactas de 13,8 kV em ambientes poluídos. Nas literaturas verifica-se que nesses espaçadores, quando submetidos a ambientes agressivos, fenômenos como trilhamento elétrico, centelhamentos, erosão e outros processos de degradação de dielétricos surgem sobre eles. A cobertura dos cabos de linhas compactas são em sua maioria semi-isolantes, ou seja, o campo elétrico produzido não é confinado no cabo, isto dá oportunidade para correntes trilharem caminhos de fase à fase ou de fase à terra. Tais correntes são denominadas de fuga. A corrente de fuga atrapalha o funcionamento dos espaçadores de linhas compactas, podendo acarretar perdas elétricas e desligamentos indesejados. Logo, o trabalho propõe um estudo comparativo entre dois tipos de espaçadores normalmente utilizados em redes compactas de 13,8 kV , buscando observar pontos positivos e negativos destes isolantes. Para isso, se faz uso de Laboratório de Alta Tensão, buscando medição de corrente fuga fase-fase e fase-terra, e de ferramentas computacionais, tais como, *software COMSOL Multiphysics*, *software MATLAB* e *AutoCAD*, buscando a distribuição de potencial elétrico ao longo da distância de escoamento, campo elétrico produzido e a tensão de flashover dos espaçadores. Toda a contaminação produzida artificialmente e geração de neblina é baseado segundo norma técnica CEI/IEC 60507:1991. Assim, a dissertação representa contribuições para a identificação de limitações nesses espaçadores em ambientes contaminados sob aspectos de distribuição de potencial elétrico, campo elétrico, tensão de flashover e corrente de fuga.

Palavras-chave: Linhas compactas. Espaçador losangular. Poluição. Ensaio de câmara de neblina. Corrente de fuga. Simulações.

Abstract

This dissertation evaluates the electrical behavior of lozenger spacers of compact lines of $13.8kV$ in polluted environments. In the literature it appears that such spacers, when subjected to harsh environments, such as electrical tracking phenomena, sparks, dielectric erosion and other degradation processes occur on them. The cover of the compact lines cables are mostly semi-insulating, then, the electric field produced is not confined to the cable, this gives opportunity to current tread phase paths to phase or phase to ground such currents are called leakage. Leakage current hinders the proper functioning of spacers compact lines, which may cause electrical losses and unwanted disconnections. Therefore, the paper proposes a comparative study between two types of spacers commonly used in compact networks $13.8 kV$, seeking to observe positive and negative points of these insulators. For this, it makes use of High Voltage Laboratory, seeking measuring leakage current phase-phase and phase-to-earth, and computational tools such as *COMSOL Multiphysics software*, *software MATLAB* and *AutoCAD*, looking for an distribution of electric potential along the flow distance, electric field and a flashover voltage of the spacers. All artificially produced contamination and fog generation is based on the second technical standard CEI / IEC 60507: 1991. Thus, the dissertation represents contributions to the identification of these limitations spacers in contaminated environments under aspects of distribution of electric potential, electric field, flashover voltage and leakage current.

Keywords: Compact lines. Lozenge spacer. Pollution. Fog test chamber. Leakage current. Simulations.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Cabo de força coberto.	20
Figura 2 – Conjunto com cabo mensageiro, espaçador e cabos de força	20
Figura 3 – Espaçadores losangulares poliméricos.	21
Figura 4 – Separador vertical de cabos - 15kV.	21
Figura 5 – Isolador tipo bastão.	22
Figura 6 – Isolador tipo pino.	22
Figura 7 – Anel de amarração.	22
Figura 8 – Braço tipo “L” em condições de tangência	23
Figura 9 – Braço tipo C em condições de ângulo.	23
Figura 10 – Alinhamento dos momentos de dipolo devido a ação um campo elétrico externo.	25
Figura 11 – Um dipolo elétrico intrínseco submetido a aplicação do campo externo.	25
Figura 12 – Cabo coberto e isolador com diferentes dielétricos.	26
Figura 13 – Exemplos de distribuição de potencial em isoladores de vidro.	29
Figura 14 – Exemplos de distribuição de potencial e campo elétrico ao longo da distância de escoamento em isoladores poliméricos.	29
Figura 15 – Circuito equivalente de um dielétrico.	31
Figura 16 – Diagrama vetorial do circuito equivalente do dielétrico.	31
Figura 17 – Exemplo de cavidade dentro de um dielétrico.	33
Figura 18 – Trilhamento elétrico.	34
Figura 19 – Representação de arborescência.	35
Figura 20 – Malha simples de elementos finitos.	38
Figura 21 – Elementos finitos mais usuais.	38
Figura 22 – Modelo Computacional para Cálculo de Tensões de 50%.(BEZERRA, 2004)	42
Figura 23 – Espaçadores X e Y no AutoCAD	43
Figura 24 – Em azul escuro estão as regiões de cada material presente na simulação do espaçador X.	44
Figura 25 – Em azul escuro estão as regiões de cada material presente na simulação do espaçador Y.	45
Figura 26 – Condições de contorno aplicadas no espaçador X e Y.	46
Figura 27 – Malhas nos espaçadores X e Y.	47
Figura 28 – Potencial elétrico do espaçador X na fase A-T.	48
Figura 29 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor A-T	49
Figura 30 – Potencial elétrico do espaçador X na fase C-T.	50
Figura 31 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor C-T	51

Figura 32 – Potencial elétrico do espaçador X na fase A-B.	52
Figura 33 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor A-B	53
Figura 34 – Potencial elétrico do espaçador X na fase B-C.	54
Figura 35 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor B-C	55
Figura 36 – Campo elétrico do espaçador X na fase A-T.	56
Figura 37 – Campo elétrico do espaçador X na fase C-T.	57
Figura 38 – Campo elétrico do espaçador X na fase A-B.	58
Figura 39 – Campo elétrico do espaçador X na fase B-C.	59
Figura 40 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase A-T.	60
Figura 41 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor A-T	61
Figura 42 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase C-T.	62
Figura 43 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor C-T	63
Figura 44 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase A-B.	64
Figura 45 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor A-B	65
Figura 46 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase B-C.	66
Figura 47 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor B-C	67
Figura 48 – Campo elétrico do espaçador Y na fase A-T.	68
Figura 49 – Campo elétrico do espaçador Y na fase C-T.	69
Figura 50 – Campo elétrico do espaçador Y na fase A-B.	70
Figura 51 – Campo elétrico do espaçador Y na fase B-C.	71
Figura 52 – Curva de suportabilidade, espaçadores X e Y fase A-T	72
Figura 53 – Curva de suportabilidade, espaçadores X e Y fase C-T	73
Figura 54 – Curva de suportabilidade, espaçadores X e Y fase A-B	74
Figura 55 – Curva de suportabilidade, espaçadores X e Y fase B-C	75
Figura 56 – Laboratório de Alta Tensão do GpTD/DEE/UFPE.	76
Figura 57 – Transformador	77
Figura 58 – Controlador de tensão OT276	77
Figura 59 – Cubículo de comutação	78
Figura 60 – Foto dos capacitores	79
Figura 61 – Sistema de pulverização	80
Figura 62 – Construção típica de um bico de pulverização.	81
Figura 63 – Foto do bico de pulverização em diferentes visualizações.	81
Figura 64 – Câmara de neblina.	82

Figura 65 – Itens de preparação de solução.	84
Figura 66 – Soluções para os espaçadores X e Y.	84
Figura 67 – Espaçadores com garras de 15kV.	85
Figura 68 – Definição de fases.	85
Figura 69 – Espaçadores X e Y contaminados.	86
Figura 70 – Processo de medição da corrente de fuga.	88
Figura 71 – Caixa de medição da corrente de fuga.	89
Figura 72 – Foto de medição da corrente de fuga.	89
Figura 73 – Corrente de fuga nos espaçadores X e Y, a seco.	91
Figura 74 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, atmosfera limpa.	92
Figura 75 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, contaminação muito leve.	93
Figura 76 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, contaminação pesada.	94
Figura 77 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, contaminação muito pesada.	96

Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores das permissividades elétricas relativas dos materiais envolvidos.	44
Tabela 2 – Parâmetros Utilizados para Modelar o Nível de Poluição (VOLAT, 2013).	47
Tabela 3 – Distâncias de Escoamento por Setor em Cada Espaçador.	72
Tabela 4 – Definição da contaminação.	83

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
API	<i>Application Programming Interface</i> - Interface para Programação de Aplicação
C.A.	Corrente Alternada
C.C.	Corrente Contínua
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Auxiliado por Computador
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
EDAL	Eletrobrás Distribuição Alagoas
EDP	Equação Diferencial Parcial
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FEMLAB	<i>Finite Element Method Laboratory</i> - Laboratório de Elementos Finitos
GpTD	Grupo de Pesquisa em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> - Instituto de Engenharia Elétrica e Eletrônica
LAT	Laboratório de Alta Tensão
MEF	Método dos Elementos Finitos
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

Lista de símbolos

σ_v	Condutividade volumétrica da poluição
J_v	Densidade de corrente volumétrica
D	Densidade de fluxo elétrico
ρ_v	Densidade volumétrica de carga
d_i	Distância de escoamento de cada isolador
d_e	Distância de escoamento específica
d	Espessura da camada de poluição
ω	Frequência de operação
E	Módulo do campo elétrico
ϵ	Permissividade absoluta do material
ϵ_r	Permissividade relativa do material
V	Potencial elétrico
U_λ	Tensão aplicada
\vec{E}	Vetor campo elétrico

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Motivação	16
1.3	Objetivos da Dissertação de Mestrado	17
1.4	Organização Textual	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Histórico e Componentes de Redes Compactas	19
2.2	Características Dielétricas dos Espaçadores	23
2.2.1	Conceito de Dielétrico	24
2.2.2	Campo Elétrico	24
2.2.3	Potencial Elétrico	25
2.2.4	Distribuição de Potencial e Campo Elétrico em Dielétricos	27
2.2.5	Dielétrico Ideal versus Real	30
2.2.6	Perdas nos Materiais Dielétricos	30
2.2.7	Corrente de Fuga	32
2.2.8	Descargas Parciais	33
2.2.9	Trilhamento Elétrico	34
2.2.10	Arborescência Elétrica	35
2.3	Ensaio em Isolantes	35
2.3.1	Ensaio de Névoa Salina	35
2.3.2	Ensaio de Névoa Limpa	36
2.3.3	Ensaio de Trilhamento Elétrico	36
2.4	Método dos Elementos Finitos	37
2.4.1	Conceito Básico do Método dos Elementos Finitos	37
2.4.2	Malha do Método dos Elementos Finitos	39
3	ANÁLISE COMPUTACIONAL NOS ESPAÇADORES	40
3.1	Modelos Computacionais Utilizados	40
3.1.1	Análise da Distribuição de Potencial	40
3.1.2	Determinação da Tensão de Descarga em Função do Nível de Poluição	41
3.2	Aplicação do Modelo Computacional no Comsol	43
3.2.1	Desenhos dos Espaçadores X e Y	43
3.2.2	Geometria dos Espaçadores no Comsol	44
3.2.3	Definição dos Materiais no Comsol	44
3.2.4	Definição das Condições de Contorno no Comsol	45

3.2.5	Definição da Malha	46
3.2.6	Resultados de Simulações no COMSOL	47
3.2.6.1	Potencial Elétrico no Espaçador X	48
3.2.6.2	Campo Elétrico no Espaçador X	56
3.2.6.3	Potencial Elétrico no Espaçador Y	59
3.2.6.4	Campo Elétrico no Espaçador Y	68
3.3	Aplicação de Modelo Computacional no Matlab	72
3.3.1	Resultados de Simulações no Matlab	72
4	ANÁLISE LABORATORIAL NOS ESPAÇADORES	76
4.1	Descrição do LAT do GpTD/DEE/UFPE	76
4.1.1	Descrição do Kit de Alta Tensão	77
4.1.2	Descrição do Sistema de Pulverização	79
4.1.3	Descrição da Câmara de Nebulina	80
4.1.3.1	Bico Injetor	80
4.1.3.2	Geometria da Câmara de Nebulina	82
4.2	Montagens Laboratoriais	83
4.2.1	Preparações de Soluções	83
4.2.2	Processo de preparação das soluções	83
4.3	Espaçadores sob Ensaio	85
4.4	Procedimentos de Ensaio	86
4.4.1	Medição da Corrente de Fuga	87
4.5	Resultados de Laboratório	90
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	98
5.1	Trabalhos Futuros	99
	REFERÊNCIAS	100

1 Introdução

1.1 Contextualização

O fornecimento da energia elétrica é tão importante quanto sua geração. Garantir que a energia elétrica chegue ao seu destino sem interrupções ao longo de seu caminho é essencial para o funcionamento do sistema elétrico. Dessa forma, minimizar perdas no decorrer deste percurso é uma tarefa indispensável.

As perdas na distribuição de energia elétrica podem ser de duas naturezas, as técnicas e as não técnicas. A primeira delas é inerente ao transporte da energia elétrica na rede, relacionada à transformação de energia elétrica em energia térmica nos condutores (efeito joule), perdas nos núcleos dos transformadores, perdas dielétricas, etc. Podem ser entendidas como o consumo dos equipamentos responsáveis pela distribuição de energia. A segunda delas corresponde à diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, considerando, portanto, todas as demais perdas associadas à distribuição de energia elétrica, tais como furtos de energia, erros de medição, erros no processo de faturamento, unidades consumidoras sem equipamento de medição, etc. Esse tipo de perda está associado à gestão comercial da distribuidora (ANEEL, 2016).

Com foco nas perdas técnicas, surgiu na década de 50, com Bill Hendrix nos Estados Unidos, as redes compactas protegidas. Este sistema foi desenvolvido para que a rede aérea tivesse uma compactação próxima a encontrada nas redes subterrâneas, possibilitando a utilização de até quatro circuitos no mesmo poste e aumentando a confiabilidade e segurança do sistema de distribuição aéreo (DOI; MIYUACHI; MATSUMOTO, 1987), (NISHIMURA; CICARELLI; MARTINS, 1994).

Contudo, diversos problemas associados principalmente a regiões poluídas ou costeiras degradam o desempenho dos materiais isolantes utilizados nas redes compactas. Esse ponto merece atenção especial, não apenas quanto às perdas causadas por correntes de fuga, mas também por problemas mais graves relacionados com o trilhamento superficial do isolante podendo levar ao seu colapso integral e ao aumento dos indicadores FEC e DEC.

1.2 Motivação

A continuidade do serviço é uma das grandes preocupações das distribuidoras de energia elétrica, pois em caso de interrupção, além de transtornos à sociedade, a empresa, caso não consiga reestabelecer o serviço dentro de um período aceitável, acaba por ser penalizada financeiramente. Um dos componentes que apresenta alto índice de falhas é o isolador, e por isso, é de grande importância o monitoramento deste componente (BEZERRA et al., 2009).

No caso específico de linhas compactas, o isolamento entre fases é feito por espaçadores poliméricos que apresentam degradações similares aos isolantes utilizados sobre as cruzetas para isolamento do condutor à mesma. Esses espaçadores adquirem, com o passar do tempo e fruto de condições ambientais adversas, avarias cumulativas que além de acentuarem as correntes de fuga e conseqüente perdas superficiais no dielétrico, podem desencadear em seu completo colapso.

O cabo coberto, utilizado em redes compactas, é uma extraordinária opção técnica e econômica para as concessionárias de distribuição de energia elétrica. Dentre suas vantagens estão a facilidade de construção, instalação e manutenção além do baixo custo quando comparadas às redes aéreas com cabo isolado ou subterrâneas. Contudo, sendo o campo elétrico nesse tipo de condutor não confinado, correntes superficiais podem surgir. As correntes superficiais, a depender da agressividade climática do ambiente na região de instalação, são responsáveis pelos fenômenos de trilhamento elétrico e erosão. A presença de trilhamento elétrico e erosão na cobertura polimérica desse tipo de condutor, mais observados nos pontos de amarração do cabo com o isolante (que para o caso das redes compactas são os espaçadores losangulares), é comum ocasionar a ruptura dos cabos, podendo apresentar riscos a terceiros e descontinuidade, não planejada, do fornecimento de energia elétrica.

Desse modo, busca-se realizar estudos que diminuam a influência da agressividade do meio ambiente sobre os isolantes que fazem o trabalho de separar os condutores fase das redes compactas, que são os espaçadores losangulares. Este estudo visa avaliar dois modelos diferentes de espaçadores losangulares, focando em sua geometria (distâncias de escoamento), corrente de fuga, distribuição de potencial elétrico ao longo da distância de escoamento dos espaçadores, campo elétrico e tensão de flashover.

1.3 Objetivos da Dissertação de Mestrado

Este trabalho apresenta ensaios de corrente de fuga e estudos de distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, campo elétrico e tensão de flashover em espaçadores isolantes losangulares conduzidos dentro do Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) que foi desenvolvido pela UFPE em conjunto com a EDAL. A pesquisa busca analisar materiais e geometrias estruturais que minimizam as perdas relacionadas com o efeito Joule. Com isso, são avaliadas geometrias de dielétricos que possam reduzir as correntes de fuga em espaçadores isolantes utilizados em redes de distribuição compactas. Os ensaios descritos, apontam resultados comparativos entre dois modelos de espaçadores losangulares normalmente utilizados em redes de distribuição compactas, de forma a permitir a caracterização de aspectos na geometria desse espaçador que influenciam no aumento ou na diminuição das correntes de fuga pelo espaçador. Assim, tem como objetivo nessa dissertação:

1. Comparar, fazendo uso de laboratório e simulações, dois espaçadores (X e Y) típicos utilizados em redes compactas do sistema elétrico da EDAL, buscando levantar pontos

positivos e negativos destes isolantes sob operação em ambientes poluídos;

2. Servir de referência para novas pesquisas que busquem trabalhar com manipulações de níveis de poluições distintos utilizando simuladores de poluição artificial (câmara de neblina), Laboratórios de Alta Tensão e simulações computacionais, estabelecendo, também, a interação prática e computacional.

1.4 Organização Textual

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2** - Fundamentação teórica: revisão bibliográfica com intuito de apresentar conceitos importantes para a compreensão do trabalho, tais como, histórico e componentes das redes compactas, características dielétricas dos espaçadores, alguns tipos de ensaios em isolantes, e apresentação do método dos elementos finitos;
- **Capítulo 3** - Análise Computacional dos Espaçadores: Neste capítulo são abordados os modelos computacionais, sua aplicação e resultados de simulações de potencial elétrico ao longo da distância de escoamento, campo elétrico e tensão de flashover dos espaçadores X e Y de $13,8kV$ de rede de distribuição compacta.
- **Capítulo 4** - Análise Laboratorial nos Espaçadores: Neste capítulo é apresentada análise laboratorial, com a medição de corrente de fuga, nos espaçadores de $13,8kV$. Inicialmente é feita descrição detalhada do Laboratório de Alta Tensão-LAT do Grupo de Pesquisa em Transmissão e Distribuição-GpTD do Departamento de Engenharia Elétrica-DEE da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE e também são feitas descrições detalhadas das montagens laboratoriais realizadas que inclui preparações das soluções e procedimentos de ensaio. Ao final deste capítulo são apresentados resultados e análises do ensaio de medição de corrente de fuga.
- **Capítulo 5** - Conclusões e Trabalhos Futuros: Neste capítulo são apresentadas as conclusões referentes as análises computacionais e laboratoriais dos espaçadores X e Y de $13,8kV$ e sugestões para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Estudos em ambientes de poluição agressiva, utilizando corrente de fuga como parâmetro de degradação de dielétricos em redes compactas, veem sendo feitos ao decorrer dos anos. Valores de referência da corrente de fuga são capazes de subsidiar, como controle de campo, a manutenção preventiva da rede compacta. Da mesma forma, modelos computacionais, veem sendo desenvolvidos para obter visualização de campo elétrico, distribuição de potencial e tensão de flashover em elementos de rede compacta.

É foco desta dissertação de mestrado utilizar a corrente de fuga, distribuição de potencial, campo elétrico e tensão de flashover para analisar dois tipos comuns de espaçadores presentes nas redes compactas. Assim, este capítulo apresenta a teoria que fundamenta a pesquisa.

2.1 Histórico e Componentes de Redes Compactas

O Brasil adotou a rede padrão convencional de distribuição aérea de $15kV$ (tensão de linha), formada por cabos nus de alumínio sustentados por isoladores em cruzetas de madeira ou concreto, porém esse tipo de rede apresenta uma alta taxa de falha, assim ficou evidente a necessidade de modernização da rede, surgindo margem para as redes compactas protegidas de distribuição. As redes compactas protegidas aumentaram significativamente a confiabilidade do sistema elétrico (SEGATTO, 2008)(LAMARAO, 1996).

As primeiras utilizações de cabo cobertos em redes aéreas no Brasil veio com a concessionária COPEL, numa rede de $13,8kV$ em 1989, onde substituiu-se os cabos de alumínio nus por cabos cobertos com polietileno, contudo mantendo a topologia tradicional. O objetivo central era testar a eficiência da alteração frente a contatos ocasionais com galhos de árvores, vento e chuva (PIAZZA, 1999).

Assim, a rede compacta protegida tem sido uma boa solução no que diz respeito a cabos de energia elétrica e arborização das vias públicas, sendo uma solução eficaz economicamente para atender as demandas ecológicas. Os cabos são cobertos com uma proteção isolante que permitem ficar mais próximos uns dos outros e de galhos de árvores, sem risco de curto circuito em caso do toque de galhos ou entre os condutores. Esse conjunto de fatores faz com que a linha seja mais confiável e possua uma compactação permitindo uma melhor utilização da posteação e diminuindo a agressão às árvores devido à poda. Um levantamento realizado pela COPEL, mostrou que há uma redução nos custos de manutenção de cerca de 70% em comparação com a rede convencional, considerando manutenção corretiva e preventiva da rede e o serviço de poda das árvores. Ainda observou-se uma redução de 75% da interrupção no fornecimento de energia elétrica com relação à rede convencional. Entretanto, em relação aos custos de construção, a rede

compacta protegida custa 1,8 vezes mais que a rede convencional com cabos nus, enquanto as construções de linhas subterrâneas custam 15 vezes mais (FAGUNDES, 2008).

Os componentes que fazem parte das redes de distribuição compactas aéreas estão apresentados a seguir:

- Cabos de Força Cobertos: Possui uma cobertura de polietileno, usado para criar uma isolamento para o eventual contato entre os cabos ou entre um material qualquer, são comumente chamados de cabos protegidos pois não são isolados, e não possuem uma blindagem magnética, desta forma apresentam campo elétrico não confinado (XAVIER, 2015).

Figura 1 – Cabo de força coberto.



Fonte: (HIELEBE, 2014).

- Cabo Mensageiro: Cabo de aço zincado que é utilizado para sustentação dos espaçadores e separadores. Na Figura 2 pode-se ver foto do cabo mensageiro (cabo localizado na parte de cima do espaçador) sustentando o espaçador polimérico numa rede compacta (XAVIER, 2015).

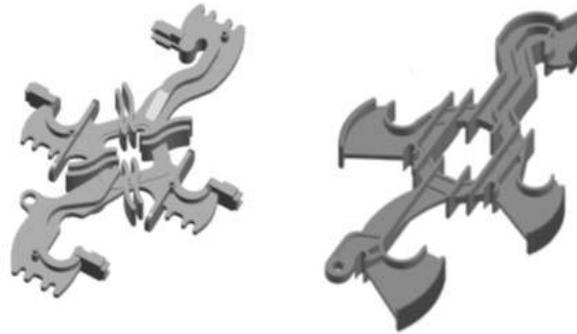
Figura 2 – Conjunto com cabo mensageiro, espaçador e cabos de força .



Fonte: (PLP, 2015).

- **Espaçador:** Acessório feito de polietileno, cuja função é a de sustentação e isolamento dos cabos cobertos ao longo do vão, mantém a linha numa situação de compactação e diminui a possibilidade de um condutor rompido atingir o solo (XAVIER, 2015). A Figura 3 apresenta foto de espaçadores losangulares poliméricos.

Figura 3 – Espaçadores losangulares poliméricos.



Fonte: próprio autor.

- **Separador Vertical:** Acessório de material polimérico de formato retilíneo, cuja função é de sustentação e separação dos cabos cobertos da rede compacta em situações de cruzamentos de rede (XAVIER, 2015). A Figura 4 apresenta foto de separador vertical de cabos de 15kV.

Figura 4 – Separador vertical de cabos - 15kV.



Fonte: (PLP, 2015)

- **Isolador Tipo Bastão:** Tipo de isolador constituído de pelo menos dois tipos de materiais isolantes, sendo equipado com engates metálicos para sustentação e fixação dos cabos em

estruturas de fim de linha, encabeçamento da rede, derivação e/ou ângulos (SEGATTO, 2008). A Figura 5 apresenta foto do isolador tipo bastão.

Figura 5 – Isolador tipo bastão.



Fonte: (SEGATTO, 2008)

- **Isolador Tipo Pino:** Isolador dotado de orifício rosqueado ou provido de pino, é constituído de um único corpo isolante, usado para sustentar e isolar cabos de força (SEGATTO, 2008). A Figura 6 apresenta foto do isolador pino.

Figura 6 – Isolador tipo pino.



Fonte: (PLP, 2015)

- **Anel de Amarração:** Acessório de material polimérico utilizado para a fixação do condutor da fase no isolador tipo pino, espaçador losangular e separador de fase (SEGATTO, 2008). A Figura 7 apresenta foto do anel de amarração.

Figura 7 – Anel de amarração.



Fonte: (PLP, 2015)

- **Braço Tipo L:** Ferragem em formato L, fixado ao poste, tem por função sustentação do cabo mensageiro da rede compacta, em condição de tangência ou com ângulos de deflexão de até seis graus (SEGATTO, 2008). A Figura 8 apresenta foto do braço tipo L em condições de tangência.

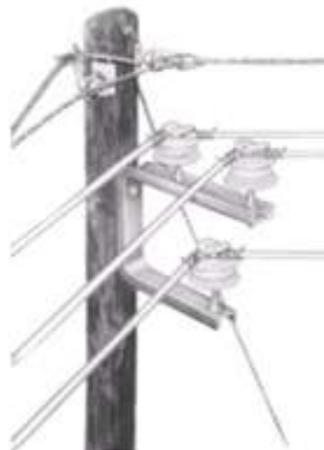
Figura 8 – Braço tipo “L” em condições de tangência .



Fonte: (SEGATTO, 2008)

- Braço Tipo C: Ferragens, em formato C, fixado ao poste, tem por finalidade sustentar as fases em condição de ângulo e de fim de linha, derivações e conexões de equipamentos à rede (SEGATTO, 2008). A Figura 9 apresenta braço tipo C em condições de ângulo.

Figura 9 – Braço tipo C em condições de ângulo.



Fonte: (SEGATTO, 2008)

2.2 Características Dielétricas dos Espaçadores

O espaçador é um acessório de fundamental importância para o funcionamento das linhas de distribuição, possibilitando que o sistema de rede aérea tenha uma compactação próxima da rede subterrânea, viabilizando até mesmo a utilização de quatro circuitos por posteação e aumentando a confiabilidade do sistema e otimizando a utilização de cada estrutura (LOPES, 2016).

Um outro aspecto elétrico importante dessas linhas é a diminuição de sua reatância, associada à redução das distâncias entre fases. Esse atributo adicional permite que as quedas de tensão ao longo das redes sejam menores, incorporando melhor qualidade da energia fornecida e

custos reduzidos com a aplicação de equipamentos de regulação (LOPES, 2016).

O espaçador dentre os elementos da rede compacta é o responsável por separar condutores com potenciais diferentes, isto capacita a ocorrência de correntes de fuga entre fases e fase-terra. Quando submetidos a ambientes agressivos e com muita umidade, a corrente de fuga encontra uma maior facilidade para percorrer distâncias de fase-fase e fase-terra, aumentando consideravelmente seu módulo. Isto ocasiona aumento das perdas elétricas, influenciando o desempenho da linha.

Outro fator que influencia na facilidade de percurso da corrente fuga é a geometria do espaçador. Grandezas como distância de escoamento (distância linear de um potencial distinto à outro) e a distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, refletem nas características do espaçador.

Sendo o espaçador um dielétrico, faz-se necessário então um estudo prévio sobre características dielétricas, elétricas e conhecimentos a respeito das degradações dos dielétricos utilizados.

2.2.1 Conceito de Dielétrico

Os dielétricos são caracterizados por oferecerem uma resistência à passagem da corrente elétrica comparado aos materiais condutores. Então, pode-se considerar os dielétricos como substâncias nas quais todos os seus elétrons estão fortemente ligados aos seus átomos e, deste modo, não participam do processo de condução elétrica (ARCANJO, 2015).

Quando um campo elétrico é aplicado ao dielétrico, as cargas negativas e positivas deslocam-se. Isto provoca o surgimento de dipolos elétricos. Este fenômeno é conhecido como polarização. Os dielétricos podem, assim, ser considerados como substâncias polarizáveis pela ação de um campo elétrico (LUNA, 2006) e dentre suas principais funções está em realizar o isolamento elétrico dos condutores entre si e com respeito à terra, ou a uma certa massa metálica.

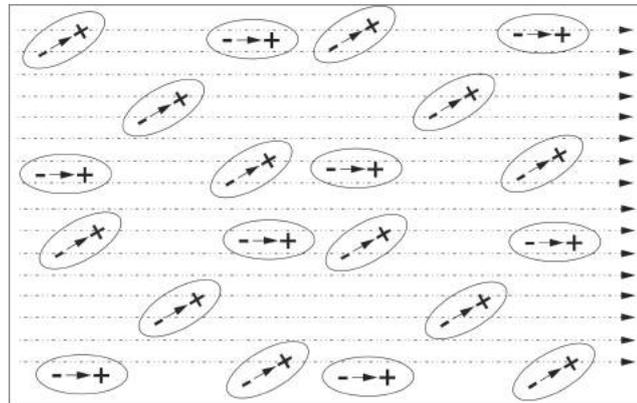
2.2.2 Campo Elétrico

Quando um campo elétrico externo age sobre um dielétrico, e este possui um dipolo intrínseco, por exemplo a água, a ação da força elétrica tende a alinhar os vetores momento de dipolo na mesma direção do campo elétrico. Esta orientação não é perfeita, já que o dipolo também é influenciado pela temperatura do sistema (FAGUNDES, 2008).

Entende-se pelo processo de polarização em dipolos intrínsecos, dipolos que possuem orientação natural na direção do campo externo aplicado, como pode ser observado na Figura 11.

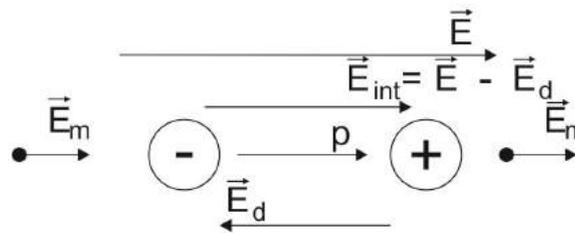
Pode-se observar na Figura 11 um campo elétrico E sendo aplicado em um dipolo elétrico. Nota-se a existência de quatro campos elétricos. O processo acontece da seguinte forma, inicialmente é aplicado o campo externo E , o dipolo produz internamente um campo

Figura 10 – Alinhamento dos momentos de dipolo devido a ação um campo elétrico externo.



Fonte: próprio autor.

Figura 11 – Um dipolo elétrico intrínseco submetido a aplicação do campo externo.



Fonte: próprio autor.

macroscópico resultante E_d (resultado da soma vetorial dos campos elétricos gerados por cada dipolo) contrário ao campo externo E e ao momento do dipolo p , assim existe um campo total macroscópico E_{int} resultante da diferença entre o campo externo E e o campo macroscópico resultante E_d , no entanto o próprio dipolo produz através de suas cargas (positivas e negativas) um campo elétrico externo microscópico E_m que é o campo elétrico que atua sobre o dipolo intrinsecamente.

2.2.3 Potencial Elétrico

Da mesma forma que o campo elétrico, o potencial elétrico é uma propriedade característica das cargas geradores. Potencial e campo elétrico são relacionados pela Equação 2.1.

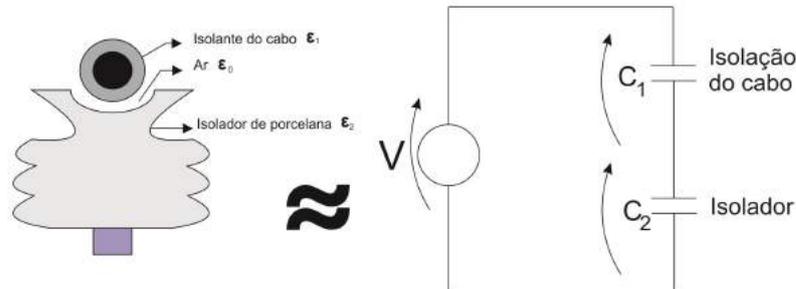
$$\vec{E} = -\nabla V \tag{2.1}$$

Em que:

- E - intensidade de campo elétrico em $[V/m]$.
- V - potencial elétrico $[V]$.

É interessante saber que o potencial sofre variações dependendo dos materiais existentes num sistema (MACHADO, 2000). Na Figura 12 pode-se verificar o efeito do emprego de diferentes dielétricos, como no caso de um cabo coberto sobre isolador. Assim, tem-se o circuito análogo de um isolador e seu condutor coberto. Através do circuito ilustrativo, se vê que a tensão é aplicada a dois capacitores em série, caracterizando um divisor capacitivo.

Figura 12 – Cabo coberto e isolador com diferentes dielétricos.



Fonte: Autor

Os valores das tensões aplicadas na isolação do cabo e no isolador são dados pelas Equações (2.2) e (2.3).

$$V_{C1} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V \quad (2.2)$$

$$V_{C2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V \quad (2.3)$$

Dividindo a tensão no capacitor 1 pela tensão no capacitor 2:

$$\frac{V_{C1}}{V_{C2}} = \frac{C_2}{C_1} \quad (2.4)$$

Mas para um caso de capacitor de placas paralelas com dielétricos as expressões das capacitâncias da isolação do cabo e do isolador são dadas, respectivamente, pelas equações (2.5) e (2.6).

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 A}{d} \quad (2.5)$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_2 A}{d} \quad (2.6)$$

Onde,

- A - Área de uma placa de um capacitor de placas paralelas [m^2];
- d - distância entre as placas de um capacitor de placas paralelas [m];
- ϵ_1 - permissividade da isolação do cabo [F/m];
- ϵ_2 - permissividade do isolador de porcelana [F/m];

Relacionando as equações (2.5) e (2.6) temos:

$$\frac{V_{C1}}{V_{C2}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.7)$$

Logo, considerando o isolante do cabo a base de polietileno ($\epsilon_1 = 2,3$) e o isolador de porcelana ($\epsilon_2 = 8$) os potenciais elétricos obedeceriam, aproximadamente, a seguinte relação $V_1 = 4V_2$, onde o potencial V_1 é aplicado no isolante do cabo e V_2 no isolador de porcelana. Assim, pode-se verificar que a maior parte de potencial é aplicado sobre o isolante do cabo, o que pode contribuir para acelerar o processo de trilhamento elétrico no cabo.

Vale ressaltar que, para contornar este efeito de concentração de potencial na cobertura do condutor ou no isolante, o material que constitui o isolante e a cobertura do cabo condutor devem ser o mesmo.

2.2.4 Distribuição de Potencial e Campo Elétrico em Dielétricos

O cálculo da distribuição de potencial e do campo elétrico em estruturas isolantes possui diversas aplicações, tais como: determinação dos níveis de estresse ao longo do isolador (PROJECT-EHV, 1968); projeto de isoladores, cerâmicos e não-cerâmicos, em linhas de transmissão (BASAVARAJA; SIVAKUMAR, 2012); determinação da melhor geometria dos anéis equalizadores em cadeias de isoladores de alta tensão (BARROS; FERREIRA; COSTA, 2013); estudo da influência da poluição, ou neve, em cadeias de isoladores (BEZERRA et al., 2003), (VOLAT, 2013), (ASENJO; MORALES; VALDENEGRO, 1997); determinação da tensão de ensaios (VILAR et al., 2012), e outros. A determinação da distribuição de potencial e campo eletrostático na superfície dos isoladores é um problema de "valor de contorno", sendo dessa forma informados os valores de potencial sobre a fronteira de algumas regiões do objeto

estudado que permite a determinação do potencial em pontos que não possuem condições de contorno estabelecidos (LOPES, 2016).

Os problemas de eletrostática são modelados por softwares através da Equação (2.8) de Poisson e da Equação (2.9) de Laplace, que são utilizadas para a determinação do potencial ao longo de todo o problema (superfície, interior e meio envolvente).

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.8)$$

onde:

- ρ_v - densidade volumétrica de carga [C/m^3];
- ϵ - permissividade do material [F/m];
- V - potencial elétrico [V].

Se a região não contém carga livre, isso é, $\rho_v = 0$, então a equação de Poisson se torna equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.9)$$

O potencial elétrico é calculado primeiro para então depois extrair-se o campo elétrico através do gradiente do potencial, visto que essas grandezas estão diretamente relacionadas, como mostrado na Equação (2.1) (LOPES, 2016).

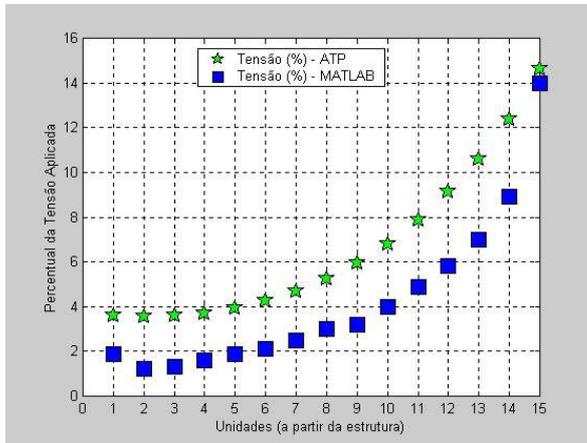
O estudo do potencial é imprescindível, pois o nível de tensão elétrica sofre variações ao decorrer da sua distância de escoamento (distância entre o ponto de maior potencial ao de menor), desse modo, o estudo facilita a visualização da região de maior estresse elétrico do dielétrico (LOPES, 2016). A seguir são apresentados exemplos de distribuições de potenciais em estruturas isolantes (Figuras 13 e 14).

A Figura 13 a) mostra a evolução da tensão percentual, da cadeia mais distante até a mais próxima do condutor, em cada intervalo de isoladores de uma cadeia com 16 unidades, plotadas no matlab (quadrado de cor azul) e ATP (estrela de cor verde). A Figura 13 b) mostra a distribuição de potencial elétrico da campânula ao pino, percorrendo toda distância de escoamento do isolador padrão de suspensão.

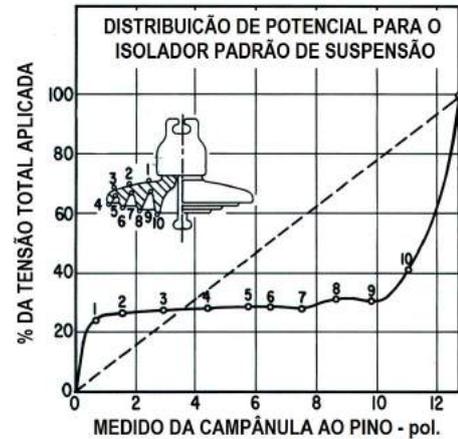
A Figura 14 a) mostra a distribuição de potencial elétrico ao longo da distância de escoamento de um isolador polimérico. A Figura 14 b) mostra o campo elétrico ao longo da distância de escoamento de um isolador polimérico.

Figura 13 – Exemplos de distribuição de potencial em isoladores de vidro.

(a) Tensão percentual em cadeia com 16 unidades



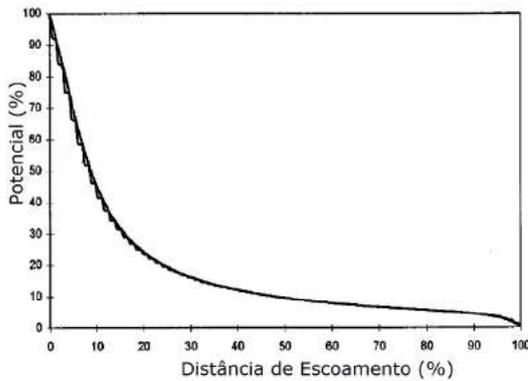
(b) Uma unidade de isolador de vidro



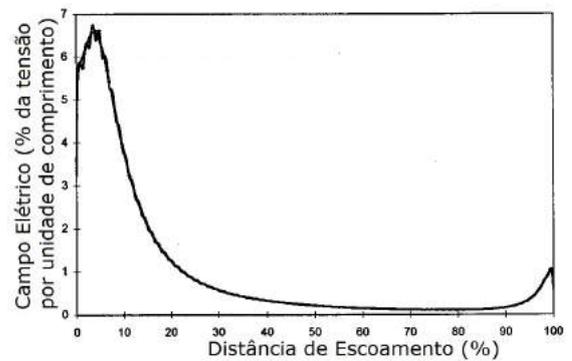
Fonte: (a)(BEZERRA et al., 2003), (b) adaptado de (PROJECT-EHV, 1968).

Figura 14 – Exemplos de distribuição de potencial e campo elétrico ao longo da distância de escoamento em isoladores poliméricos.

(a) distribuição de potencial



(b) campo elétrico



Fonte: (a) e (b) adaptado de (ZHAO; COMBER, 2000).

2.2.5 Dielétrico Ideal versus Real

Um dielétrico ideal teria uma condutividade zero, ou seja, uma resistência infinita.

Em contrapartida, um dielétrico real quando submetido a campos elétricos, apresenta condutividade elétrica proveniente de correntes de fuga (corrente de fuga volumétrica e superficial). Onde, as correntes de fuga volumétricas estão intrinsecamente relacionadas com a natureza do material, suas impurezas e falhas estruturais. Estas correntes atravessam o corpo material. Já as correntes de fuga superficiais estão vinculadas ao estado de limpeza da superfície do dielétrico, onde pode-se depositar impurezas, como por exemplo em regiões costeiras com deposições de partículas salinas que, junto com a ação da umidade, podem-se criar caminhos condutivos na superfície do isolante.

2.2.6 Perdas nos Materiais Dielétricos

Um outro aspecto que pode ser mencionado sobre os dielétricos é quanto a perda. As perdas nos materiais dielétricos podem ser causadas pela absorção de energia elétrica pelos efeitos friccionais entre os dipolos (mecanismos presentes na polarização), resultantes da polarização direcional (que tem dependência da frequência) e pelas correntes de fuga que passam através do material. Assim, para o caso de tensões alternadas observa-se a partir de certas frequências uma defasagem entre o campo e o estabelecimento dos dipolos. Essa defasagem provoca a dissipação sob forma de calor (LUNA, 2006).

Como suporte ao entendimento, é definido em algumas literaturas o circuito equivalente de um dielétrico (Figura 15) assim como, o diagrama vetorial das correntes e tensões envolvidas (Figura 16) deste circuito (LUNA, 2006). C representa a capacitância, elemento que caracteriza um dielétrico ideal e R a resistência associada às perdas contidas no dielétrico. O circuito apresentado na Figura 15, constitui um dielétrico real. Um dielétrico ideal não absorve energia elétrica e a carga do capacitor é completamente recuperada quando da remoção do campo. Entretanto, um dielétrico real sempre apresenta perdas de energia elétrica.

A potência ativa dissipada pelo circuito equivalente do dielétrico é dada por:

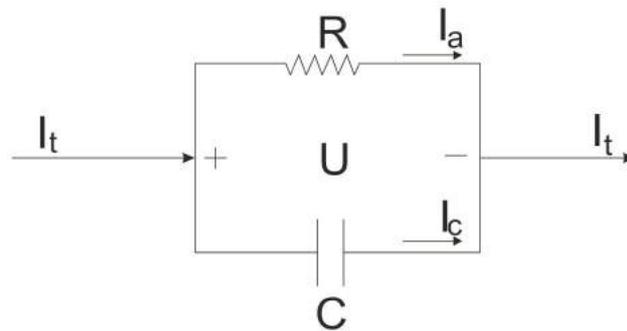
$$P = |U||I_a| \quad (2.10)$$

Sendo,

$$|I_a| = |I_c| \tan \delta \quad (2.11)$$

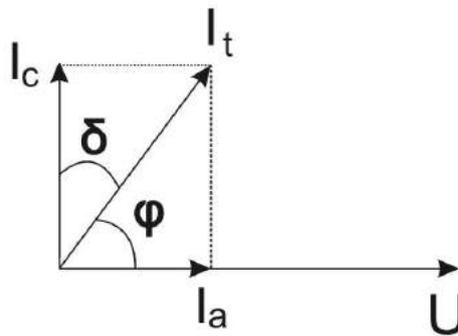
$$|I_c| = \omega |U| C \quad (2.12)$$

Figura 15 – Circuito equivalente de um dielétrico.



Fonte: (LUNA, 2006)

Figura 16 – Diagrama vetorial do circuito equivalente do dielétrico.



Fonte: (LUNA, 2006)

Logo,

$$P = \omega |U|^2 C \tan \delta \quad (2.13)$$

Onde:

- P - potência perdida [W];
- U - tensão aplicada ao dielétrico [V];
- C - capacitância [F];
- I_a - corrente resistiva [A];
- I_c - corrente capacitiva [A];
- δ - ângulo de perdas do dielétrico [graus];

- ω - frequência angular [rad/s].

De acordo com a expressão acima a perda no dielétrico é proporcional à frequência angular do circuito alternado, ao quadrado da tensão aplicada, a capacitância e a tangente do ângulo de perdas, sendo a capacitância proporcional à permissividade relativa ϵ_r , como apresentado na equação 2.14.

$$C = \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (2.14)$$

Onde,

- A - área de uma placa de um capacitor de placas paralelas [m^2];
- d - distância entre as placas de um capacitor de placas paralelas [m];
- ϵ_r - permissividade relativa [F/m];

Através de substituições obtêm-se:

$$P = 2\pi f U^2 \frac{\epsilon_r A}{d} \tan \delta \quad (2.15)$$

Então, vê-se que as perdas P podem ser minimizadas com o uso de materiais isolantes com permissividade baixa e um ângulo de perdas também pequeno. O produto da permissividade relativa com a tangente do ângulo de perda é conhecido como fator de perdas e que caracteriza atributos intrínsecos ao material dielétrico considerado.

A condutividade σ , a permissividade relativa ϵ_r , a tangente do ângulo de perdas $\tan \delta$ e a rigidez dielétrica (campo elétrico máximo suportável pelo dielétrico) são as quatro grandezas por meio das quais caracteriza-se um dielétrico. A permissividade e as perdas são relacionadas diretamente com o processo de polarização. A condutividade e a rigidez dielétrica dependem fortemente da pureza e da estrutura dos materiais (LUNA, 2006).

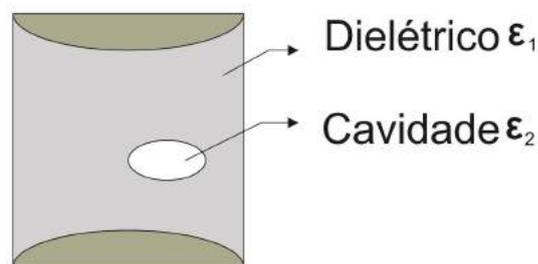
2.2.7 Corrente de Fuga

A corrente de fuga representa o fluxo de corrente indesejado em um circuito elétrico. O crescente depósito condutivo em um isolador decorrente de poluição que se fixa na superfície de um isolador propicia o surgimento de caminhos de correntes elétricas também superficiais. Estas correntes são denominadas correntes de fuga, e percorrem o caminho entre o condutor de alta tensão e o potencial de terra. Apesar destas correntes serem da ordem de algumas dezenas de miliampéres, quando multiplicadas pelo número de isoladores pertencentes a uma zona de alimentação e acrescidas da corrente normal da linha, podem alcançar valores elevados suficientes para acionar os dispositivos de proteção contra sobrecorrente, provocando interrupções no fornecimento de energia elétrica àquela região (WERNECK et al., 2003).

2.2.8 Descargas Parciais

Descargas parciais internas nos isolantes ocorrem devido à existência de micro vazios ou à heterogeneidade do material com pontos de elevada condutividade, ou ainda, nas imperfeições das interfaces de isolantes dispostos em camadas, tal como ocorre nos pontos de defeitos nos semicondutores junto ao isolante. Esses defeitos levam à concentração das linhas de campo elétrico nas suas proximidades. Essa concentração de linhas de campo dá início ao processo de descargas parciais que degradam as cavidades internas do dielétrico até a sua perfuração. A Figura 17 apresenta exemplos de cavidade dentro de um dielétrico.

Figura 17 – Exemplo de cavidade dentro de um dielétrico.



Fonte: próprio autor.

A partir das equações 2.1 e 2.7, pode-se obter a relação entre campo elétrico com diferentes permissividades.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (2.16)$$

Onde:

- E_1 - campo elétrico no dielétrico 1 [V/m];
- E_2 - campo elétrico no dielétrico 2 [V/m];
- ϵ_1 - permissividade do dielétrico 1 [F/m];
- ϵ_2 - permissividade do dielétrico 2 [F/m].

Ou seja, sendo a cavidade formada por uma bolha de ar, com permissividade próxima do vácuo, ($\epsilon_2=\epsilon_0$) e admitindo que o dielétrico seja de polietileno ($\epsilon_1=3\epsilon_0$), tem-se $E_2=3E_1$. Portanto, existe uma concentração de campo elétrico maior na cavidade existente no dielétrico.

A descarga parcial superficial é a que ocorre na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo para a superfície. Quando o campo elétrico paralelo

à superfície excede valor crítico, inicia-se o processo de descarga superficial. Assim como as descargas internas, as descargas superficiais ocasionam alterações na superfície iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores conhecidos como trilhamento também podem levar o isolamento à ruptura total.

2.2.9 Trilhamento Elétrico

O trilhamento elétrico é um fenômeno de envelhecimento superficial do dielétrico que produz trilhas elétricas como resultado da ação de descargas elétricas próximas ou na superfície do material polimérico (PINHEIRO, 2008).

O alto valor de resistividade superficial dos polímeros empregados nas redes compactas limita a circulação de correntes superficiais chegando apenas a dezenas de microampéres. Entretanto, devido às condições de multi-estressamento pode ocorrer a redução da resistência superficial. Assim, a distribuição do campo elétrico torna-se não homogênea provocando aumento nas correntes superficiais podendo causar a carbonização do material e a formação de trilhas.

O trilhamento e a erosão ocorrem principalmente em locais onde ocorre aumento do campo elétrico ou drenagem de correntes, por exemplo, apoio dos cabos fase nos isoladores ou espaçadores, apoio dos espaçadores no cabo mensageiro aterrado, partes metálicas em contato com a cobertura de cabo fase. A Figura 18 mostra exemplos dessas situações.

Figura 18 – Trilhamento elétrico.



Fonte: (PINHEIRO, 2008)

2.2.10 Arborescência Elétrica

O fenômeno de pré-ruptura está associado principalmente à existência de vazios e impurezas no interior da isolação e com a ocorrência de descargas parciais quando o dielétrico está submetido a um campo elétrico. As descargas parciais causam o aquecimento de pontos localizados. Esse processo de degradação é reconhecido pela formação de canais, a partir do ponto de origem, que apresentam a forma de uma arborescência (as chamadas de arborescências elétricas), como pode ser visto nas representações apresentadas na Figura 19.

Figura 19 – Representação de arborescência.



Fonte: (DUARTE, 2001)

As arborescências elétricas produzem cavidades em forma de canais, com encaminhamento paralelo ao campo elétrico aplicado, e são resultantes da decomposição do material. Este fenômeno pode ser controlado quando são aprimoradas as técnicas de produção do material isolantes, como a tripla extrusão, limpeza do material e do processamento, e a injeção de aditivos que inibem reações iônicas necessárias ao desenvolvimento da arborescência.

2.3 Ensaios em Isolantes

Alguns ensaios de envelhecimento acelerado foram desenvolvidos nos últimos anos, dentre estes, os principais serão descritos a seguir. Os ensaios ainda possuem dificuldades de reproduzir o envelhecimento em campo com fidelidade, sendo assim, pesquisas, contando com colaborações de organizações como CIGRE e IEEE, ainda estão sendo desenvolvidas para encontrar a melhor metodologia de ensaio para cada tipo de material e aplicação.

2.3.1 Ensaio de Névoa Salina

O ensaio de névoa salina consiste na utilização de bicos pulverizadores especiais colocados em paralelo ao isolador, enquanto é aplicada tensão no mesmo, por um período de no máximo 100 minutos consecutivos. Toda medição da poluição é baseada segundo norma técnica IEC 60507. Vale salientar que, o processo de umedecer os isoladores poliméricos é menos

eficiente do que nos de porcelana, deve-se utilizar uma névoa mais concentrada nos isoladores poliméricos hidrofóbicos. Um outro fator importante para a análise é tempo de repouso, tempo entre a deposição da poluição e a aplicação de tensão (NADERIAN; SANAYE; MOHSENI, 2004).

O fluxo de água que forma a névoa e a velocidade com que atinge a superfície do material tem um forte impacto no aparecimento das correntes de fuga mesmo quando o estresse elétrico é mantido no mesmo nível. Observa-se também que a temperatura ambiente tem significativa influência na solubilidade dos sais na névoa e isto, influencia nos resultados dos testes de descarga disruptiva (HACKAM, 1999).

Esse tipo de ensaio em isoladores de silicone mostra que o envelhecimento é afetado pela salinidade da névoa. A presença de alta salinidade produz menor envelhecimento comparado à baixa, sendo verificado que, a água com grande quantidade de sal forma uma fina camada condutora na superfície do isolador, reduzindo a ocorrência de arcos elétricos no material (KARADY; SCHNEIDER; RISK, 1994).

Vale salientar que o ensaio de névoa salina ainda não possui uma normatização estabelecida para todo tipo de isolante.

2.3.2 Ensaio de Névoa Limpa

No ensaio de névoa limpa a superfície do material é artificialmente contaminada antes de ser submetido a ação da névoa limpa (com baixa condutividade) e à tensão (IEC60507, 1991). A superfície contaminada torna-se hidrofílica inicialmente, mas, após um período de repouso, volta a ser hidrofóbica. A resistência da superfície e a tensão de descarga aumentam à medida que aumenta o tempo após a contaminação.

Os materiais artificiais mais utilizados para contaminação são: Tonoko™, Kaolin e Aerosil™. Tonoko™ é um pó argiloso, constituído por SiO_2 (58 a 76%), Al_2O_3 (14 a 30%) e Fe_2O_3 (2 a 6%). Tipicamente, as partículas são de 6,2 μm com densidade em torno de 2,76 g/cm^3 , e são misturadas com água destilada. O Kaolin apresenta-se com partículas de tamanho da ordem de 5,8 μm , densidade de 2,6 g/cm^3 e composição de SiO_2 (46%), Al_2O_3 (37%) e Fe_2O_3 (0,9%). As superfícies contaminadas por Kaolin são relativamente mais uniformes, devido ao fato de que o Kaolin é mais hidrofílico, enquanto que o Tonoko™, por apresentar mais SiO_2 , é mais hidrofóbico (HACKAM, 1999), (IEC60507, 1991).

2.3.3 Ensaio de Trilhamento Elétrico

O ensaio de trilhamento elétrico é utilizado para avaliar a resistência ao trilhamento e à erosão dos materiais poliméricos. Existem vários métodos de ensaios de verificação da resistência ao trilhamento elétrico e à erosão propostos.

Na existência de contaminação que surge sob o material a partir da atmosfera, na forma de poluição, e uma camada úmida que promove um filme contínuo, com baixa resistividade superficial, cria-se condições para fluir correntes entre pontos com diferentes potenciais. Esta baixa resistividade superficial implica em uma alta corrente superficial e alta dissipação de calor, causando a evaporação do filme contínuo de água e poluição. Como esta evaporação da solução não é uniforme, ocorre a formação de bandas secas, que interrompem a corrente superficial resultando assim, um aumento das tensões elétricas nestas regiões, suficiente para iniciar a ocorrência de descargas na superfície do material que causam a formação de erosão e trilhas de material orgânico condutor, como o carbono. A ruptura completa da superfície do material ocorre quando uma trilha desses materiais orgânicos propaga-se por toda extensão do material (SILVA, 2014).

2.4 Método dos Elementos Finitos

O conhecimento a respeito de ferramentas com o poder de mostrar campo elétrico e distribuição de potencial é imprescindível para poder se observar características distintas de diferentes espaçadores.

2.4.1 Conceito Básico do Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno, e com condições iniciais (para problemas variáveis no tempo). O MEF é bastante genérico, e pode ser aplicado na solução de inúmeros problemas da engenharia (SOUZA, 2003).

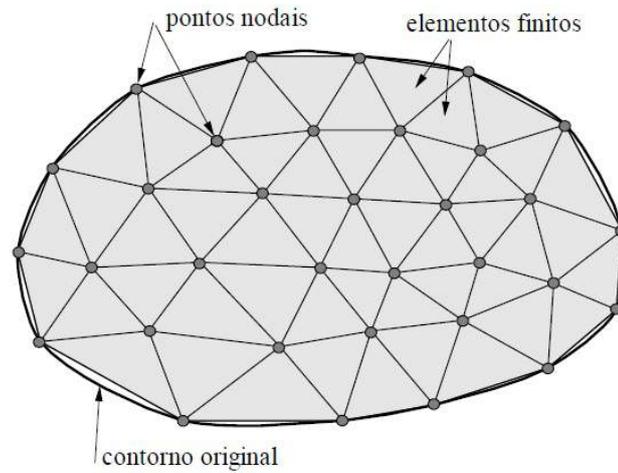
A ideia do MEF é dividir o domínio do problema em sub-regiões de geometria simples com formatos triangular, quadrilateral, cúbico e outros. A Figura 20 ilustra a situação.

Assim como no cálculo diferencial e integral os elementos utilizados são infinitesimais, as sub-regiões representam dimensões finitas, e assim elas foram denominadas "elementos finitos". Os elementos finitos utilizados na discretização (subdivisão) do domínio do problema são conectados entre si através de determinados pontos, denominados nós ou pontos nodais, e ao conjunto de elementos finitos e pontos nodais, dá-se, usualmente o nome de malha (mesh) de elementos finitos (SOUZA, 2003).

Os elementos finitos apresentam formas geométricas diversas (por exemplo, triangular, quadrilateral, cúbico, etc) em função do tipo e da dimensão do problema (se uni, bi, ou tridimensional). A Figura 21 apresenta a geometria de alguns tipos de elementos finitos (SOUZA, 2003).

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo

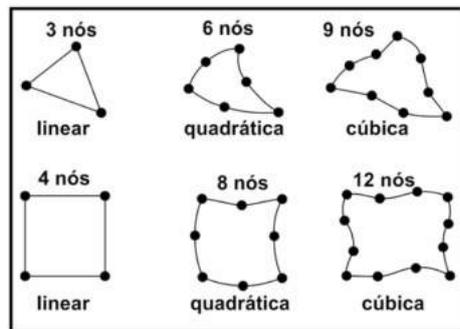
Figura 20 – Malha simples de elementos finitos.



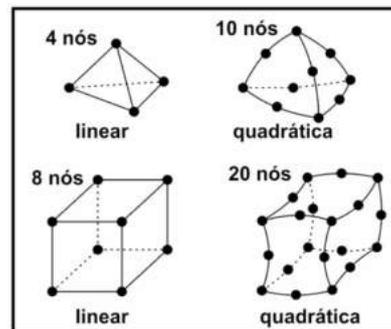
Fonte: (SOUZA, 2003).

Figura 21 – Elementos finitos mais usuais.

(a) para 2D.



(b) para 3D.



Fonte: (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora trata-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, à medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e consequentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise (SOUZA, 2003).

2.4.2 Malha do Método dos Elementos Finitos

A aplicação da técnica dos elementos finitos possui quatro etapas básicas: a discretização, a derivação de equações que governam um elemento, a montagem de todos os elementos na região da solução e a solução do sistema de equações (SILVA, 2013) (PUC-MINAS,).

A malha deve representar a geometria de forma precisa, além de possibilitar a resolução das equações diferenciais, sendo assim os elementos devem ter sua geometria mais perfeita possível. A malha pode ser grosseira ou refinada, no primeiro caso se possui poucos elementos de modo que a representação possui uma menor fidelidade do caso estudado. No segundo caso são empregados muitos elementos e uma representação mais fiel, entretanto quanto maior o nível de refinamento, maior será o esforço computacional, sendo assim a malha deve ser construída se optando pelo número de elementos e o tipo mais adequado para cada caso de maneira que possa encontrar resultados mais próximos dos reais (SILVA, 2013).

Após a criação da malha, cada elemento é analisado individualmente através das equações que modelam cada caso em estudo. Dada a complexidade das geometrias estudadas, as malhas possuem milhares de elementos finitos, sendo necessário auxílio computacional na resolução dos problemas. Os softwares que utilizam elementos finitos possuem três etapas (SILVA, 2013):

- 1) pré-processamento: envolve a divisão do domínio em elementos finitos, podendo ter uma, duas ou três dimensões (PUC-MINAS,);
- 2) processamento: após obter as equações para os elementos individuais, estas equações devem ser colocadas juntas, de modo a caracterizar o sistema inteiro. Em seguida teremos a resolução dessas equações utilizando métodos numéricos (PUC-MINAS,);
- 3) pós- processamento: Obtida solução do sistema, que será exibida na forma de tabelas ou gráficos (PUC-MINAS,).

3 Análise Computacional nos Espaçadores

Neste capítulo são abordados dois modelos computacionais utilizados, suas aplicações, adaptações realizadas e resultados de simulação nos espaçadores X e Y.

3.1 Modelos Computacionais Utilizados

Os modelos computacionais utilizados são dois: O primeiro é o da Análise da Distribuição de Potencial, onde busca-se explorar as distribuições de potencial e campo elétrico em geometrias diversas; este modelo foi desenvolvido por Lopes (LOPES, 2016) embasado em pesquisas anteriores ((BEZERRA, 2004), (XAVIER, 2015) e (VOLAT, 2013)); o segundo modelo computacional utilizado busca determinar a tensão de descarga em função do nível da poluição; a partir deste modelo, busca-se determinar a tensão que provoca a descarga total do espaçador em 50% das aplicações de tensão para que venha ocorrer o *flashover*; este segundo modelo foi matematicamente desenvolvido por Rizk (RIZK, 1981) e adaptado computacionalmente por Sundararajan (R.SUNDARARAJAN; GORUR, 1991) com contribuições de Bezerra (BEZERRA, 2004). Ambos os modelos foram aplicados aos espaçadores X e Y com as situações de ensaios laboratoriais adaptadas. Os resultados das simulações realizadas que utilizam estes dois modelos adaptados são apresentados neste capítulo.

3.1.1 Análise da Distribuição de Potencial

Foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics no modelo da análise da distribuição de potencial. Esse software de análise e resolução através de elementos finitos, tem uma ampla aplicação em engenharia e na física. As ferramentas computacionais AutoCAD e Matlab, também são utilizadas em conjunto com o *software* COMSOL Multiphysics. Utilizou-se o Módulo de Eletrostática, pertencente ao pacote de físicas denominado AC/DC do COMSOL, em regime variante no tempo, visto que as tensões aplicadas nestas simulações são grandezas senoidais.

Para a determinação da distribuição de potencial e campo elétrico é utilizado o módulo eletrostática. O espaço de simulação foi definido segundo as pesquisas dos autores (BEZERRA, 2004) e (XAVIER, 2015) e, as condições de contorno nos limites do entorno adotadas foram uma condição de Dirichlet com valor de zero volt.

O modelo implementado considerando isoladores poliméricos (LOPES, 2016) teve sua versão original implementada para isoladores de vidro (VOLAT, 2013). Este modelo leva em consideração que a camada de poluição é consideravelmente fina, e que a corrente de condução e a densidade de corrente de deslocamento no isolador podem ser consideradas uniformes. Desta maneira, a aproximação desta camada por uma superfície condutiva pode

ser realizada. Baseado nessas premissas e em outros autores (VOLAT, 2013), a presença da poluição pode ser modelada como uma condição de contorno, entre a superfície do espaçador e do ar levando à Equação (3.1), vale salientar que as Equações (3.1) e (3.2) decorrem das equações de maxwell, onde mais detalhes sobre elas podem ser observados nos artigos "Solution of Low Frequency Complex Fields in Polluted Insulators by Means of the Finite Element Method"(ASENJO; MORALES; VALDENEGRO, 1997) e "Comparison Between the Use of Surface and Volume Conductivity to Compute Potential Distribution along an Insulator in Presence of a Thin Conductive Layer"(VOLAT, 2013).

$$d(\sigma_v + j\omega\epsilon)\nabla^2 V + j\omega\rho_s = 0 \quad (3.1)$$

Onde:

- $d[m]$ - Espessura da camada de poluição;
- $\sigma_v[S/m]$ - condutividade da poluição;
- $\omega[rad/s]$ - frequência de operação da rede vezes 2π rad;
- $\epsilon[F/m]$ - permissividade absoluta da poluição;
- $\rho_s[C/m^2]$ - densidade superficial de carga;
- $V[V]$ - potencial elétrico.

Considerando que o valor da densidade superficial de carga ao longo do dielétrico é zero, a equação 3.1 resulta na seguinte equação diferencial parcial (ASENJO; MORALES; VALDENEGRO, 1997):

$$d(\sigma_v + j\omega\epsilon)\nabla^2 V = 0 \quad (3.2)$$

Através do software AutoCAD, foi desenvolvido o modelo do espaçador empregado no estudo; em seguida, este modelo foi exportado para o COMSOL Multiphysics juntamente com os condutores e imerso no ar.

3.1.2 Determinação da Tensão de Descarga em Função do Nível de Poluição

Foi utilizado o *software* Matlab no modelo da determinação da tensão de descarga em função do nível de poluição. Para o Matlab foi importado o perfil do setor do espaçador em análise, para que o mesmo possa obter as distâncias de escoamento e para então gerar a curva de tensão que provoca a descarga total do espaçador em 50% das aplicações de tensão que causam *flashover*. Nesta rotina são calculados os valores de tensão, em função do nível da poluição depositada, estando o mesmo submetido à névoa limpa (umidade saturada).

Este modelo dinâmico descrito e proposto por Rizk (RIZK, 1981) e adaptado computacionalmente por Sundararajan (R.SUNDARARAJAN; GORUR, 1991) com contribuições de Bezerra (BEZERRA, 2004), foi escolhido pois o mesmo apresenta uma precisão significativa, além de sua fácil implementação. O modelo foi implementado seguindo o fluxograma apresentado na Figura 22.

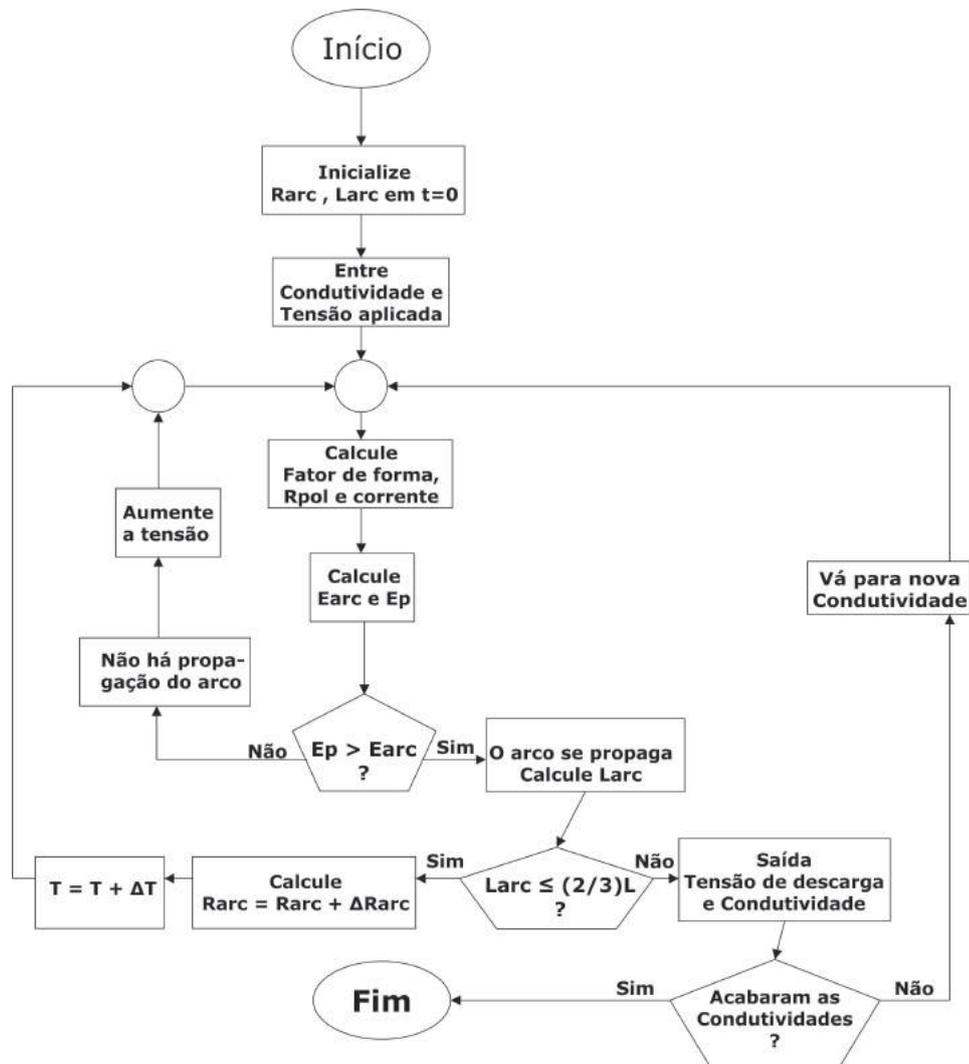


Figura 22 – Modelo Computacional para Cálculo de Tensões de 50%.(BEZERRA, 2004)

O Fluxograma da Figura 22 funciona da seguinte forma: Inicializa-se a rotina com a resistência do arco R_{arc} e com o comprimento do arco L_{arc} , condutividade e tensão aplicada inicial. A rotina calcula o fator de forma, resistência da poluição R_{pol} (calculada a partir do fator de forma do isolante dividido pela condutividade da camada) e a corrente do arco (obtida a partir das tensões aplicadas menos suas quedas, dividindo o resultado desta diferença de tensões pela soma da resistência do arco com a resistência da poluição), para então calcular o gradiente de tensão do arco E_{arc} e o gradiente de tensão da camada poluída E_P . Se o gradiente de tensão do arco E_{arc} for maior que o gradiente de tensão da camada poluída E_P não há propagação do arco, então aumenta-se a tensão e retorna-se este processo, caso contrário o arco se propaga e a rotina calcula o novo comprimento do arco L_{arc} . Caso o comprimento do arco L_{arc} for menor que dois

terços da distância de escoamento L , a rotina recalcula a resistência do arco R_{arc} dando-lhe um incremento e retomando o processo de cálculo de fator de forma e outros. Caso o comprimento do arco L_{arc} for maior ou igual a dois terços da distância de escoamento L a rotina considera que a tensão de flashover foi alcançada e salva os valores (condutividade e tensão de flashover), para então partir para uma nova condutividade. O processo irá finalizar quando varrer todas as condutividades desejadas.

3.2 Aplicação do Modelo Computacional no Comsol

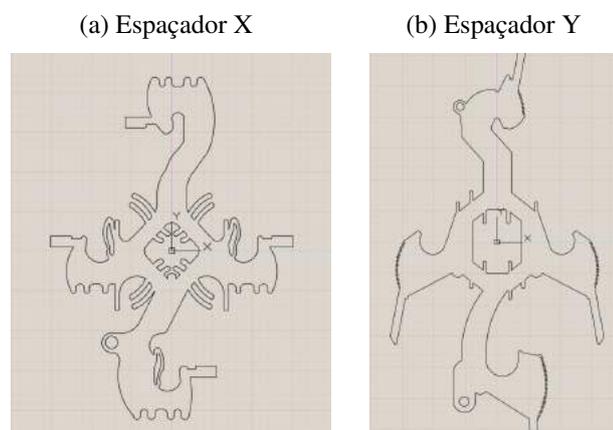
Os desenhos, as definições de materiais, as condições de contorno consideradas, a malha, os resultados de potenciais e de campos elétricos dos espaçadores X e Y, no ambiente computacional do *software* COMSOL Multiphysics, são abordados nas subseções seguintes. Os resultados de suportabilidade para cada fase dos espaçadores, no ambiente computacional de *software* MATLAB, também estão apresentados em subseções seguintes.

3.2.1 Desenhos dos Espaçadores X e Y

Os desenhos simulados no *software* COMSOL Multiphysics são inicialmente, feitos no ambiente do *software* AutoCAD, que por definição possui extensão .dwg. Para importar o desenho para o *software* COMSOL Multiphysics, é necessário converter o arquivo .dwg em um arquivo .dxf.

A Figura 23 mostra os espaçadores X e Y no ambiente do *software* AutoCAD. Os cabos, referentes as fases A,B e C, são inseridos posteriormente no *software* COMSOL Multiphysics, devido a facilidade de implementação.

Figura 23 – Espaçadores X e Y no AutoCAD



Fonte: próprio autor.

3.2.2 Geometria dos Espaçadores no Comsol

A geometria de cada um dos espaçadores está imersa em um quadrado de lado 1840mm , dimensão utilizada em outros trabalhos tais como (XAVIER, 2015). A geometria está envolta de ar e de três condutores fases, e do chamado cabo mensageiro, que está aterrado. É importante lembrar que por similaridade aos ensaios laboratoriais, se considerou como terra a fase B nas simulações onde temos tensões de linha aplicadas ao espaçador.

3.2.3 Definição dos Materiais no Comsol

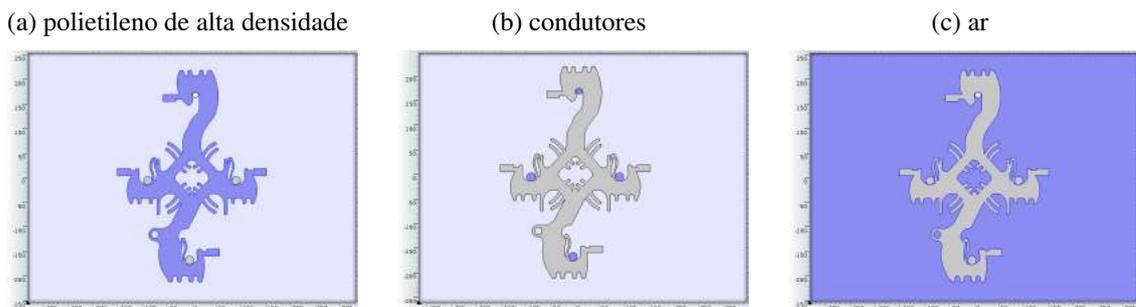
Nas simulações existem três tipos de materiais distintos: Condutores, polietileno de alta densidade e ar. A permissividade destes materiais estão na Tabela 1. Nas Figuras 24 e 25 estão as regiões de cada material utilizado na simulações dos espaçadores X e Y.

Tabela 1 – Valores das permissividades elétricas relativas dos materiais envolvidos.

Material	Permissividade Relativa
Condutores	10^{-6}
Polietileno de alta densidade	2,4
Ar	1

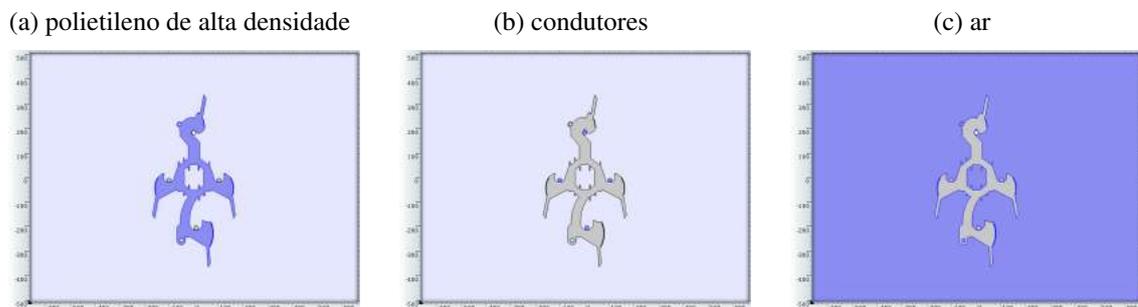
Fonte: próprio autor.

Figura 24 – Em azul escuro estão as regiões de cada material presente na simulação do espaçador X.



Fonte: próprio autor.

Figura 25 – Em azul escuro estão as regiões de cada material presente na simulação do espaçador Y.

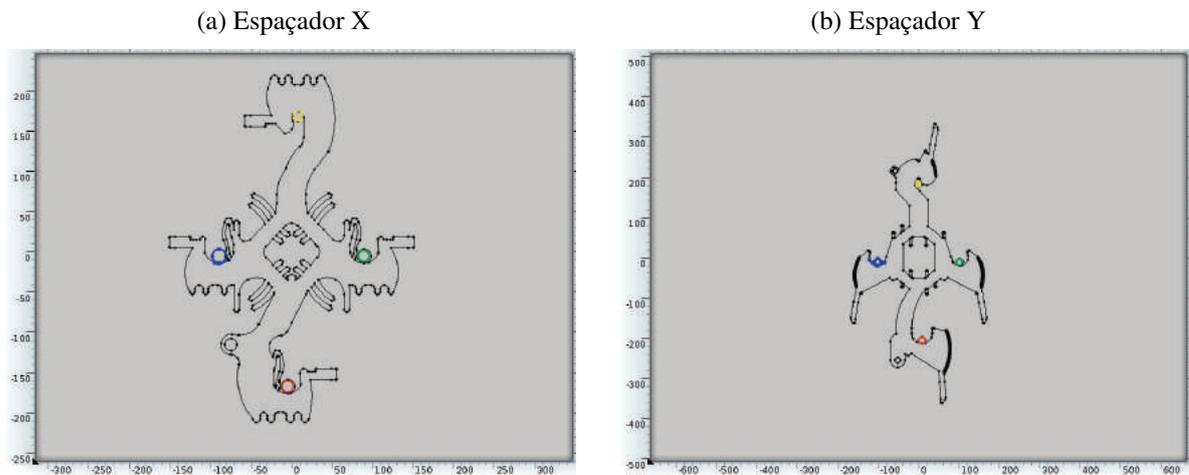


Fonte: próprio autor.

3.2.4 Definição das Condições de Contorno no Comsol

Os espaçadores de redes compactas de distribuição de $13,8kV$ possuem três berços para alojar as três fases e um quarto berço para o cabo terra, também conhecido como cabo mensageiro. É importante salientar que, dada às dificuldades técnicas e financeiras atreladas à realização de ensaios em alta tensão trifásica e, afim de reproduzir simulações nas mesmas condições dos ensaios, foram realizadas simulações também monofásicas. Portanto, nas tensões de linhas existentes entre a fase A e B e fase B e C, adotou-se fase A no máximo, com $20,492kV$ (que é igual a 1,05 do valor da tensão de pico, considerando uma tensão entre fases de $13,8kV$), e fase B como terra, isto para o estudo do setor A-B. Da mesma forma para fase C no máximo, com $20,492kV$, e fase B como terra, isto para o estudo do setor B-C. Para as tensões de fase A e o terra e fase C e o terra, adotou-se fase A no máximo, com $11,831kV$ (que é igual a 1,05 do valor da tensão de pico da tensão de fase-neutro, considerando uma tensão entre fases de $13,8kV$), e fase terra referência e da mesma forma para fase C no máximo, com $11,831kV$, e fase terra referência. Na Figura 26 são mostradas as condições de contorno para os espaçadores X e Y, na cor azul para fase A, na cor vermelha para fase B, na cor verde para a fase C e na cor amarela para o terra. A fase A ou C podem assumir o valor de $20,492kV$, quando a referência é a fase B ou assumir o valor $11,831kV$ quando a referência é o terra.

Figura 26 – Condições de contorno aplicadas no espaçador X e Y.

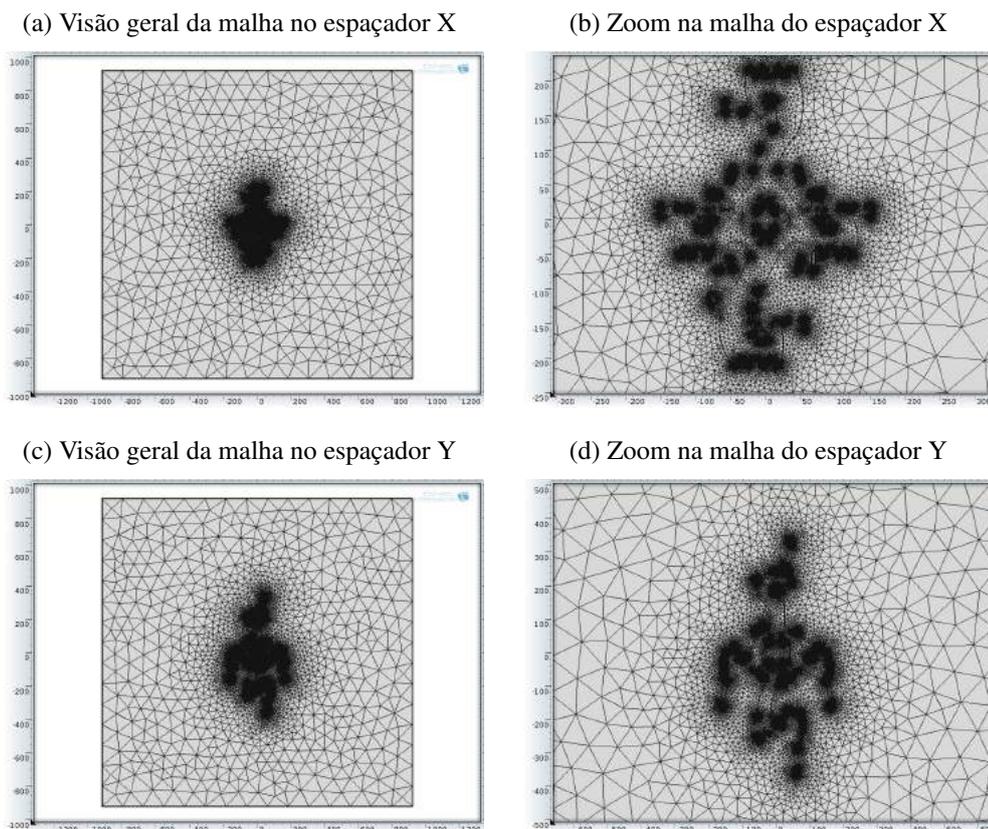


Fonte: próprio autor.

3.2.5 Definição da Malha

Utilizou-se a malha gerada automaticamente pelo COMSOL com refinamento "normal"(de acordo com as possibilidades existentes no software). A malha gerada nos espaçadores X e Y são exibidas na Figura 27. Pode-se observar que o COMSOL gera automaticamente um número muito grande de elementos de malha nas regiões "com pontas" e em locais com mudanças de geometria e de material, isto visando uma maior precisão nos resultados.

Figura 27 – Malhas nos espaçadores X e Y.



Fonte: próprio autor.

3.2.6 Resultados de Simulações no COMSOL

São abordados nesta subseção resultados no COMSOL de potencial e campo elétrico nos setores A-T, C-T, A-B e B-C nas condições ambientais sem poluição, com nível leve de poluição, nível moderado de poluição e nível pesado de poluição dos espaçadores X e Y. Considerou-se a camada de poluição com permissividade relativa de 15 e espessura de 0,1mm, o mesmo valor utilizado por (VOLAT, 2013). A Tabela 2 mostra as condutividades utilizadas para modelar o nível de poluição dos espaçadores X e Y.

Tabela 2 – Parâmetros Utilizados para Modelar o Nível de Poluição (VOLAT, 2013).

Nível de Poluição	Condutividade
Baixo Nível de Poluição	10 nS/m
Médio Nível de Poluição	1 uS/m
Alto Nível de Poluição	$0,1 \text{ mS/m}$

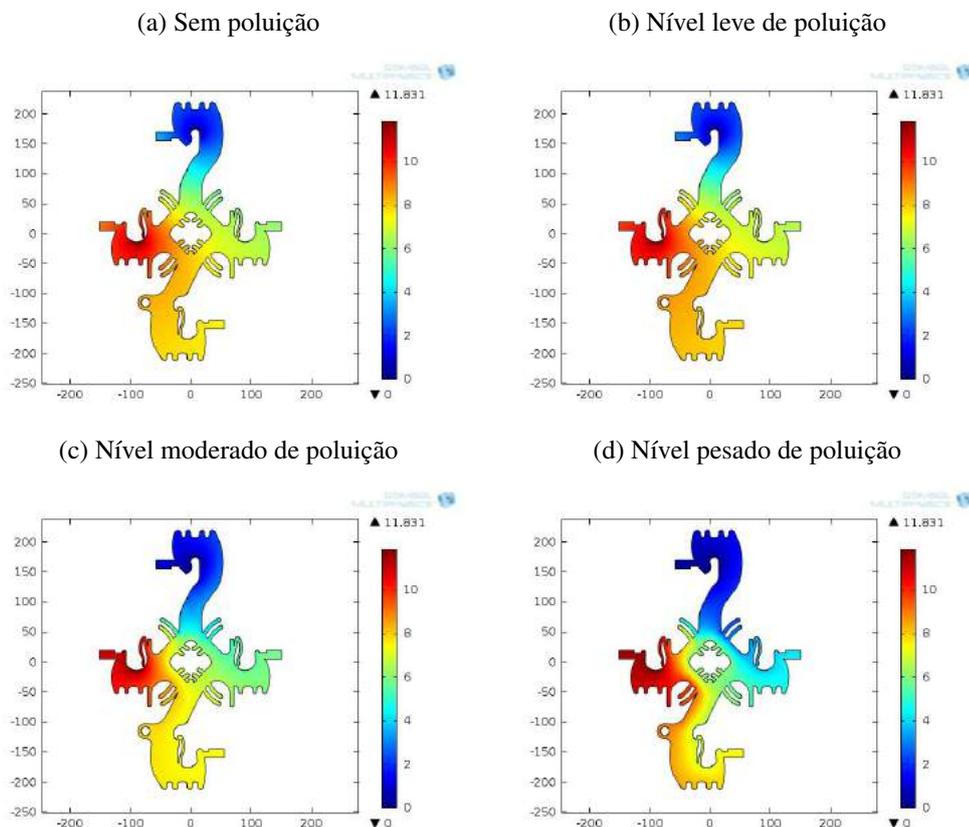
Visando comparar os resultados de simulação com os ensaios monofásicos realizados com Kit de Alta Tensão, as simulações são feitas aplicando tensão a uma única fase. Desta forma, no setor A-T é aplicada tensão de 11,831kV na fase A, e no setor C-T é aplicada tensão

de 11,831kV na fase C, aterra-se o tirante T nestes setores. No setor A-B é aplicada tensão de 20,492kV na fase A, e no setor da B-C é aplicada tensão de 20,492kV na fase C, aterra-se a fase B nestes setores. Por questões de facilidade de arranjo nas montagens de ensaio, escolheu-se a fase B como referência de terra para aplicação da tensão de 20,492kV.

3.2.6.1 Potencial Elétrico no Espaçador X

Na Figura 28 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X na fase A-T, onde a fase A encontra-se com potencial máximo e o mensageiro T está aterrado, em níveis diferentes de poluição. Percebe-se gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase A onde é aplicada a tensão e nas fases próximas, que não estão aterradas, à medida que a poluição se intensifica.

Figura 28 – Potencial elétrico do espaçador X na fase A-T.

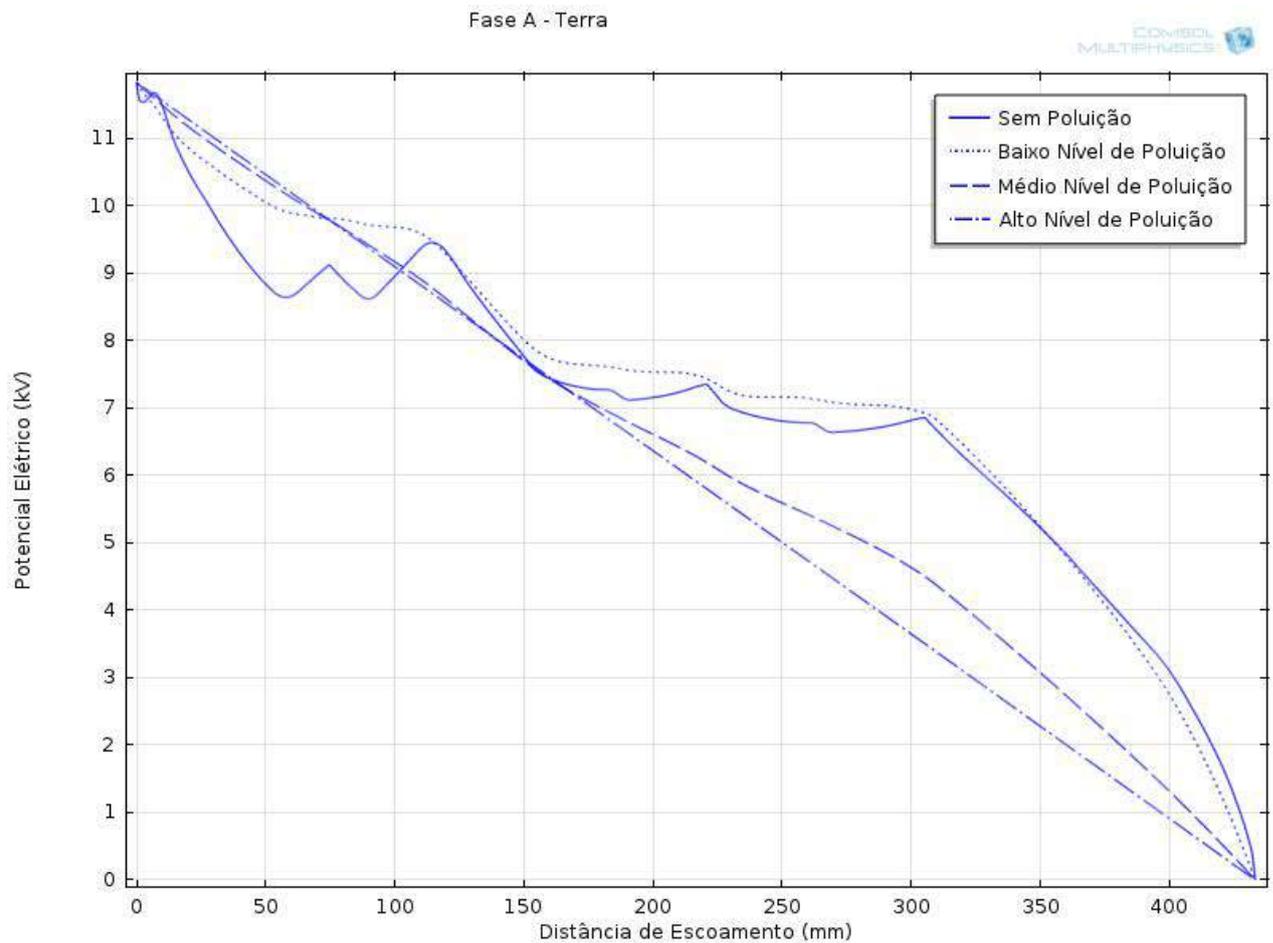


Fonte: próprio autor.

Na Figura 29 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X no setor A-T ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição, partindo do potencial da fase A para o mensageiro T. Pode ser observado nesta Figura 29 que, com o aumento do nível de poluição, o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna uma reta. Este comportamento resistivo do potencial elétrico ao longo da distância de escoamento com o

aumento da poluição; e isto é como previsto na literatura (LUNA, 2006), onde é dito que "Os dielétricos tem comportamento resistivo e capacitivo, mas à medida que a poluição aumenta, o comportamento resistivo prevalece."

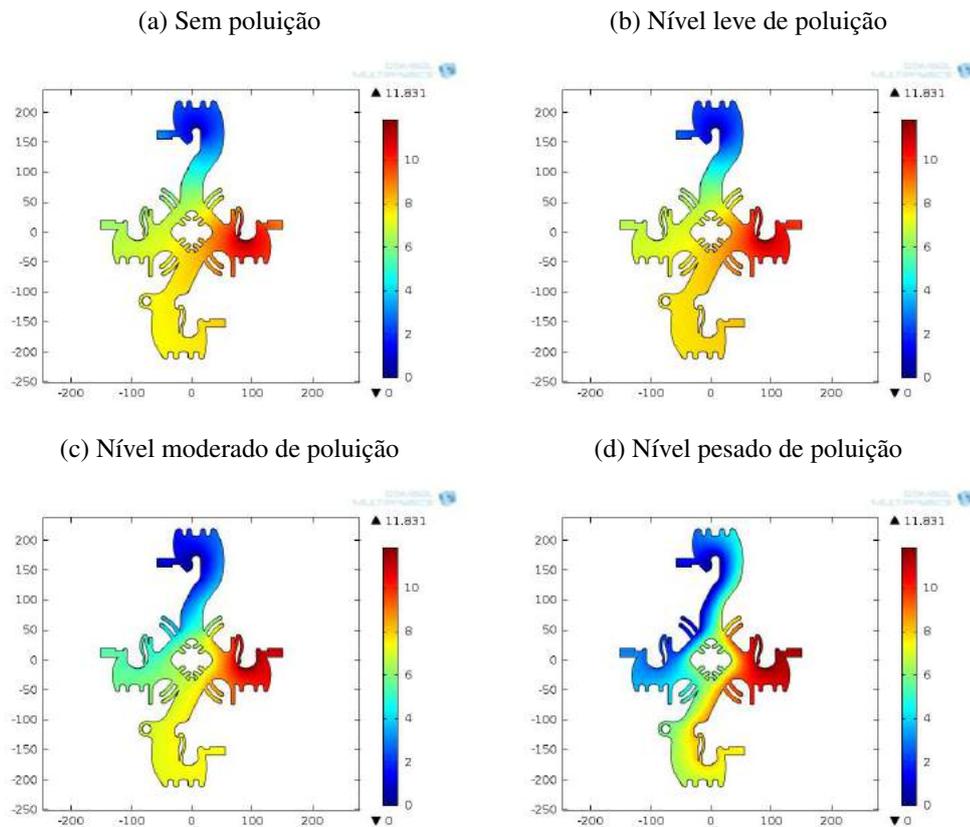
Figura 29 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor A-T



Fonte: próprio autor.

Na Figura 30 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X na fase C-T em níveis diferentes de poluição. Percebe-se gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase C onde é aplicada a tensão e nas fases próximas, que não estão aterradas, à medida que a poluição se torna mais intensa.

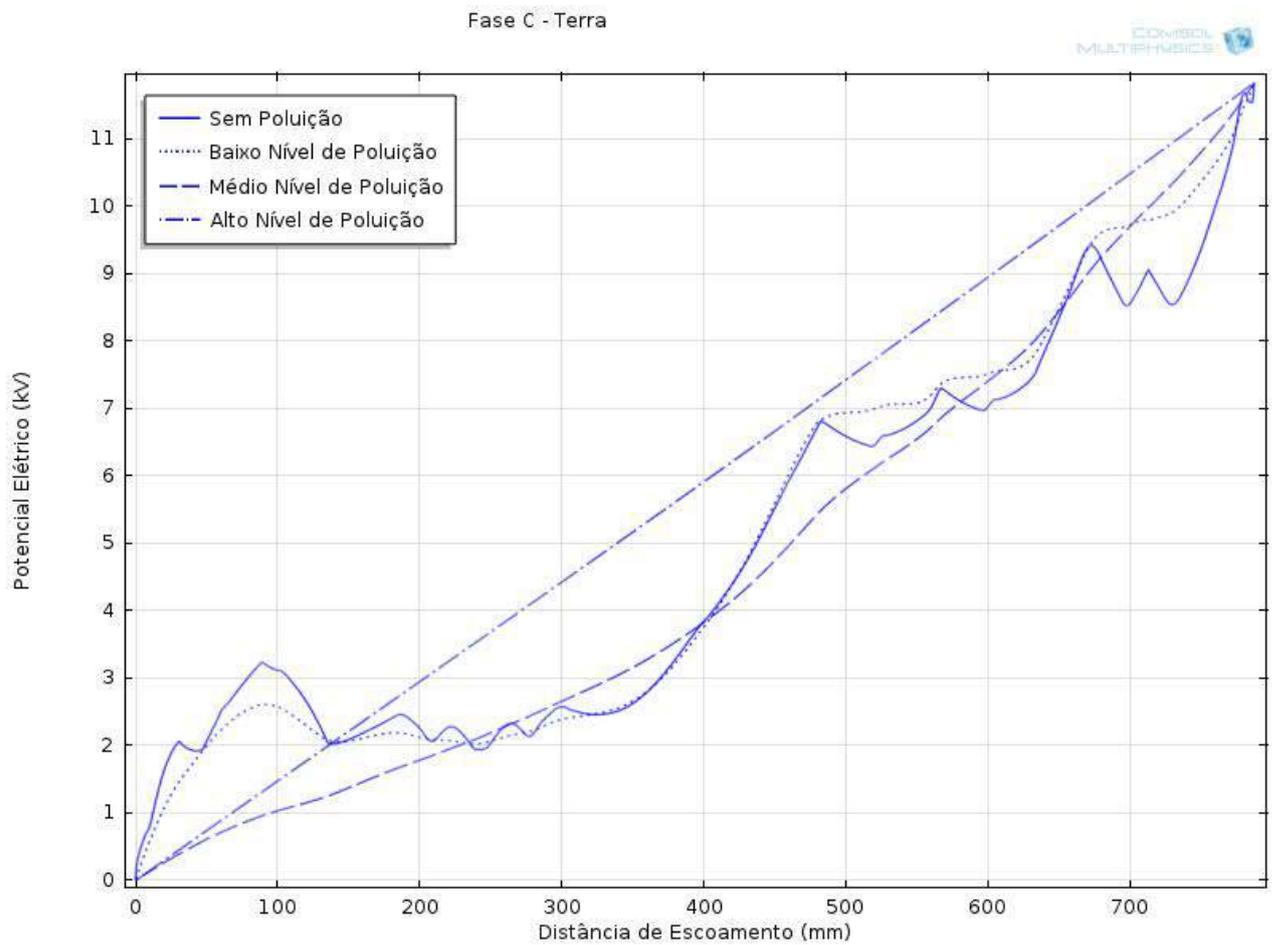
Figura 30 – Potencial elétrico do espaçador X na fase C-T.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 31 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X no setor C-T ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição, partindo do mensageiro T para a fase C. Pode ser observado também nesta Figura 31 que, com o aumento do nível de poluição, o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando a prevalência do comportamento resistivo.

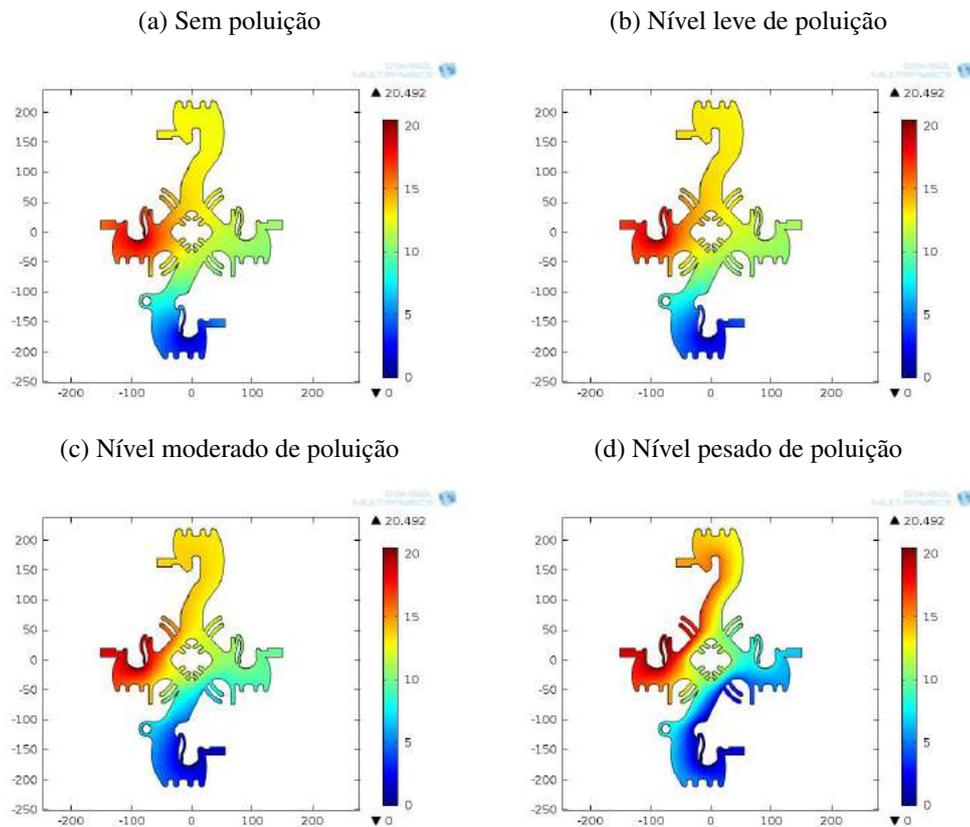
Figura 31 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor C-T



Fonte: próprio autor.

Na Figura 32 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X na fase A-B em níveis diferentes de poluição. Também é registrado na Figura 32 gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase A onde é aplicada a tensão e nas fases próximas, que não estão aterradas, à medida que a poluição se torna mais intensa.

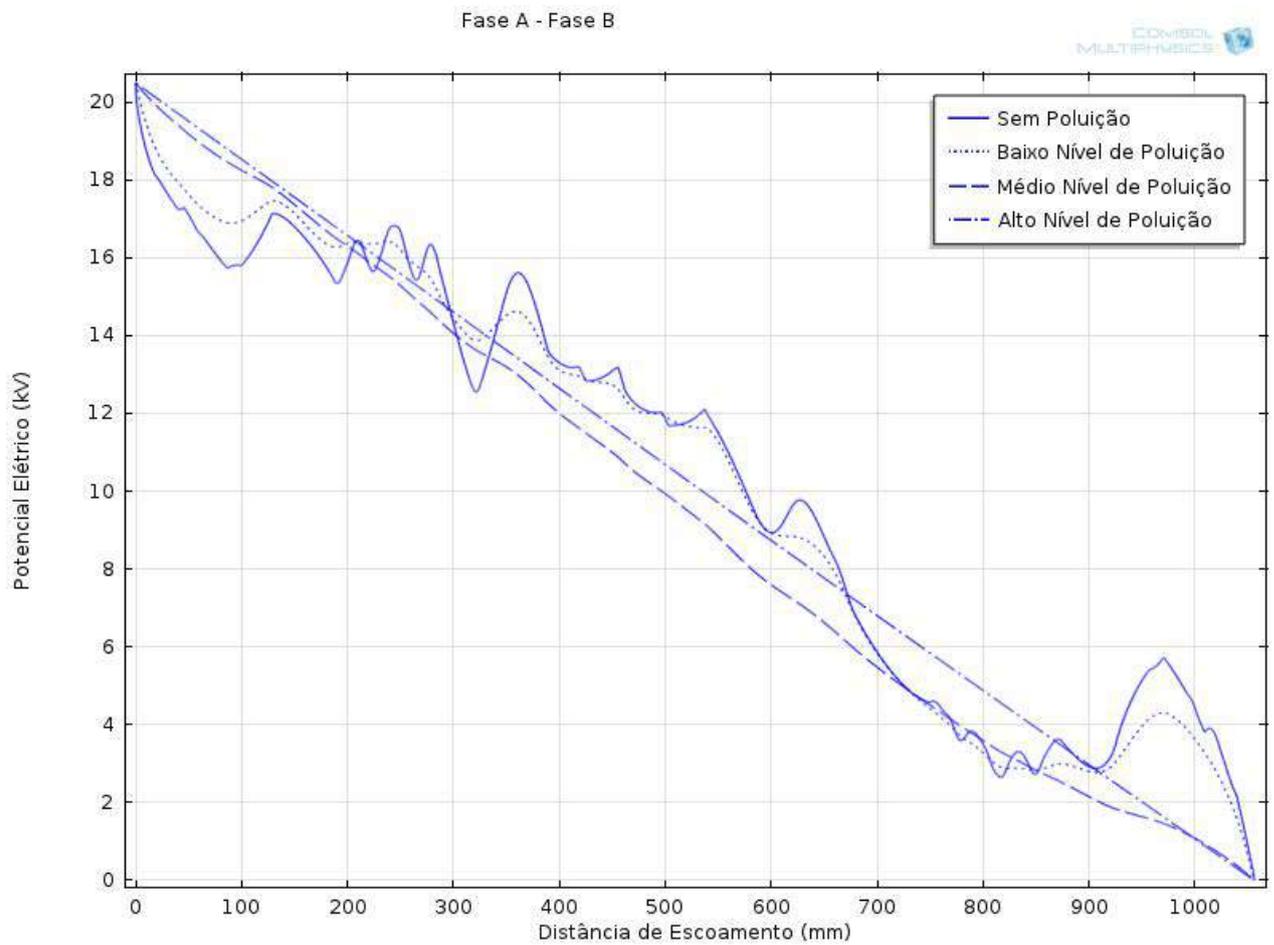
Figura 32 – Potencial elétrico do espaçador X na fase A-B.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 33 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X no setor A-B ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição, partindo da fase A para a fase B (adotada como terra, pois os ensaios são monofásicos). Pode ser observado também nesta Figura 33 que, com o aumento do nível de poluição, o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando a prevalência do comportamento resistivo.

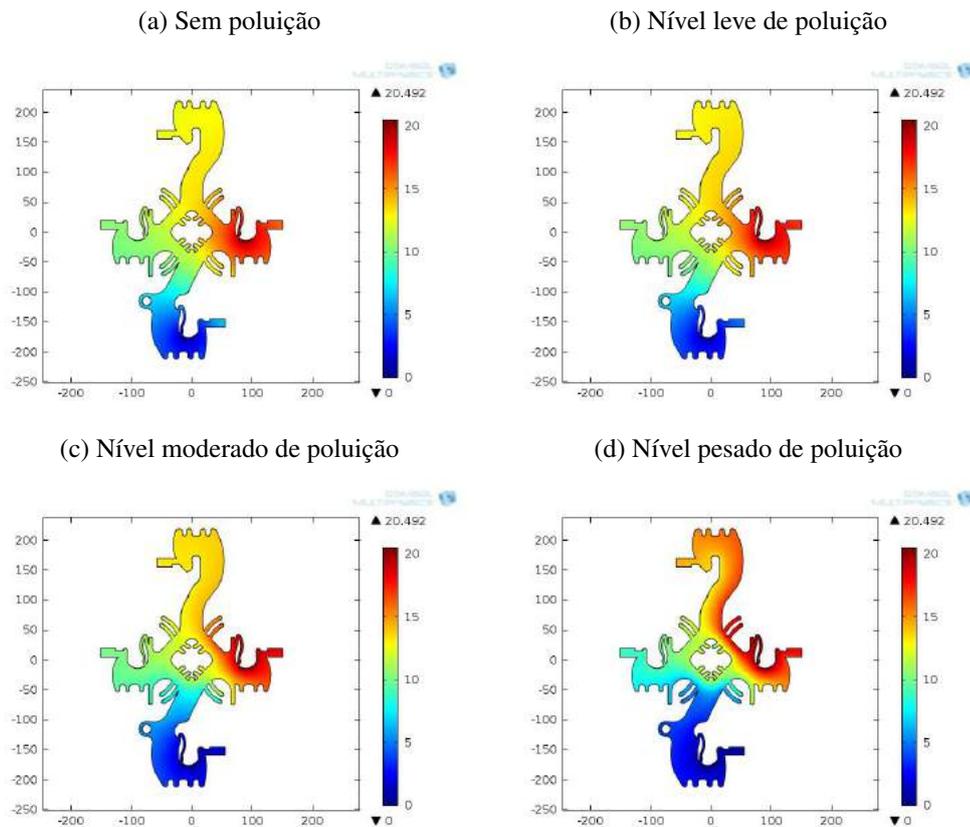
Figura 33 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor A-B



Fonte: próprio autor.

Na Figura 34 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X na fase B-C em níveis diferentes de poluição. Também é registrado na Figura 34 gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase C onde é aplicada a tensão e nas fases próximas, que não estão aterradas, à medida que a poluição se torna mais intensa.

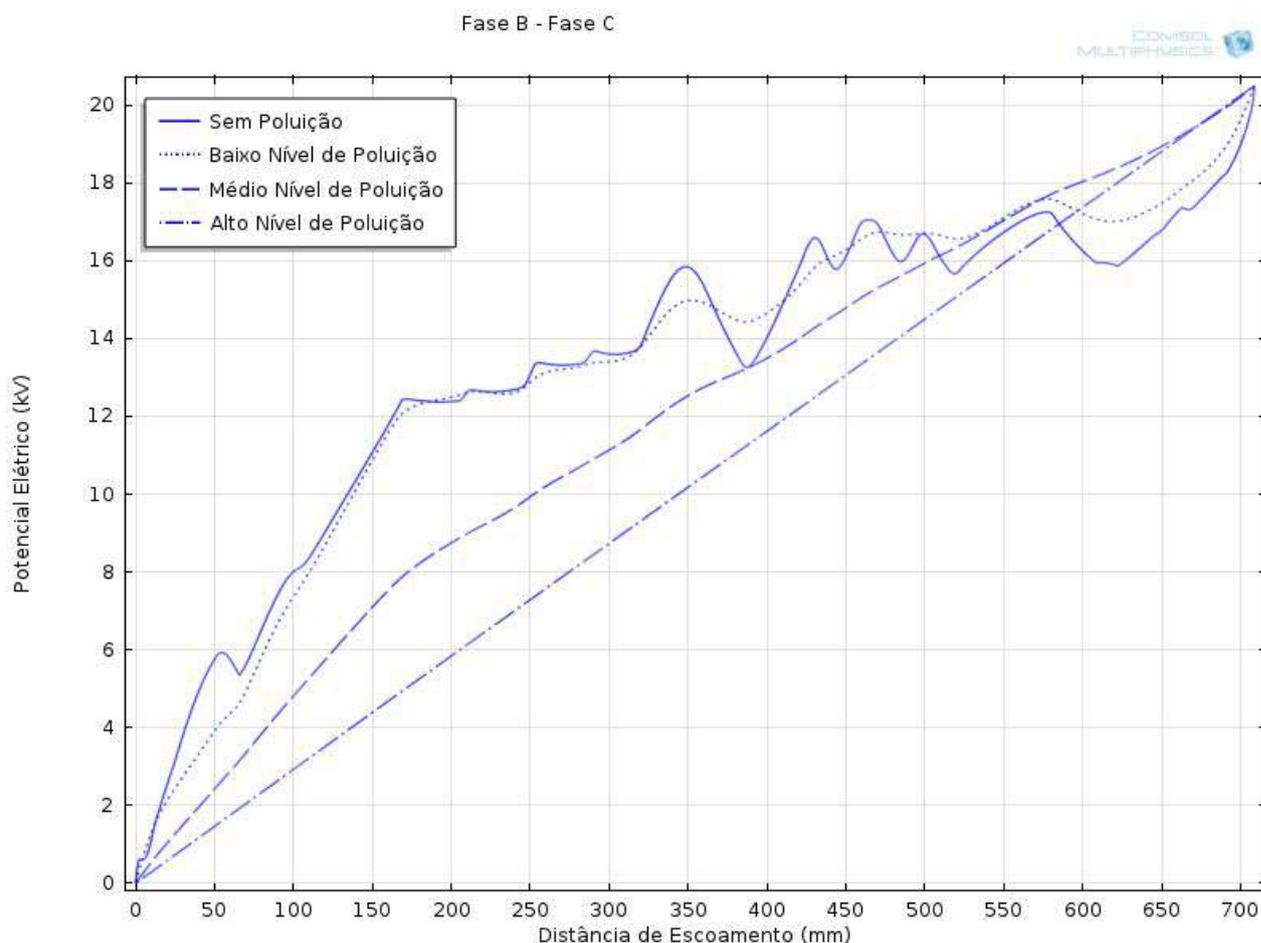
Figura 34 – Potencial elétrico do espaçador X na fase B-C.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 35 é mostrado o potencial elétrico do espaçador X no setor B-C ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição, partindo da fase B (adotada como terra, pois os ensaios são monofásicos) para a fase C. Pode ser observado também nesta Figura 35 que, com o aumento do nível de poluição, o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando a prevalência do comportamento resistivo.

Figura 35 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador X setor B-C



Fonte: próprio autor.

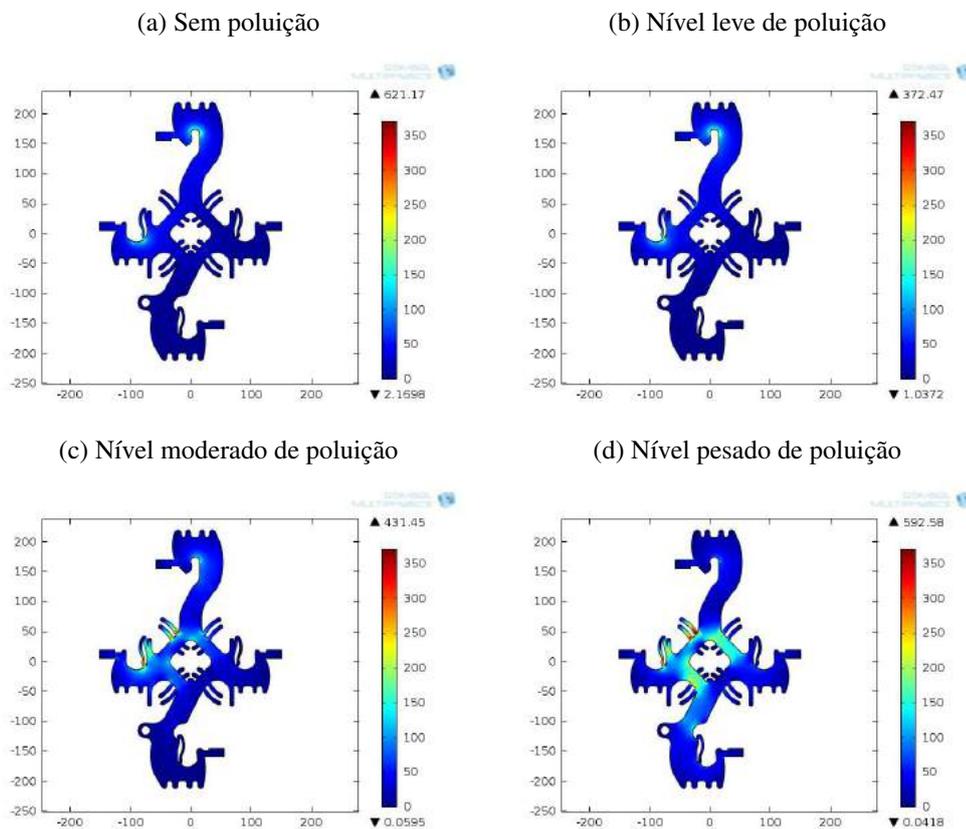
Das Figuras de potencial elétrico 2D 28, 30, 32 e 34 e de distribuição de potencial elétrico ao longo da distância de escoamento 29, 31, 33 e 35 do espaçador X nos ambientes sem poluição, com nível leve, moderado e pesado de contaminação para os setores A-T, C-T, A-B e B-C pode-se concluir que para todos os setores, à medida que a poluição é simulada mais intensamente (com um maior valor de condutividade superficial), o potencial elétrico se torna mais intenso em cada setor específico de aplicação de tensão e linear ao longo da distância de escoamento. O potencial elétrico 2D dos setores A-B e B-C são os que apresentam maior intensidade, isso devido a uma maior tensão aplicada. Este fator possibilita que outras fases, onde não se tem tensão aplicada, recebam uma parcela maior de intensidade de potencial elétrico comparado aos setores A-T e C-T. A distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, sem poluição, oscila bastante à medida que se percorre a distância de escoamento, isto porque sem poluição o dielétrico tem o comportamento capacitivo e resistivo, conforme o aumento de poluição o comportamento resistivo prevalece sobre o capacitivo do dielétrico. Devido a essa camada muito condutiva o

potencial elétrico ao longo da distância de escoamento tende a ser linear. O comportamento capacitivo do dielétrico permite que este tenha um funcionamento adequado à isolação dos materiais, neste sentido a fase do espaçador X que tem o comportamento mais distante do capacitivo em todas as situações de poluição é a A-B.

3.2.6.2 Campo Elétrico no Espaçador X

Na Figura 36 é mostrado o campo elétrico no espaçador X no setor A-T sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 36 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas do espaçador X. É importante salientar que o campo elétrico é mais intenso no setor A-T, onde a tensão está aplicada, contudo os outros setores do espaçador também apresentam intensidades de campo elétrico.

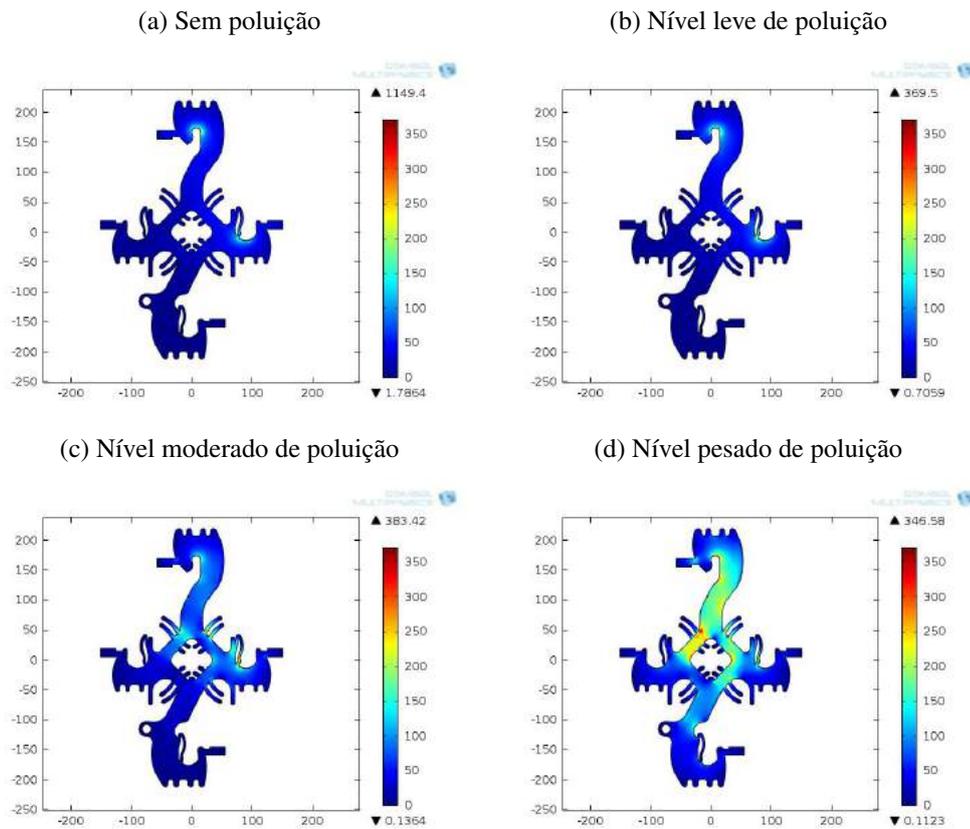
Figura 36 – Campo elétrico do espaçador X na fase A-T.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 37 é mostrado o campo elétrico no espaçador X no setor C-T sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 37 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas do espaçador X.

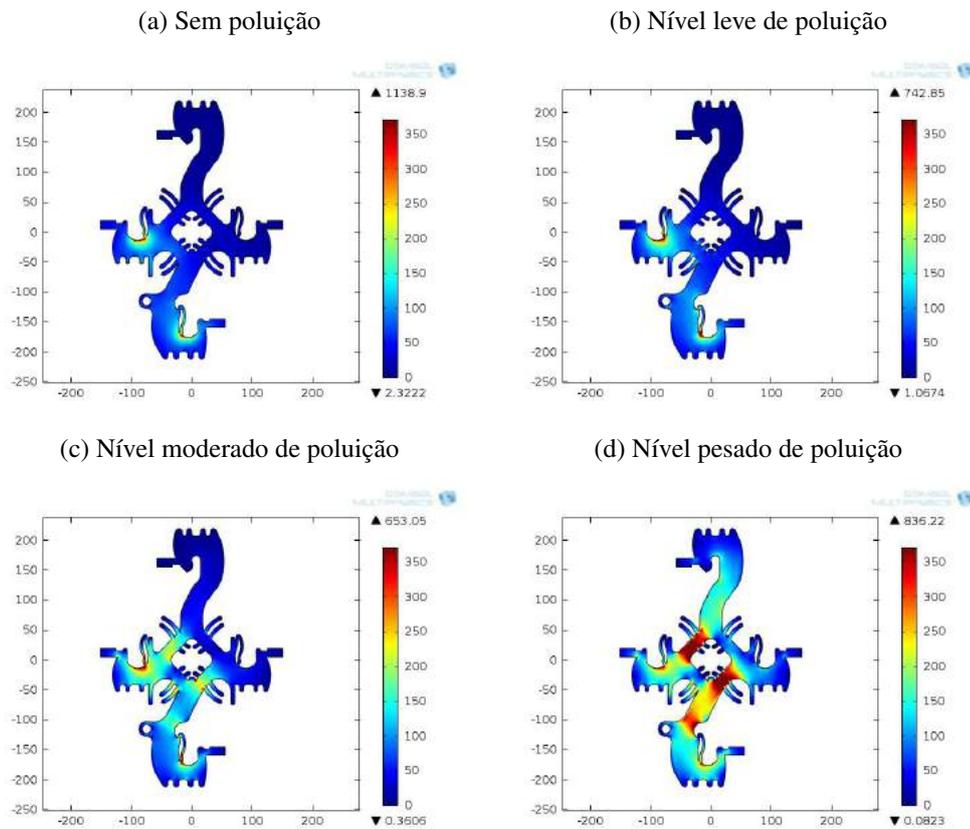
Figura 37 – Campo elétrico do espaçador X na fase C-T.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 38 é mostrado o campo elétrico no espaçador X no setor A-B sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 38 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas e nas proximidades do sinalizador de poste do espaçador X. A tensão é aplicada ao setor A-B, tendo a fase B aterrada. Desta forma, os setores A-T e B-C do espaçador X foram os que apresentaram maiores pontos de concentração de campo elétrico, sendo o B-C o pior deles.

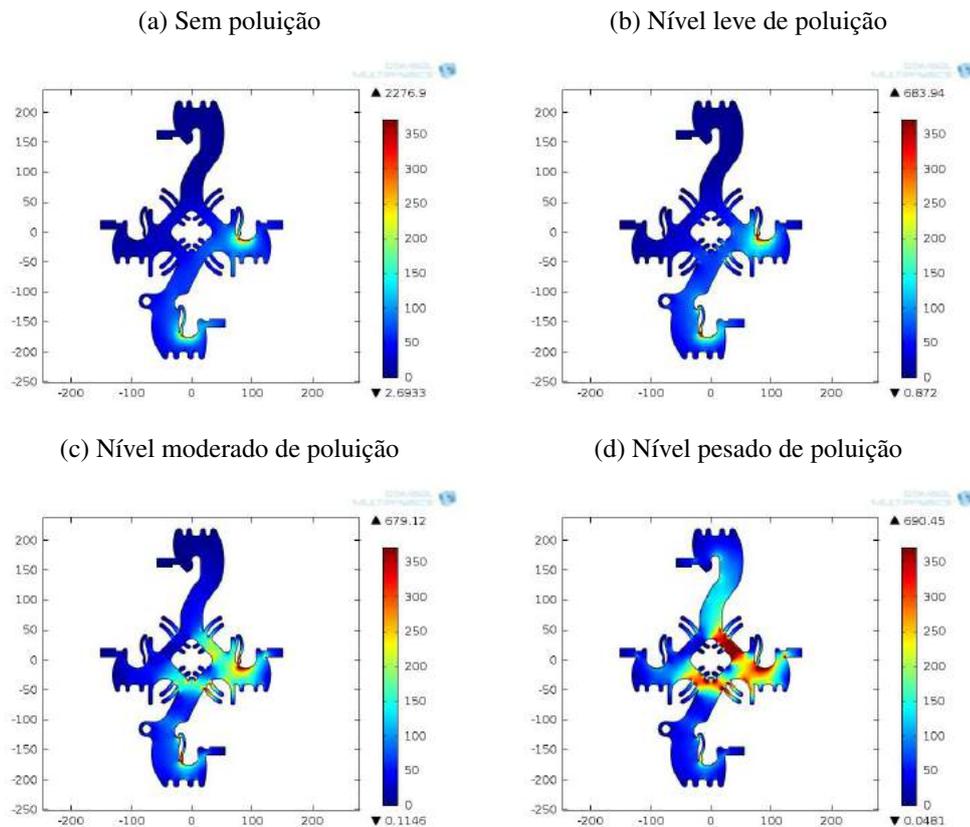
Figura 38 – Campo elétrico do espaçador X na fase A-B.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 39 é mostrado o campo elétrico no espaçador X no setor B-C sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 39 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas e do espaçador X. A tensão é aplicada ao setor B-C, tendo a fase B aterrada. Desta maneira, os setores C-T, A-B e B-C do espaçador X foram os que apresentaram maiores pontos de concentração de campo elétrico, sendo o C-T o pior deles.

Figura 39 – Campo elétrico do espaçador X na fase B-C.



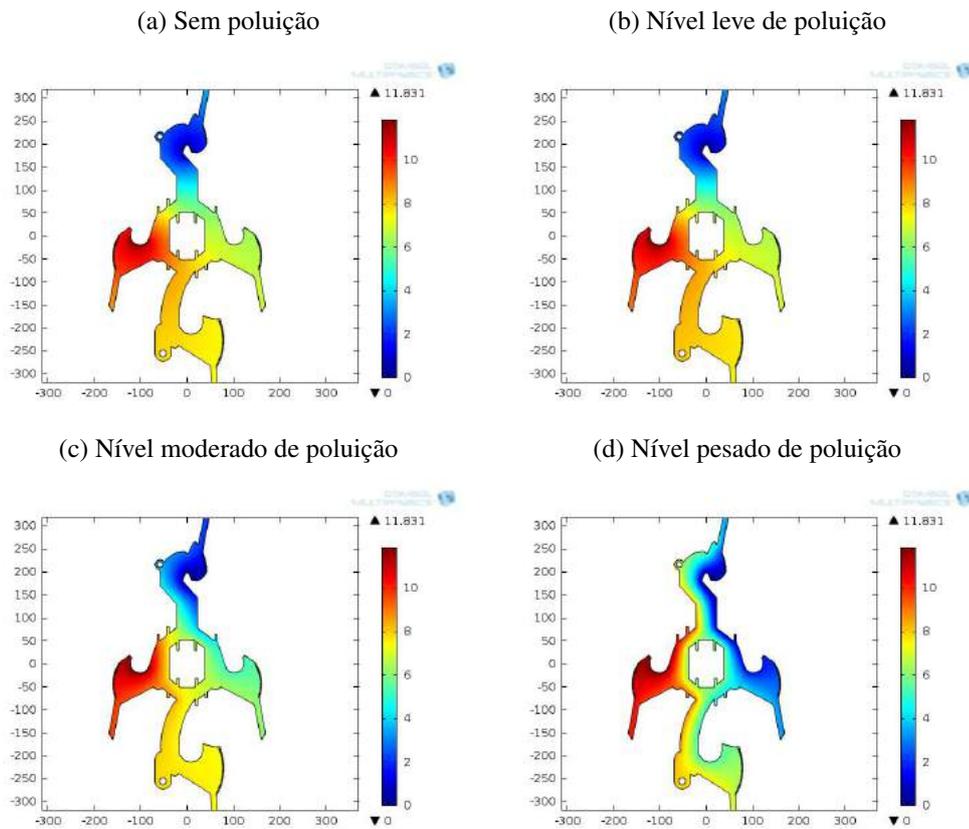
Fonte: próprio autor.

As Figuras 36, 37, 38, 39 de campo elétrico no espaçador X nos ambientes sem poluição, com nível leve, moderado e pesado de contaminação para os setores A-T, C-T, A-B e B-C mostram de modo geral o campo elétrico se intensifica nos setores do espaçador à medida que aumenta-se a contaminação. Quando aplica-se tensão no setor A-B do espaçador X, o campo elétrico é mais intenso nos setores A-T e B-C. Quando aplica-se tensão no setor B-C do espaçador X, o campo elétrico é mais intenso nos setores C-T e B-C. Fica evidente, que o campo elétrico se concentra nas regiões das aletas do espaçador X, estas regiões são as que sofrem o maior estresse elétrico, podendo desencadear trilhamento elétrico com o decorrer do tempo.

3.2.6.3 Potencial Elétrico no Espaçador Y

Na Figura 40 é mostrado o potencial elétrico do espaçador Y na fase A-T em níveis diferentes de poluição. É registrado na Figura 40 gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase A, onde se foi aplicada tensão, e nas fases próximas que não estão aterradas, à medida que a poluição se tornar mais intensa.

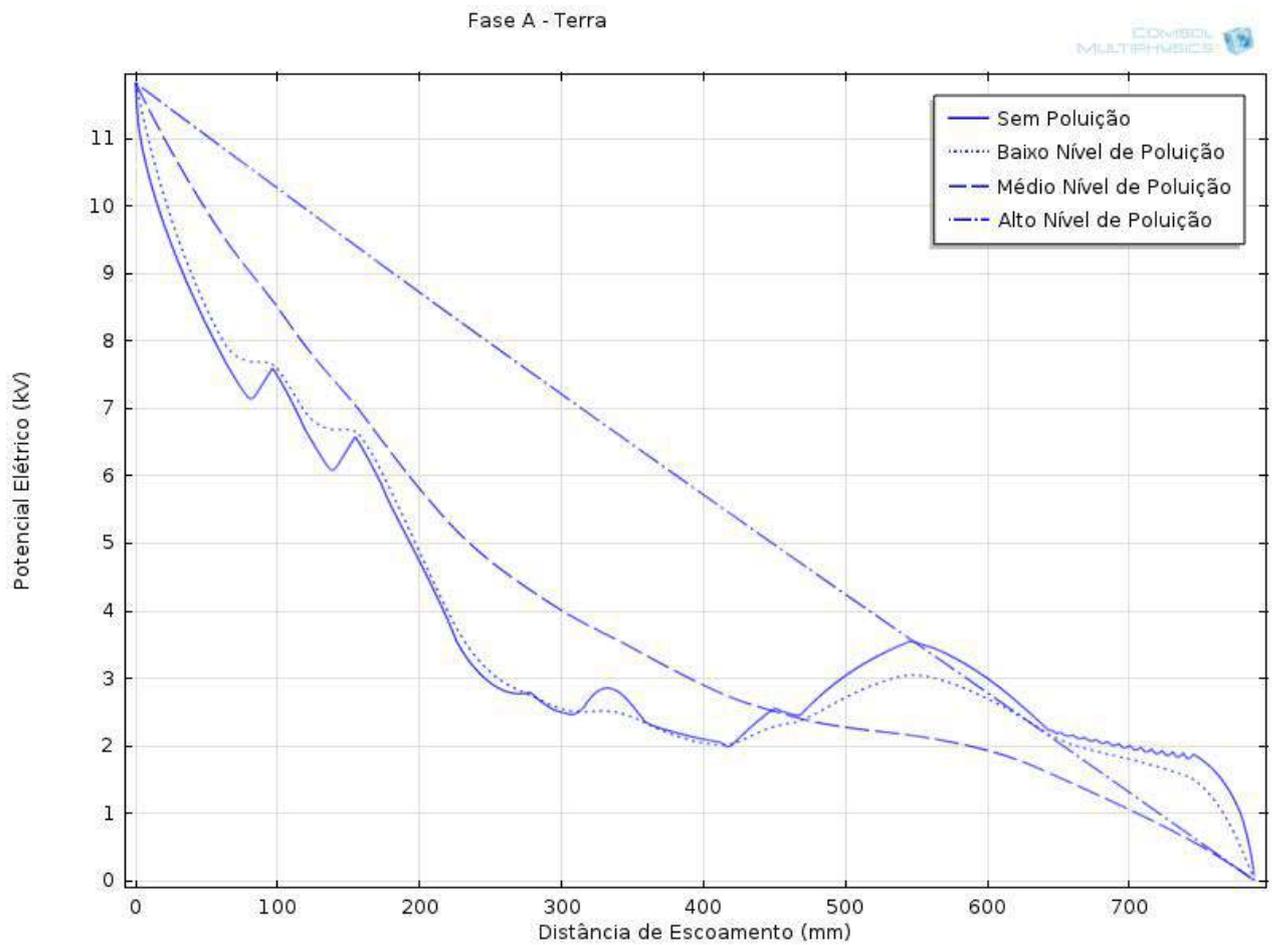
Figura 40 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase A-T.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 41 é mostrada a distribuição de potencial elétrico do espaçador Y no setor A-T ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição. É constatado também nesta Figura 41 que, com o aumento do nível de poluição o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando a prevalência do comportamento resistivo.

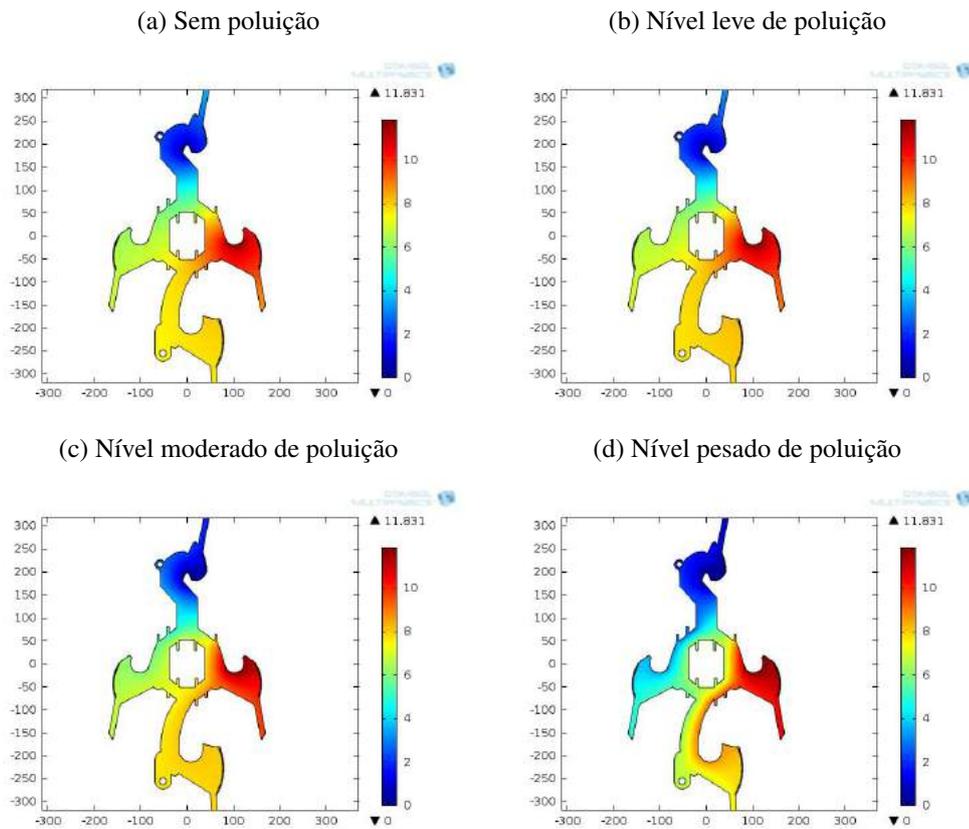
Figura 41 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor A-T



Fonte: próprio autor.

Na Figura 42 é mostrado o potencial elétrico do espaçador Y na fase C-T em níveis diferentes de poluição. De forma geral, também na Figura 42 é registrado gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase C, onde é aplicada tensão, e nas fases que não estão aterradas, à medida que a poluição se tornar mais intensa.

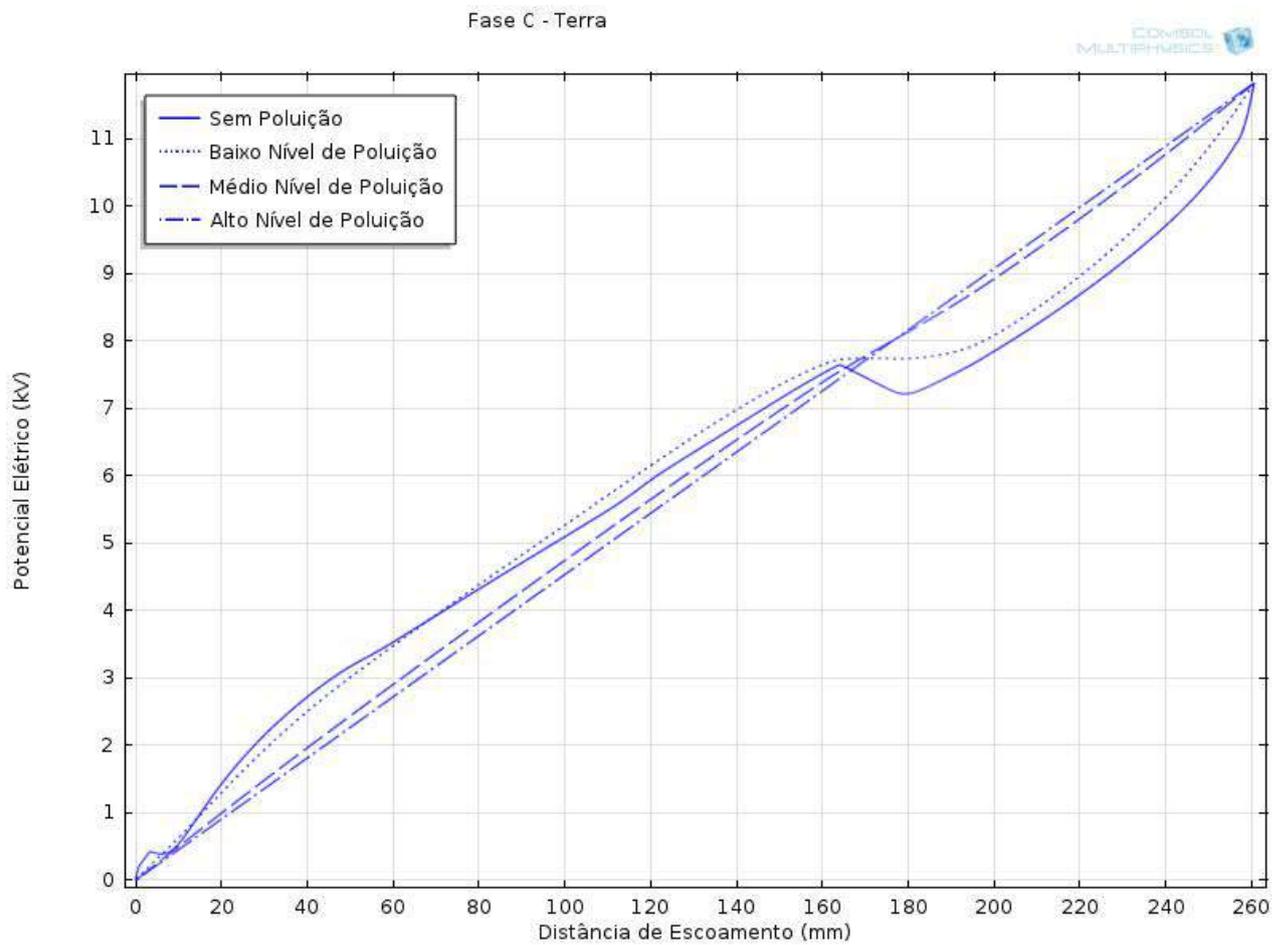
Figura 42 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase C-T.



Fonte:próprio autor.

Na Figura 43 é mostrado a distribuição de potencial elétrico do espaçador Y no setor C-T ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição. É constatado também nesta Figura 43 que, com o aumento do nível de poluição o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando a prevalência do comportamento resistivo.

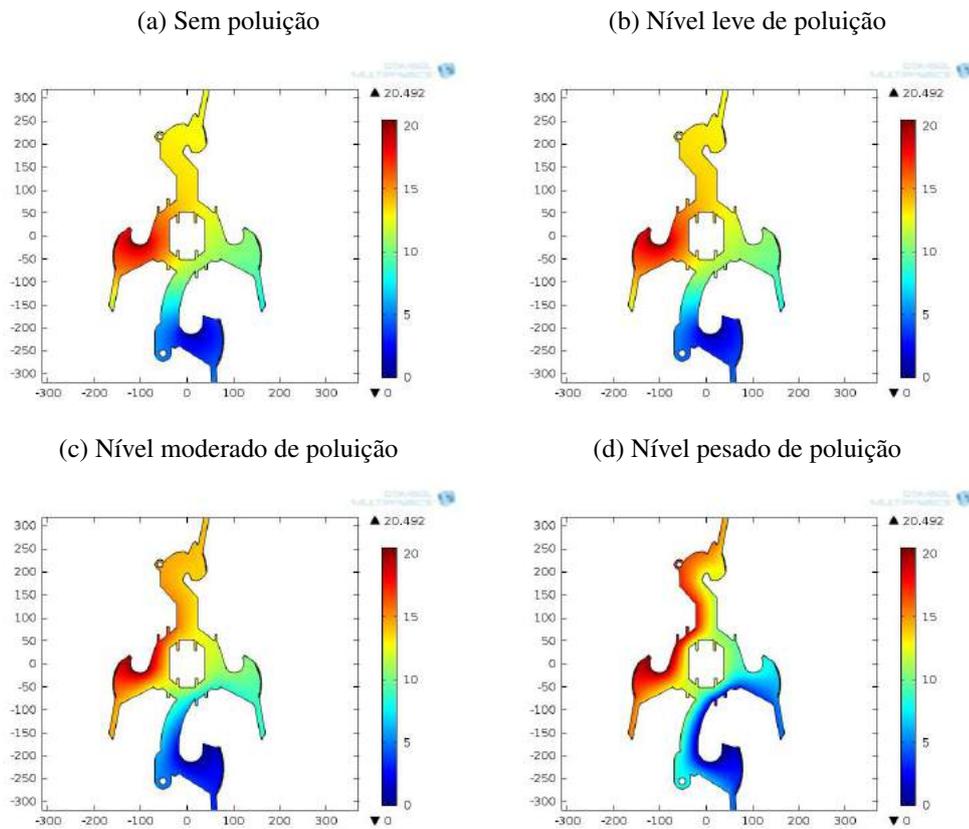
Figura 43 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor C-T



Fonte: próprio autor.

Nota-se na Figura 44 comportamento semelhante aos anteriores no que se refere ao gradual aumento de intensidade do potencial elétrico do espaçador Y, contudo na fase A-B, em níveis diferentes de poluição.

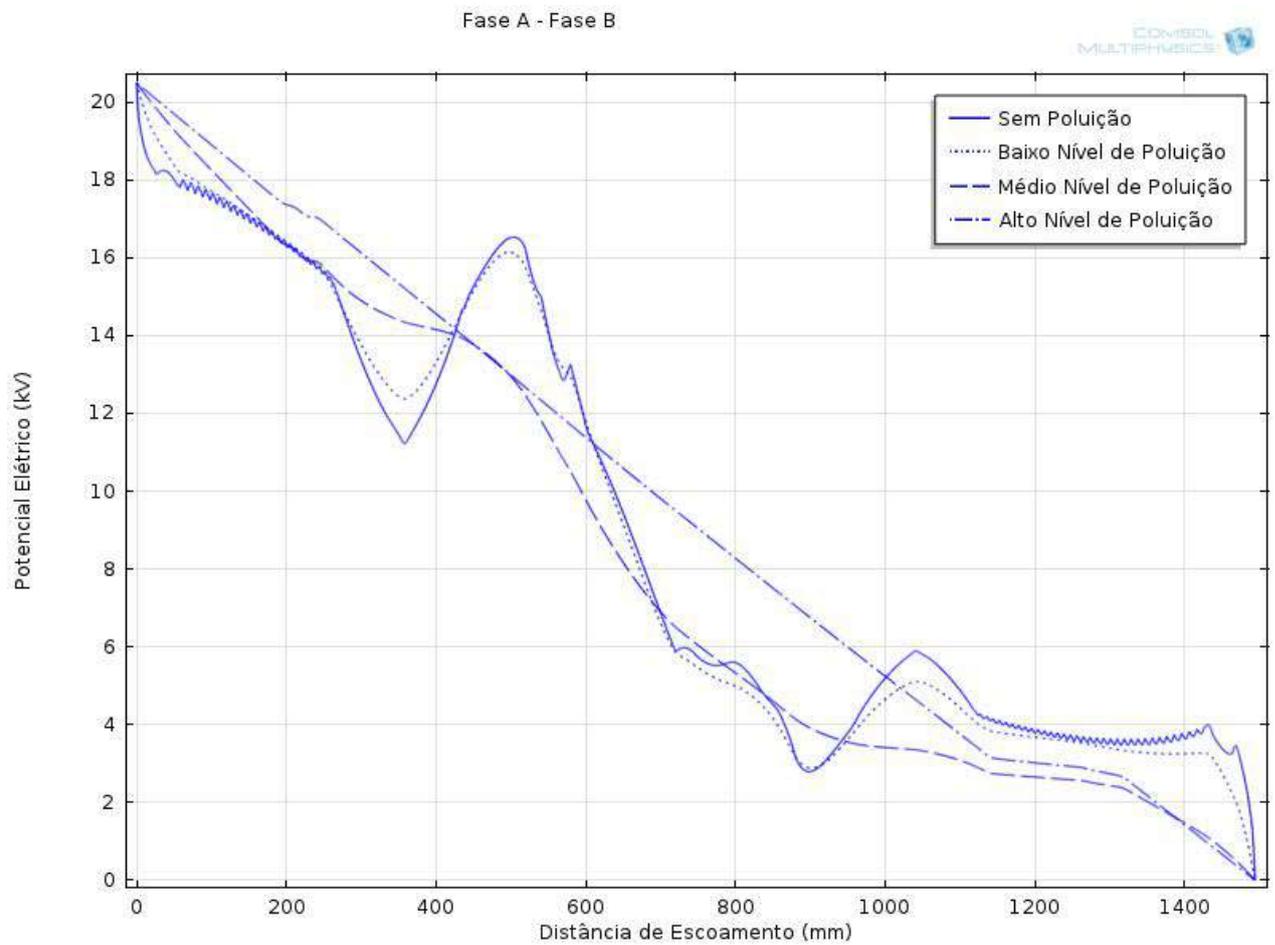
Figura 44 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase A-B.



Fonte: próprio autor.

A Figura 45 mostra a distribuição de potencial elétrico do espaçador Y no setor A-B ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição. É constatado, também, que com o aumento do nível de poluição o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando, como para os outros setores do espaçador a prevalência do comportamento resistivo à medida que uma camada condutiva mais intensa se deposita no isolante.

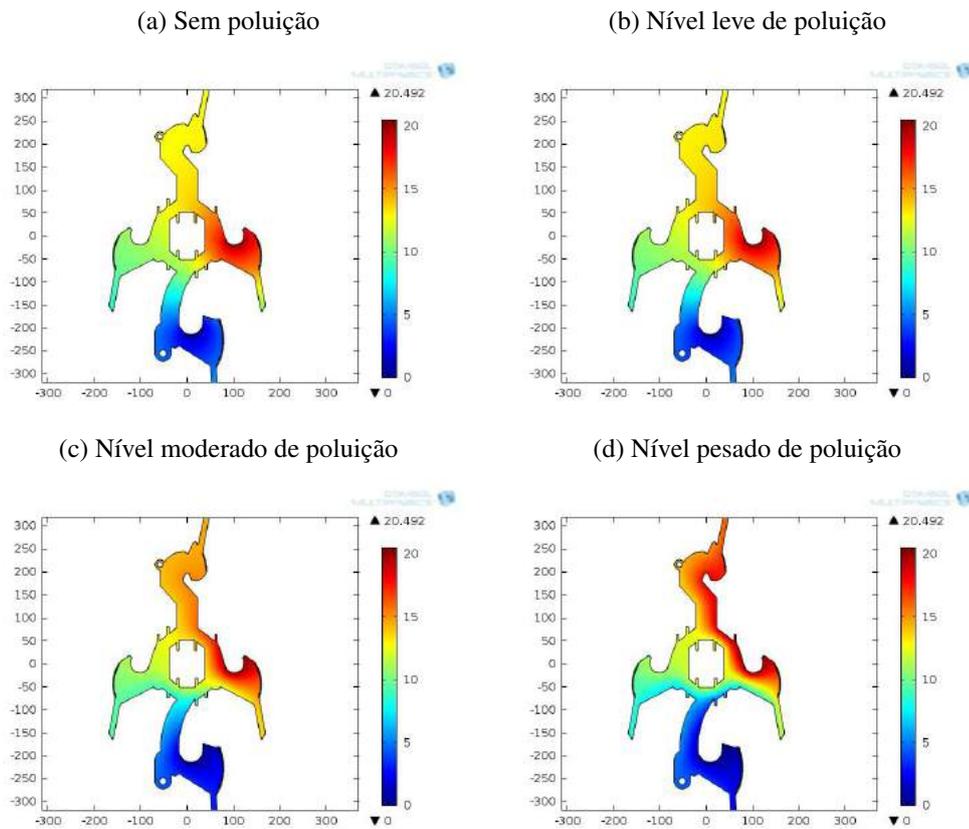
Figura 45 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor A-B



Fonte: próprio autor.

Na Figura 46 é mostrado o potencial elétrico do espaçador Y na fase A-B em níveis diferentes de poluição, vale ressaltar que a fase aterrada nesta simulação foi a fase B, por questões de similaridade aos ensaios laboratoriais. Também existe o gradual aumento da intensidade do potencial elétrico na fase C, onde é aplicada tensão, e nas fases próximas que não estão aterradas, à medida que a poluição se tornar mais intensa.

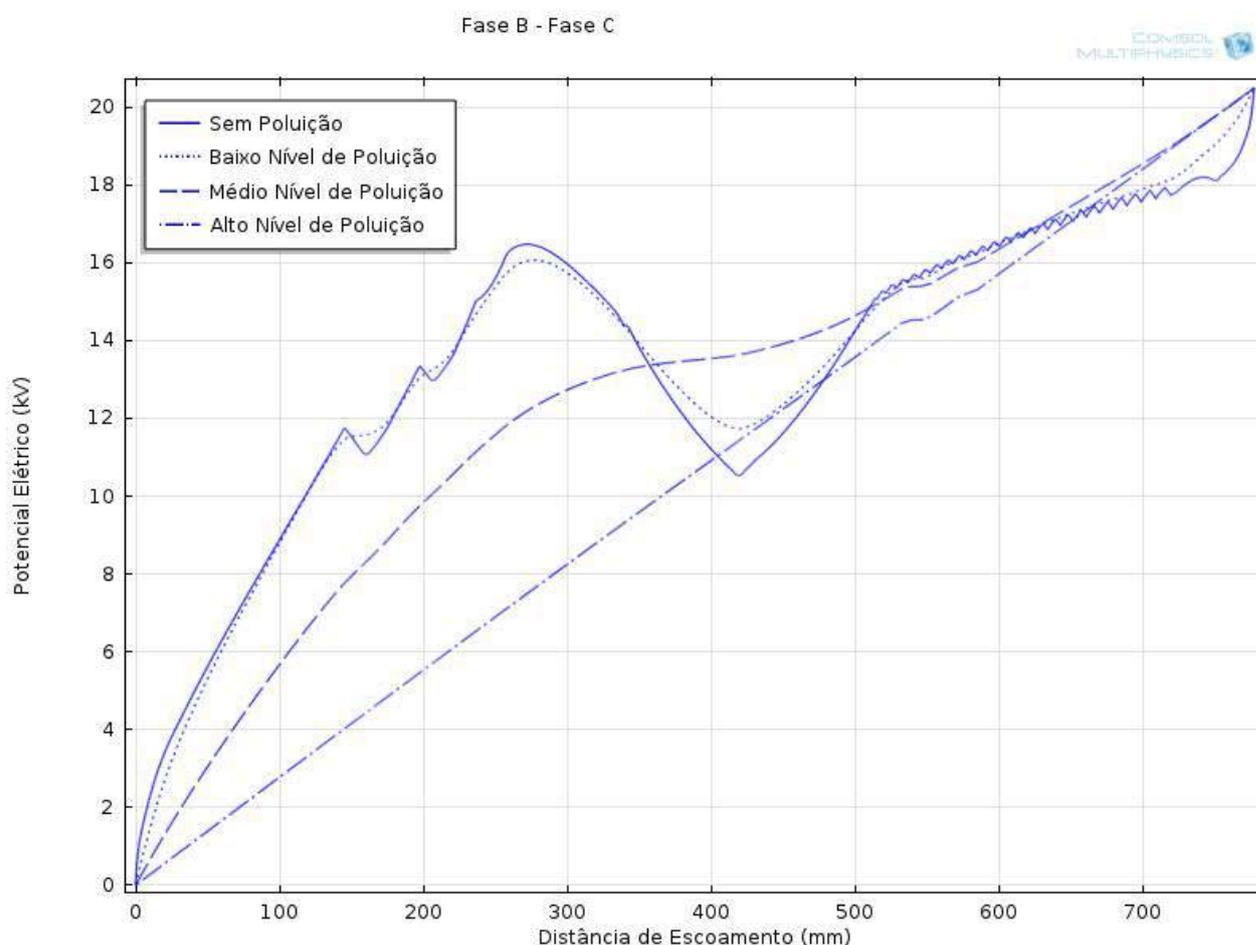
Figura 46 – Potencial elétrico do espaçador Y na fase B-C.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 47 é mostrada a distribuição de potencial elétrico do espaçador Y no setor B-C, ao longo da distância de escoamento deste setor para diferentes níveis de poluição, vale ressaltar que a curva foi plotada partindo da fase B em direção a fase C. É constatado, que com o aumento do nível de poluição o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento se torna linear, mostrando a prevalência do comportamento resistivo como já observado anteriormente.

Figura 47 – Distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, espaçador Y setor B-C



Fonte: próprio autor.

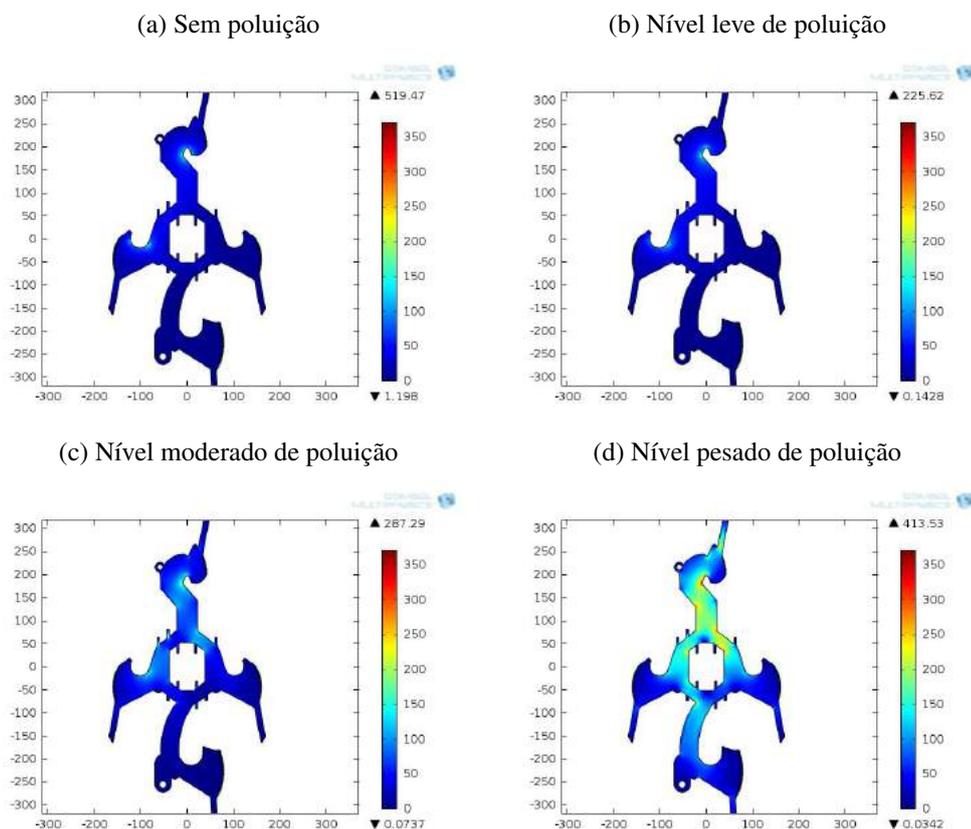
Das Figuras de potencial elétrico 2D 40, 42, 44 e 46 e de distribuição de potencial elétrico ao longo da distância de escoamento 41, 43, 45 e 47 do espaçador Y nos ambientes sem poluição, com nível leve, moderado e pesado de contaminação para os setores A-T, C-T, A-B e B-C pode-se concluir que para todos os setores, à medida que a poluição é simulada mais intensamente (com mais condutividade superficial), o potencial elétrico se torna mais intenso em cada setor específico de aplicação de tensão e reto ao longo da distância de escoamento. O potencial elétrico 2D dos setores A-B e B-C são os que apresentam maior intensidade, isso devido a uma maior tensão aplicada. Este fator possibilita que outras fases, onde não se tem tensão aplicada, recebam uma parcela maior de intensidade de potencial elétrico comparado aos setores A-T e C-T. A distribuição de potencial ao longo da distância de escoamento, sem poluição, oscila bastante conforme percorre a distância de escoamento, isto porque sem poluição o dielétrico tem o comportamento capacitivo e resistivo, conforme o aumento de poluição o

comportamento resistivo se prevalece sobre o capacitivo do dielétrico, devido a essa camada muito condutiva o potencial elétrico ao longo da distância de escoamento tende a ser reto. O comportamento capacitivo do dielétrico permite que este tenha um funcionamento adequado à isolamento dos materiais, neste sentido a fase do espaçador Y que tem o comportamento mais distante do capacitivo em todas as situações de poluição é a C-T.

3.2.6.4 Campo Elétrico no Espaçador Y

Na Figura 48 é mostrado o campo elétrico no espaçador Y no setor A-T sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 48 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas e pontas do espaçador Y. A tensão é aplicada ao setor A-T, mas se manifestam maiores concentrações de campo elétrico nos setores A-T e C-T.

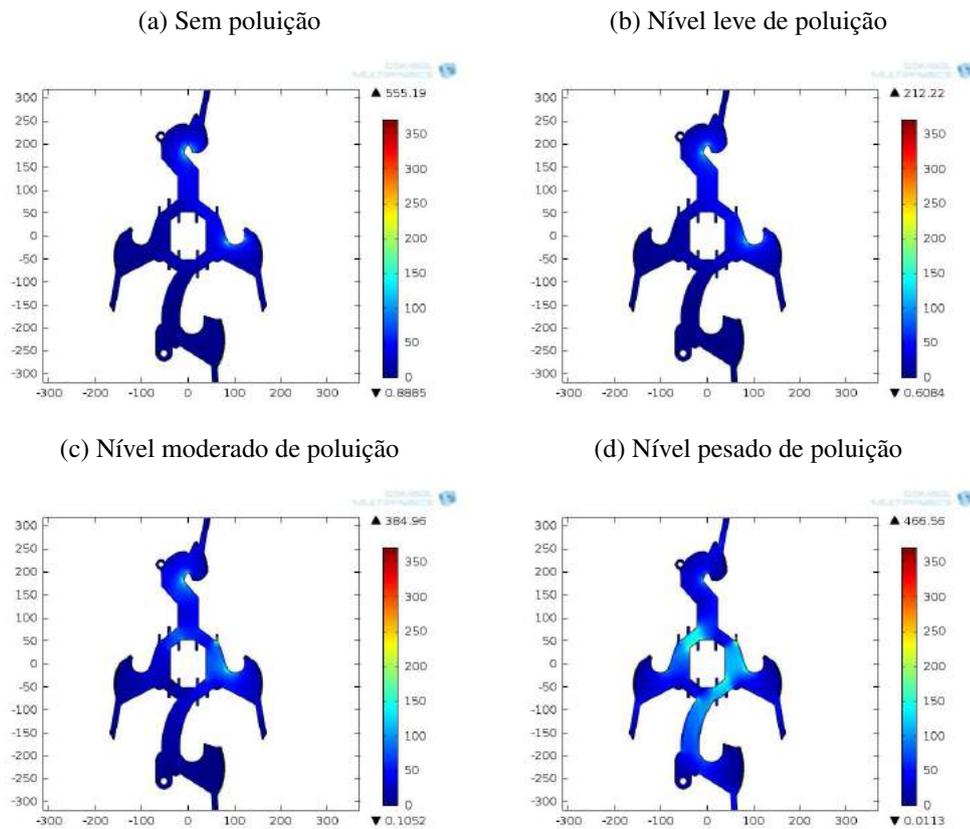
Figura 48 – Campo elétrico do espaçador Y na fase A-T.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 49 é mostrado o campo elétrico no espaçador Y no setor C-T sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 49 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas do espaçador Y. A tensão é aplicada ao setor C-T, mas se manifestam maiores concentrações de campo elétrico nos setores A-T, C-T e B-C.

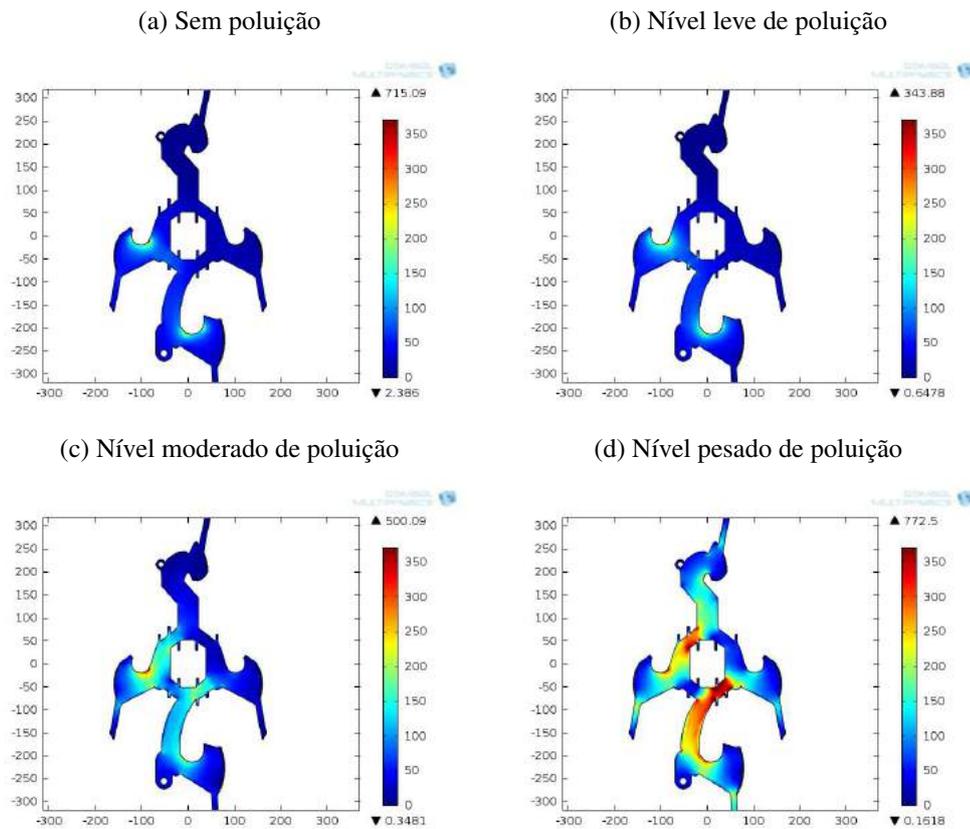
Figura 49 – Campo elétrico do espaçador Y na fase C-T.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 50 é mostrado o campo elétrico no espaçador Y no setor A-B sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 50 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas do espaçador Y. A tensão é aplicada ao setor A-B, tendo a fase B aterrada, mas se manifestam maiores concentrações de campo elétrico nos setores A-T, A-B e B-C, sendo o setor B-C o pior deles.

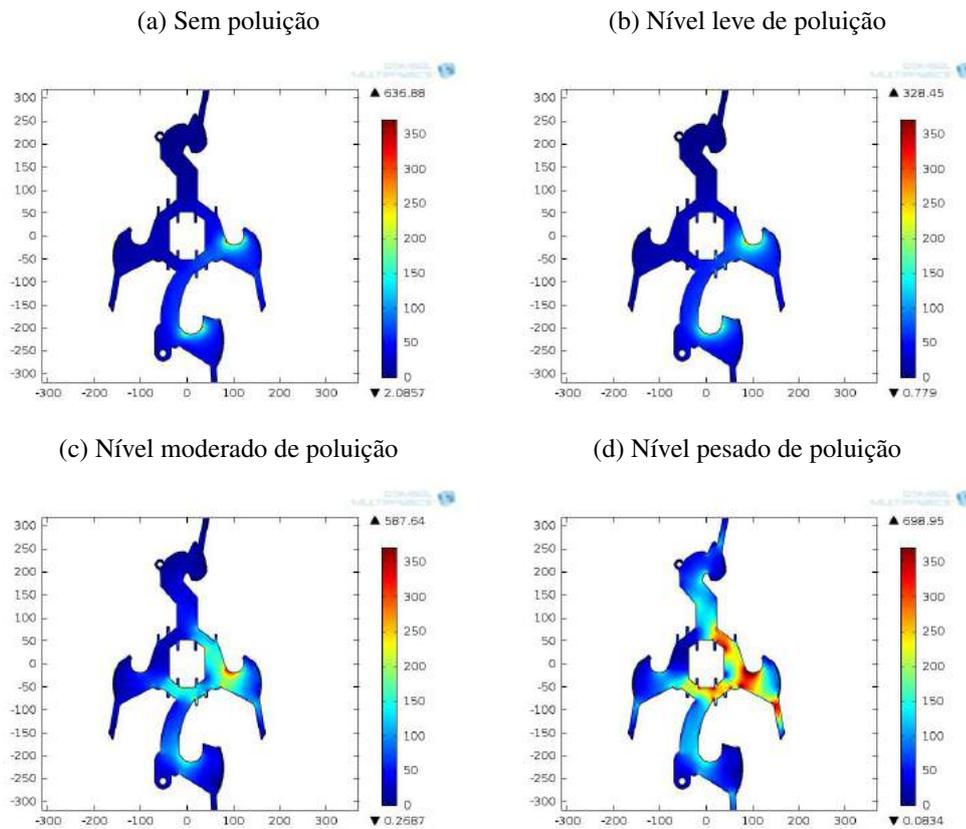
Figura 50 – Campo elétrico do espaçador Y na fase A-B.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 51 é mostrado o campo elétrico no espaçador Y no setor B-C sob diferentes níveis de poluição. Nesta mesma Figura 51 percebe-se que, com o aumento da poluição o campo elétrico tende a se concentrar nas regiões das aletas do espaçador Y. A tensão é aplicada ao setor B-C, tendo a fase B aterrada, mas se manifestam maiores concentrações de campo elétrico nos setores C-T, A-B e B-C, sendo o setor C-T o pior deles.

Figura 51 – Campo elétrico do espaçador Y na fase B-C.



Fonte: próprio autor.

As Figuras 48, 49, 50, 51 de campo elétrico no espaçador Y nos ambientes sem poluição, com nível leve, moderado e pesado de contaminação para os setores A-T, C-T, A-B e B-C mostram de modo geral o campo elétrico se intensifica nos setores do espaçador à medida que aumenta-se a contaminação. Quando aplica-se tensão no setor A-B do espaçador Y, o campo elétrico é mais intenso nos setores A-T e B-C. Quando aplica-se tensão no setor B-C do espaçador Y, o campo elétrico é mais intenso nos setores C-T e B-C. Fica evidente, que o campo elétrico se concentra nas regiões das aletas do espaçador Y, estas regiões são as que sofrem o maior estresse elétrico, podendo desencadear trilhamento elétrico com o decorrer do tempo.

3.3 Aplicação de Modelo Computacional no Matlab

Aplicando-se o modelo da Figura 22 e o algoritmo proposto por (R.SUNDARARAJAN; GORUR, 1991) variou-se o nível de poluição de $2\mu S$ à $20\mu S$, com um passo de $0.5\mu S$, para os setores da Tabela 3 (J.M.B. XAVIER J.A.R.; SILVA, 2016):

Tabela 3 – Distâncias de Escoamento por Setor em Cada Espaçador.

Setor	Espaçador X	Espaçador Y
Fase A - Terra	43,3cm	78,9cm
Fase C - Terra	78,7cm	26,5cm
Fase A - Fase B	106,6cm	149,4cm
Fase C - Fase B	70,6cm	77,7cm

3.3.1 Resultados de Simulações no Matlab

A Figura 52 mostra gráfico da tensão de *flashover* versus condutividade da camada de poluição para os espaçadores X e Y no setor A-T. A Figura 52 mostra desempenho superior do espaçador Y em relação ao X neste setor, isto porque o espaçador Y apresenta maiores níveis de tensão diante do espaçador X para que ocorra o flashover.

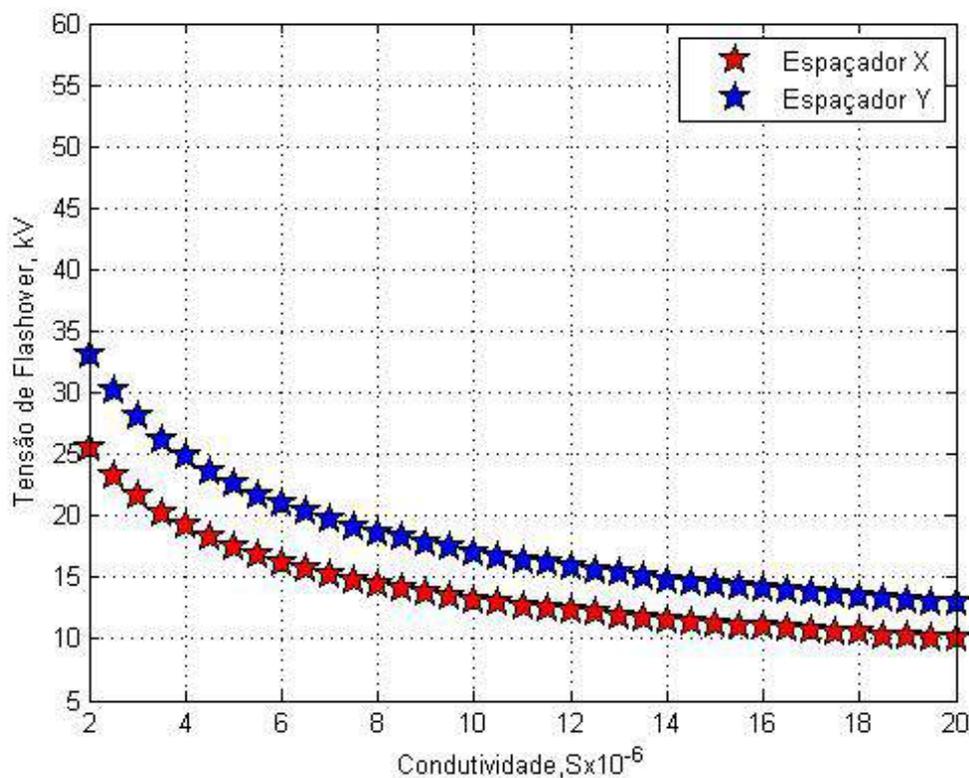


Figura 52 – Curva de suportabilidade, espaçadores X e Y fase A-T

Na Figura 53 observamos a tensão de flashover versus condutividade da camada de poluição nos espaçadores X e Y no setor C-T. O espaçador X apresenta maior tensão para que ocorra o flashover em relação ao Y neste setor, desta forma, no setor C-T o espaçador X apresenta desempenho superior ao Y.

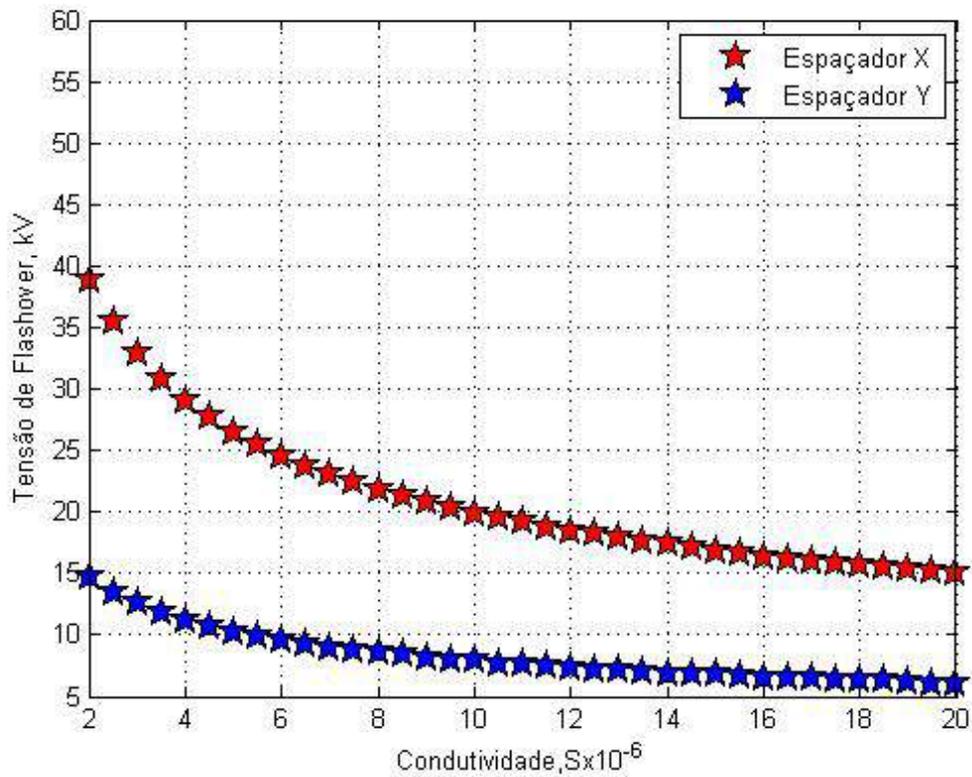


Figura 53 – Curva de suportabilidade, espaçadores X e Y fase C-T

O gráfico da tensão de flashover versus condutividade no setor A-B é apresentado na Figura 54. Nela observamos desempenho superior do espaçador Y em relação ao X neste setor.

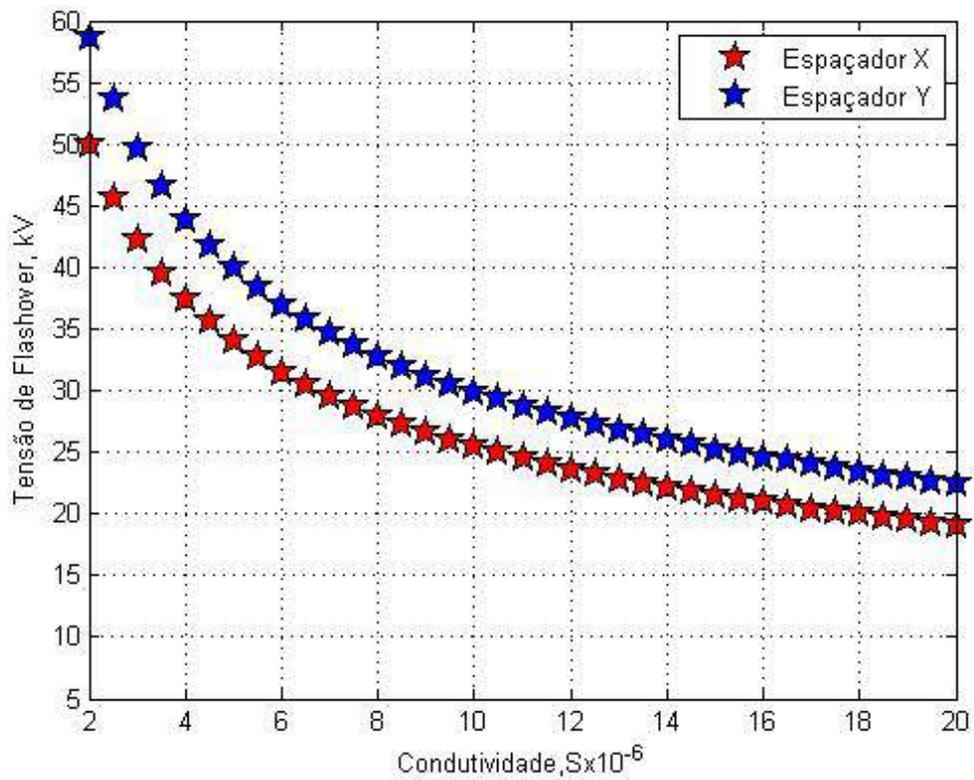


Figura 54 – Curva de suporteabilidade, espaçadores X e Y fase A-B

A Figura 55 mostra gráfico da tensão de flashover versus condutividade da camada de poluição para os espaçadores X e Y no setor B-C. Observamos desempenho superior do espaçador Y em relação ao X neste setor.

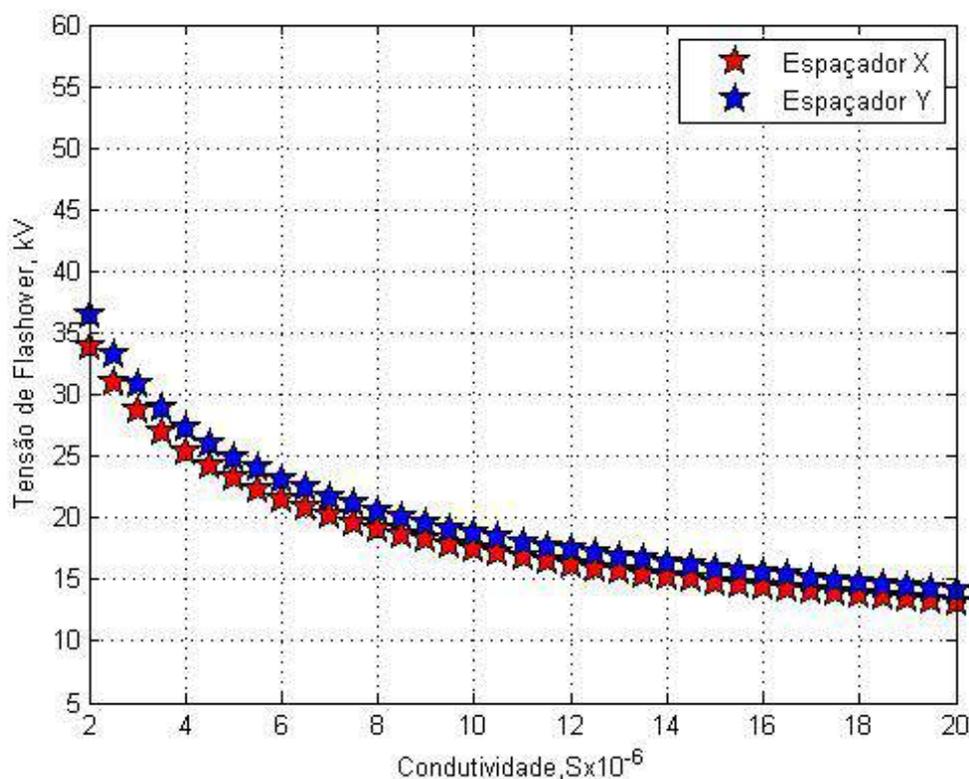


Figura 55 – Curva de suporteabilidade, espaçadores X e Y fase B-C

Devido aos diferentes perfis e distâncias de escoamento presentes nos espaçadores, como mostrado na Tabela 3, observam-se suporteabilidades diferentes para cada setor. Via de regra quanto maior a distância de escoamento maior será a suporteabilidade. Analisando-se as Figuras 52, 53, 54 e 55 percebemos que o espaçador que possui a maior suporteabilidade é o espaçador Y, apenas para o setor entre a fase C e o terra temos menores valores de suporteabilidade de tensão para que ocorra flashover.

De um modo geral os espaçadores X e Y apresentam desempenhos similares em seus setores, quanto ao potencial elétrico à medida que se aumenta a intensidade da poluição. Observa-se que o potencial elétrico varia de maneira linear à medida que se aumenta o nível de poluição, conforme pode ser observado nas Figuras 29,31,33 e 35 para o espaçador X e 41,43,45 e 47 para o espaçador Y. No comportamento de campo elétrico, novamente, quando aumenta-se a intensidade da poluição surgem concentrações de campo elétrico nas aletas dos dois espaçadores. Contudo, comparando-se as curvas apresentadas nas Figuras de potencial elétrico percebe-se que o espaçador Y é o que menos sofre variação em sua distribuição de potencial, quando submetido a uma poluição leve, visto que dentre os espaçadores é aquele em que a curva referente à superfície pouco poluída mais se assemelha com aquela em ambiente limpo. Analisando-se as curvas percebe-se um padrão em que quanto menor a distância de escoamento, mais rapidamente ocorre o decaimento da tensão, visto que, os potenciais em cada condutor são os mesmos independente do espaçador.

4 Análise Laboratorial nos Espaçadores

Neste capítulo é apresentada Análise Laboratorial nos Espaçadores X e Y de $13,8kV$, com a medição de corrente de fuga nos mesmo. Inicialmente é feita descrição detalhada do laboratório de Alta Tensão-LAT do Grupo de Pesquisa em Transmissão e Distribuição-GpTD do Departamento de Engenharia Elétrica-DEE da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE e também são feitas descrição detalhada das montagens laboratoriais realizadas que inclui preparações das soluções e procedimentos de ensaio. Ao final deste capítulo são apresentados resultados e análises do ensaio de medição de corrente de fuga.

4.1 Descrição do LAT do GpTD/DEE/UFPE

O LAT do GpTD/DEE/UFPE é um laboratório que permite a realização de ensaios de alta tensão aplicada em materiais e equipamentos isolantes sob a possibilidade de diversas condições ambientais. O LAT é composto por dois ambientes, sendo uma área de ensaios com $34,2 m^2$ e uma sala de controle/aquisições de sinais. A disposição física dos principais equipamentos do LAT e seu aspecto físico estão apresentados em fotos presentes na Figura56.

Figura 56 – Laboratório de Alta Tensão do GpTD/DEE/UFPE.

(a) Área de ensaio



(b) Transformador de ensaio



(c) Equipamentos diversos do LAT



(d) Sala de controle e aquisição de sinais



Fonte: próprio autor.

4.1.1 Descrição do Kit de Alta Tensão

Uma das ferramentas utilizadas para realização de ensaios é o Kit de Alta Tensão fabricado pela empresa Haefely, composto por transformador, divisor capacitivo, cubículo de comutação e bancada de controle. Estes itens e seus dados técnicos são listados abaixo.

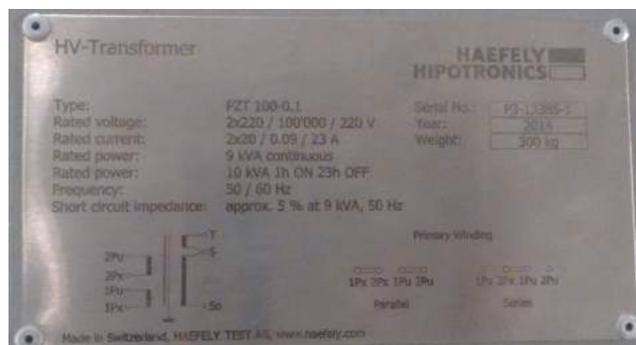
- Transformador elevador: O transformador de tensão possui uma potência de 10kVA e possui a capacidade de elevar até 100kV a tensão de entrada que é 220V. Fotos do transformador elevador e da sua placa são apresentados na Figura 57;

Figura 57 – Transformador

(a) Foto do transformador



(b) Foto da placa do transformador



Fonte: próprio autor.

- Controlador de tensão: O controlador de tensão OT276 é responsável pelo controle automatizado do kit de alta tensão. Este equipamento, além de controlar o nível de tensão de saída, possui dispositivos de segurança que são importantes na operação segura do transformador. A Figura 58 mostra foto deste equipamento;

Figura 58 – Controlador de tensão OT276



Fonte: próprio autor.

- **Cubículo de comutação:** O cubículo de comutação é responsável por aumentar a tensão primária, proporcionando um aumento da tensão secundária do transformador. Este equipamento possui uma potência de 5kVA, tensão de entrada de 220V, corrente máxima de 22A e uma tensão de saída de até 220V que corresponderá a uma tensão máxima de saída de 100kV do transformador. A Figura 59 apresenta foto do interior deste equipamento;

Figura 59 – Cubículo de comutação

(a) Visão geral do cubículo de comutação



(b) Visão interna do cubículo de comutação



Fonte: próprio autor.

- **Divisor capacitivo:** O divisor capacitivo é responsável pela medição da tensão secundária do transformador. A partir dos valores das capacitâncias é possível obter relação de tensão em cada capacitor e com isso, realizar medição em um nível mais baixo de tensão. A Figura 60 mostra foto dos capacitores utilizados, onde o capacitor branco é de 100pF e o azul de 68nF;

Figura 60 – Foto dos capacitores

(a) Capacitor 100pF



(b) Capacitor 68nF



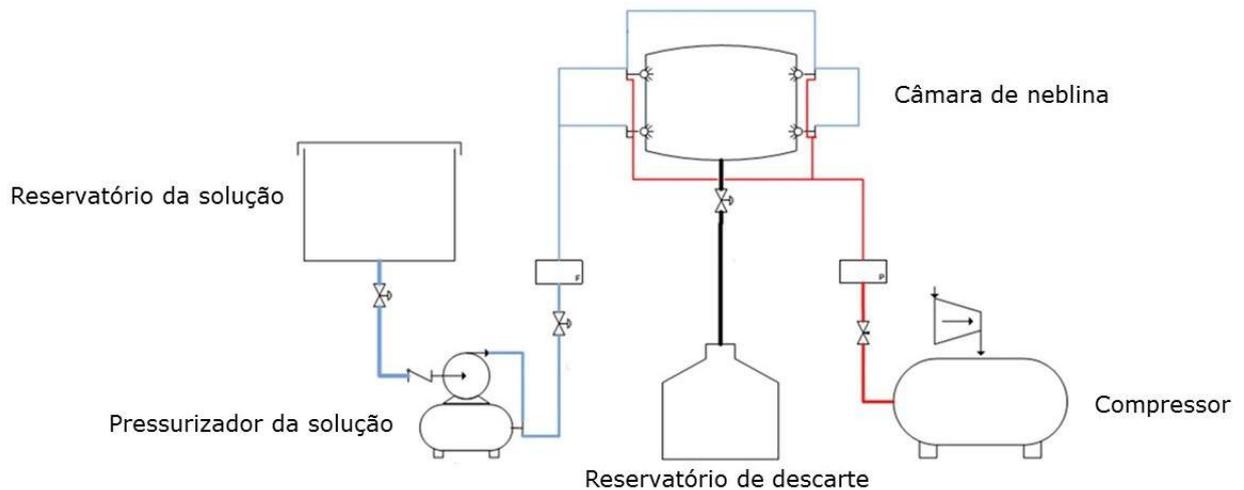
Fonte: próprio autor.

4.1.2 Descrição do Sistema de Pulverização

Os bicos injetores da câmara de neblina possuem por norma (IEC60507, 1991) valores de vazão estabelecidos para a solução e pressão de ar. Com o objetivo de suprir esta necessidade o sistema de pulverização foi construído.

A Figura 61 ilustra o diagrama do sistema de neblina com todos os componentes envolvidos. As linhas de cor azul representam a circulação da solução aquosa que sai do reservatório em direção aos quatro bicos injetores da câmara de neblina, através do pressurizador da solução e válvulas reguladoras. As linhas de cor vermelha representam a circulação do ar comprimido gerado pelo compressor e regulado através de válvulas em direção aos quatro bicos injetores da câmara de neblina. Para o descarte do acúmulo de solução, foi instalado reservatório de descarte ao fundo da câmara de neblina.

Figura 61 – Sistema de pulverização



Fonte: próprio autor.

4.1.3 Descrição da Câmara de Neblina

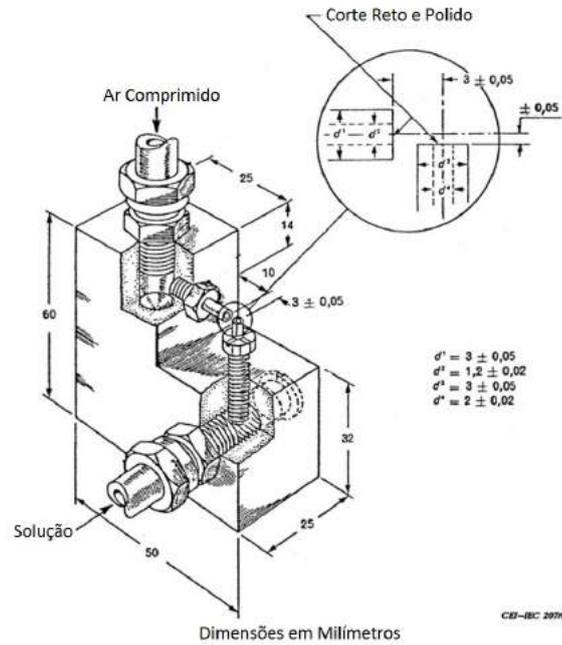
Na câmara de neblina é simulado condições de adversidade em espaçadores de distribuição de energia elétrica. Nela podemos unir a poluição em que os espaçadores estão submetidos em campo com neblina. Poluições com a presença de umidade contribuem para o envelhecimento dos materiais, atuando como agente facilitador da passagem de corrente pela superfície do isolador. Para se criar neblina artificial construiu-se uma câmara de neblina seguindo a norma técnica (IEC60507, 1991). A seguir é descrito o principal elemento da câmara de neblina que é o seu bico injetor e é feita a descrição da geometria da câmara de neblina.

4.1.3.1 Bico Injetor

O principal elemento da câmara de neblina é o bico injetor. Esse dispositivo injeta jatos de ar comprimido direcionado em ângulo reto em relação à solução injetada. Os bicos injetores consistem de tubos resistentes à corrosão com diâmetro interno do bico de ar de $1,2 \pm 0,02\text{mm}$ e o diâmetro interno do bico da solução de $2,0 \pm 0,02\text{mm}$. O terminal do bico injetor da solução localiza-se sobre o eixo do bico injetor de ar comprimido a uma distância de $\pm 0,05\text{mm}$. A distância entre o terminal do bico injetor de ar comprimido e a linha central do bico injetor da solução é de $3,0 \pm 0,05\text{mm}$. Tudo conforme o que estabelece a norma (IEC60507, 1991) e está apresentado na Figura 62.

Os pulverizadores estão em duas colunas paralelas e em lados opostos ao isolador o qual deve ter seu eixo no mesmo plano das colunas. Os bicos de pulverização são espaçados em intervalos de $0,6\text{m}$, cada um apontando em ângulo reto para o eixo contrário da outra coluna dentro de uma tolerância de 1° para o plano de pulverização conforme estabelece a

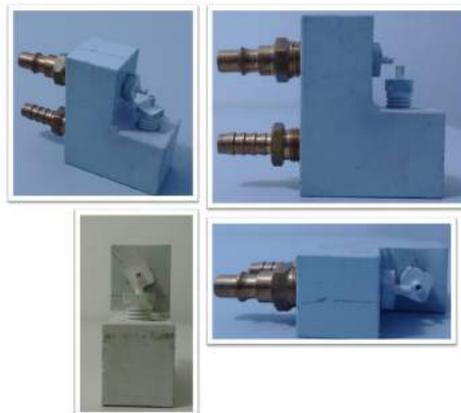
Figura 62 – Construção típica de um bico de pulverização.



Fonte: (IEC60507, 1991).

norma (IEC60507, 1991). Estes pulverizadores são alimentados com ar filtrado e livre de óleo a uma pressão relativa de $700kPa \pm 35kPa$. O fluxo da solução para cada pulverizador é de $0,5dm^3/min \pm 0,05dm^3/min$ no período de ensaio, e a tolerância no fluxo total para todos os pulverizadores é de $\pm 5\%$ do valor nominal conforme estabelece a norma (IEC60507, 1991). A Figura 63 apresenta fotos do bico pulverizador em diferentes ângulos de visualização.

Figura 63 – Foto do bico de pulverização em diferentes visualizações.



Fonte: próprio autor.

4.1.3.2 Geometria da Câmara de Neblina

A câmara de neblina é um cubo de 900mm de aresta e, foi construída em acrílico com 6mm de espessura. O número mínimo N de pulverizadores que é utilizado por coluna depende do comprimento H em metros do elemento submetido a ensaio (IEC60507, 1991). O número de pulverizadores segue a equação (4.1) conforme estabelece a norma (IEC60507, 1991):

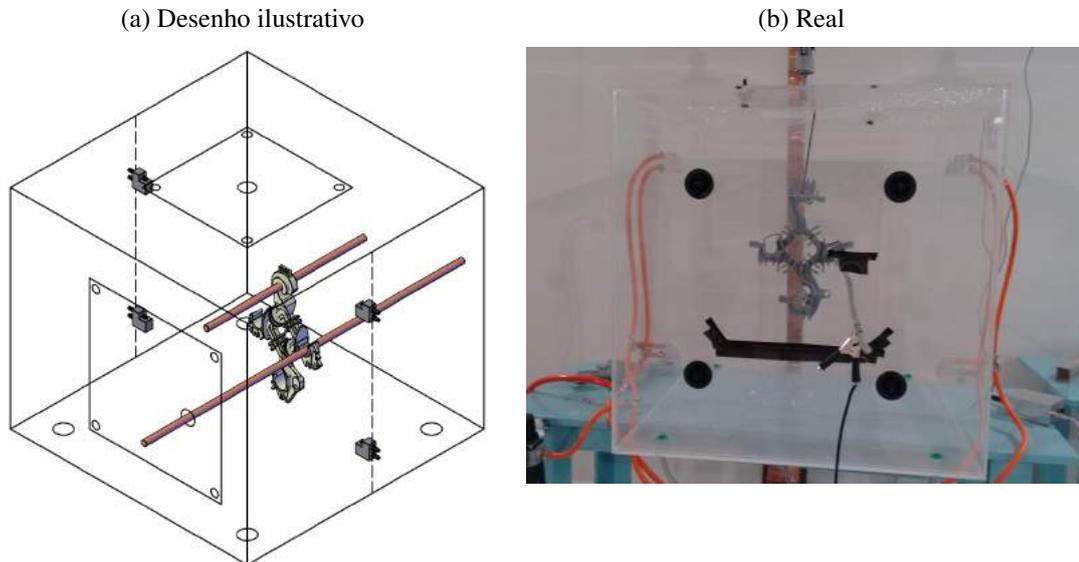
$$N = \frac{H}{0,6} + 3 \quad (4.1)$$

Sendo a distância da fase mais afastada do espaçador para o mensageiro de $0,5\text{m}$, temos:

$$N = \frac{0,5}{0,6} + 3 \cong 4 \quad (4.2)$$

Sendo assim, a câmara de neblina construída possui quatro bico pulverizadores espaçados entre si de $0,6\text{m}$ em cada coluna. A presença de duas janelas quadriculares se faz necessário para facilitar o manuseio com o elemento submetido à ensaio. Também foram feitos quatro saídas de acúmulo de solução na face inferior da câmara de neblina. A Figura 64 ilustra as características construtivas da câmara de neblina.

Figura 64 – Câmara de neblina.



Fonte: próprio autor.

4.2 Montagens Laboratoriais

4.2.1 Preparações de Soluções

As soluções foram preparadas em conformidade aos critérios estabelecidos pela EPRI (1982). Contudo, devido às diferentes áreas superficiais dos espaçadores, fez-se necessário estabelecer condutividades volumétricas distintas para os dois modelos de espaçadores losangulares estudados. A definição destas condutividades volumétricas foi obtida através de relações de proporcionalidade da área superficial do isolador padrão IEEE de 3549cm^2 , que possui sua condutividade volumétrica normatizada pela EPRI (1982), com as respectivas áreas superficiais dos dois modelos de espaçadores, no modelo X 3549cm^2 e no Y 3312cm^2 . A Tabela 4 apresenta classificação das contaminações em relação à condutividade para o isolador padrão IEEE e para os espaçadores X e Y.

Tabela 4 – Definição da contaminação.

Classificação	Condutividade isolador IEEE	Condutividade espaçador X	Condutividade espaçador Y
Atmosfera limpa-A	$10000\mu\text{S}/\text{cm}$	$6000\mu\text{S}/\text{cm}$	$9332\mu\text{S}/\text{cm}$
Contaminação muito leve-B	$14000\mu\text{S}/\text{cm}$	$8400\mu\text{S}/\text{cm}$	$13065\mu\text{S}/\text{cm}$
Contaminação pesada-C	$40000\mu\text{S}/\text{cm}$	$24000\mu\text{S}/\text{cm}$	$37328\mu\text{S}/\text{cm}$
Contaminação muito pesada-D	$80000\mu\text{S}/\text{cm}$	$48000\mu\text{S}/\text{cm}$	$74656\mu\text{S}/\text{cm}$

Fonte: (EPRI, 1982).

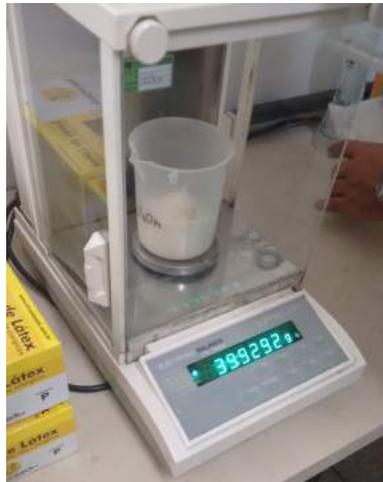
4.2.2 Processo de preparação das soluções

A partir da Tabela de contaminação 4 e do fixante kaolin, procedeu-se seguindo a norma (IEC60507, 1991) o processo de preparação das soluções contaminantes. Os itens a seguir listados são utilizados nas preparações das soluções, conforme apresentado na Figura 65.

- 40g de Kaolin, pesados em uma balança de precisão;
- Quantidade desejável de NaCl de pureza comercial, de tal forma a produzir a condutividade volumétrica apresentada na tabela anterior, para cada uma das respectivas classes de poluição;
- 1l de água destilada (escolhida para evitar água de torneira com condutividade volumétrica superior a $0,05\text{S}/\text{m}$);
- Medição da salinidade desejável conforme a Tabela 4.

Figura 65 – Itens de preparação de solução.

(a) 40g de kaolin em balança analítica.



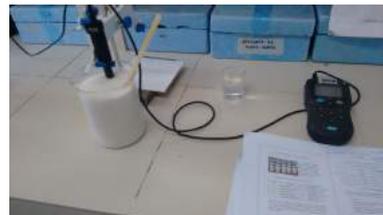
(b) NaCl de pureza comercial.



(c) 1L de água destilada.



(d) Medição da salinidade da solução



Fonte: próprio autor.

Foram obtidas oito soluções distintas, uma para cada classificação e modelo de espaçador. A Figura 66 mostra os recipientes com as suas devidas classes de salinidade para cada modelo de espaçador.

Figura 66 – Soluções para os espaçadores X e Y.

(a) Espaçador X



(b) Espaçador Y

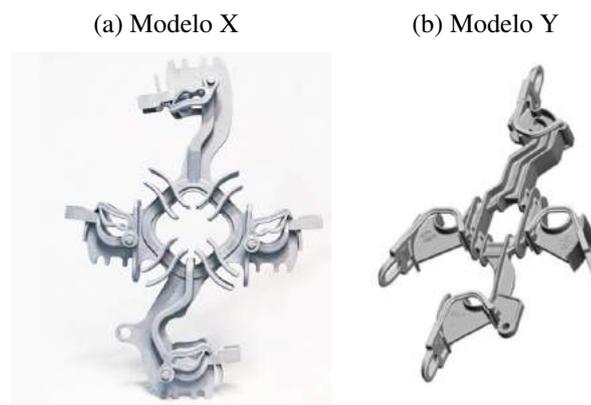


Fonte: próprio autor.

4.3 Espaçadores sob Ensaio

Os modelos de espaçadores X e Y sob estudos possuem garras, são para classe de tensão até 15 kV e são amplamente aplicados a redes de distribuição compactas, a Figura 67 mostra suas características estéticas. Eles, como já mencionados, são responsáveis por separar as fases elétricas e por fazer isolamento entre elas. É conveniente salientar que ambos os modelos são constituídos com o mesmo material químico, polietileno de alta densidade.

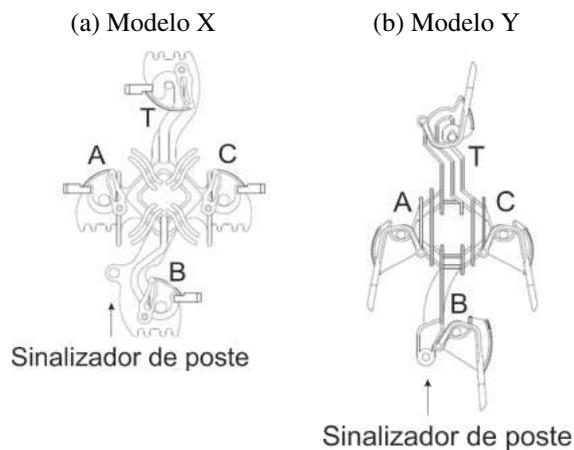
Figura 67 – Espaçadores com garras de 15 kV .



Fonte: próprio autor.

Foi definido que a fase A será a fase do mesmo lado que o sinalizador de poste (um pequeno furo redondo que aponta para o poste), conforme apresentado na Figura 68. A Figura 68 também ilustra como foram definidas e dispostas as outras fases nos espaçadores.

Figura 68 – Definição de fases.



Fonte: próprio autor.

A Figura 69 mostra foto dos espaçadores após serem contaminados e secos com um nível de poluição conhecido.

Figura 69 – Espaçadores X e Y contaminados.



Fonte: próprio autor.

4.4 Procedimentos de Ensaio

Os procedimentos de ensaio baseiam-se na norma técnica IEC-60507. Nesta norma utiliza-se o isolador padrão IEEE como referência em ensaios de alta tensão sob contaminação artificial. Neste trabalho, o elemento sob ensaio é de material polimérico, com geometria diferente do isolador padrão IEEE e além disso, está submetido a tensões trifásicas. Desta forma, algumas adaptações são realizadas no ensaio a partir da norma técnica (IEC60507, 1991) e tese (PINHEIRO, 2008).

O ensaio adotado é o da névoa limpa, onde o espaçador é artificialmente contaminado. O espaçador é submetido à ação da névoa e em seguida é aplicada a tensão. A seguir, estão descritos os passos realizados no ensaio de névoa limpa no processo de medição de corrente de fuga em espaçadores de 13,8 kV submetidos a quatro ambientes de agressividade (A-atmosfera limpa, B-contaminação leve, C-contaminação pesada, D-contaminação muito pesada) conforme estabelecidos na norma (IEC60507, 1991):

- Na preparação das amostras são utilizados oito espaçadores, sendo quatro do modelo X e quatro do modelo Y. São necessários oito espaçadores para que a corrente de fuga seja medida em cada setor de cada espaçador. Ou seja, são realizadas medições de corrente de fuga nos setores (fase-terra) A-T e C-T, e medições de corrente de fuga nos setores (fase-fase) A-B e B-C dos espaçadores, totalizando quatro setores de medição por espaçador. Vale ressaltar que nos setores B-T e A-C não foram feitas medições de corrente de fuga pois, existem percursos mais curtos onde serão realizadas medições;

- Os espaçadores são lavados em água corrente e secos segundo recomendações da norma (IEC60507, 1991);
- No processo de poluição artificial dos espaçadores o tempo de fixação do Kaolin é de 24 horas, de forma a ocorrer toda a evaporação da água sobrando apenas a poluição depositada com a quantidade de condutividade padronizada por norma (EPRI, 1982), (IEC60507, 1991);
- Cada espaçador é ensaiado separadamente, sob as mesmas condições de ensaio, ou seja, mesma temperatura, umidade e tempo de aplicação da tensão;
- A tensão aplicada aos espaçadores é a tensão de pico, considerando uma margem de cinco por cento acima, ou seja:

- Tensão aplicada nos setores de tensão de linha, A-B e B-C:

$$V_{A-B,B-C} = 1,05 \cdot 13800 \cdot \sqrt{2} = 20,492kV \quad (4.3)$$

- Tensão aplicada nos setores de tensão de fase, A-T e C-T:

$$V_{A-T,C-T} = 1,05 \cdot \frac{13800}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 11,831kV \quad (4.4)$$

- O tempo de ensaio de cada espaçador é de oito minutos, dividido em duas etapas:

Primeira etapa: Dois minutos de aspersão de água destilada. Nesta etapa busca-se picos de corrente de fuga devido à umidade presente na asperção de água destilada;

Segunda etapa: Seis minutos sem aspersão de água destilada. Nesta etapa busca-se observar o processo de decaimento de corrente de fuga à medida que a água destilada seca na superfície dos espaçadores.

Ao final do processo de coleta dos dados, os mesmos são exportados para um ambiente computacional, onde são realizadas as manipulações para elaboração dos gráficos.

4.4.1 Medição da Corrente de Fuga

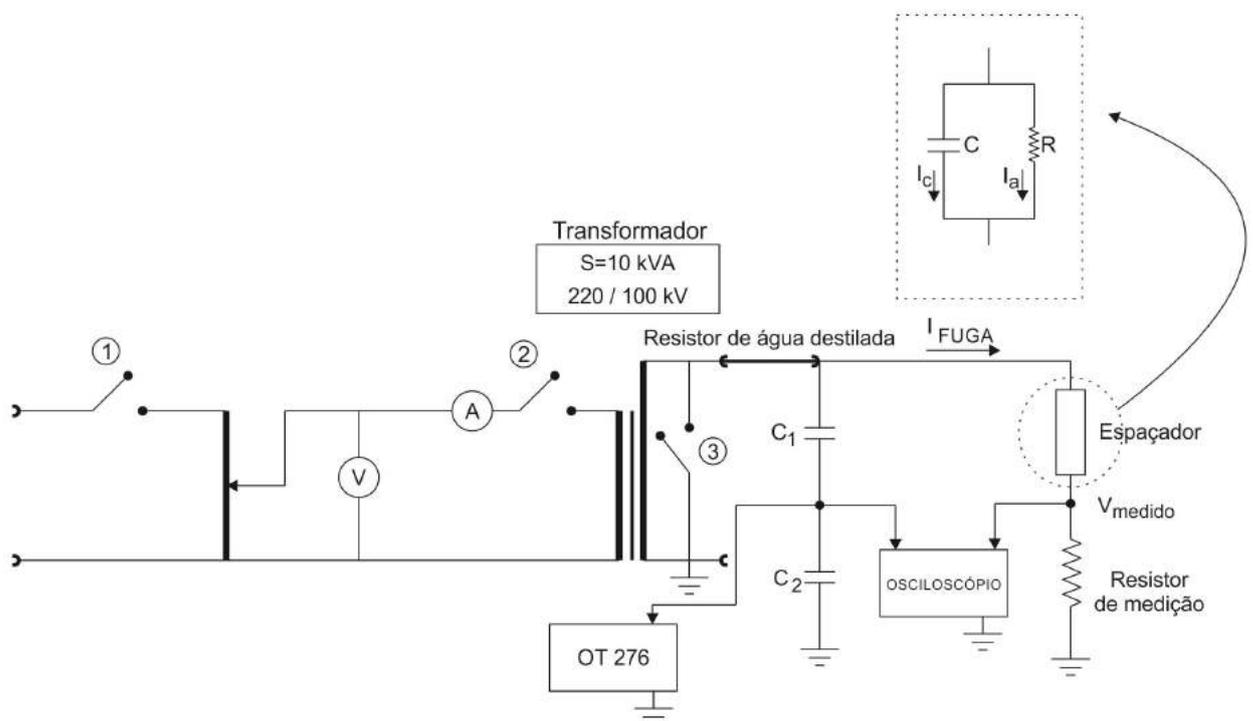
A corrente de fuga tem sido um parâmetro relevante para identificações de níveis de poluição e outros atributos de degradação do dielétrico. Relevantes trabalhos utilizam a corrente de fuga como parâmetro de degradação do dielétrico e na identificação de níveis de poluição (BEZERRA, 2004) (PINHEIRO, 2008) (OLIVEIRA, 2008) (LIMA, 2010).

O processo de medição da corrente de fuga com a utilização do Kit de Alta Tensão é ilustrado na Figura 70. Inicialmente, as chaves 1 e 2 estão abertas e a chave 3 está fechada, fazendo com que - de maneira alguma - chegue tensão no secundário do transformador. Para dar

início ao ensaio as chaves 1 e 2 são fechadas e a chave 3 é aberta. Através do controlador de tensão OT276 aumenta-se gradativamente a tensão primária do transformador, fazendo com que a tensão de secundário também aumente. A tensão é aumentada até se alcançar a tensão desejada de ensaio, sendo esta medida na capacitância C_2 do divisor capacitivo. A tensão desejada é então transferida para o espaçador.

A corrente de fuga é proporcional a tensão medida no resistor de medição, V_{medido} . Ou seja, conhecendo o valor de V_{medido} e o valor da resistência de medição tem-se o valor da corrente de fuga.

Figura 70 – Processo de medição da corrente de fuga.



Fonte: próprio autor.

A Figura 71 apresenta foto da caixa construída para medir a corrente de fuga. Dentro desta caixa de medição da corrente de fuga está presente resistor de medição, fusível e supressor de surto que oferece segurança na proteção do osciloscópio, vale salientar que a medição da corrente de fuga é feita de forma indireta, pois o que se é medido é a tensão na resistência de medição.

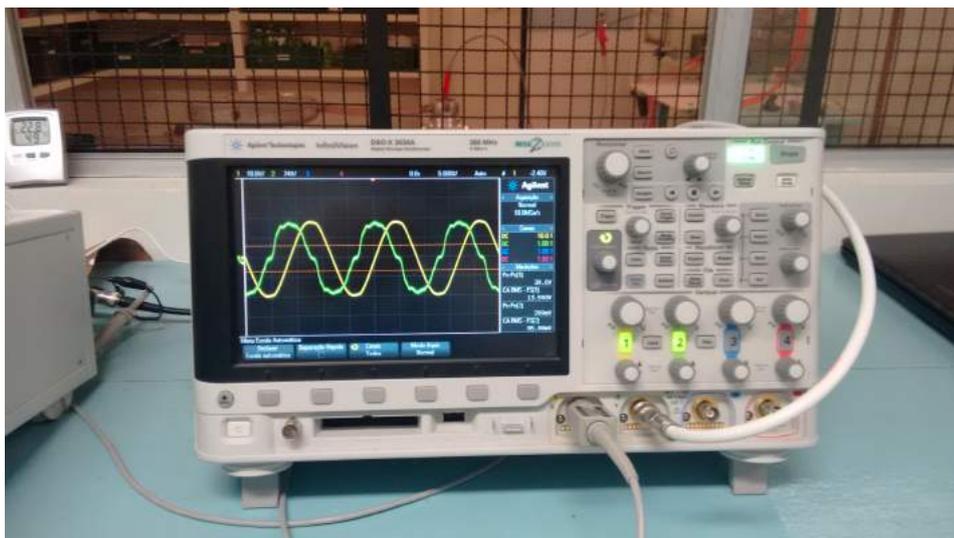
Figura 71 – Caixa de medição da corrente de fuga.



Fonte: próprio autor.

A Figura 72 apresenta foto da medição da corrente de fuga. Nota-se na Figura 72 defasagem da grandeza em verde (tensão sobre o resistor de medição da corrente de fuga) em relação à grandeza em amarelo (tensão no capacitor C_2 , referência). A grandeza em verde está adiantada em relação à amarela. Isto mostra o comportamento capacitivo do espaçador losangular na situação de ambiente seco.

Figura 72 – Foto de medição da corrente de fuga.



Fonte: próprio autor.

4.5 Resultados de Laboratório

São expostos nesta seção os resultados de medição da corrente de fuga obtidos nos espaçadores X e Y para os setores A-T, C-T, A-B e B-C dos espaçadores nas seguintes condições ambientais: 1) a seco; 2) em atmosfera limpa; 3) contaminação muito leve; 4) contaminação pesada; e, 5) contaminação muito pesada. Todos esses graus de poluição seguem as normas EPRI (EPRI, 1982) e IEC (IEC60507, 1991).

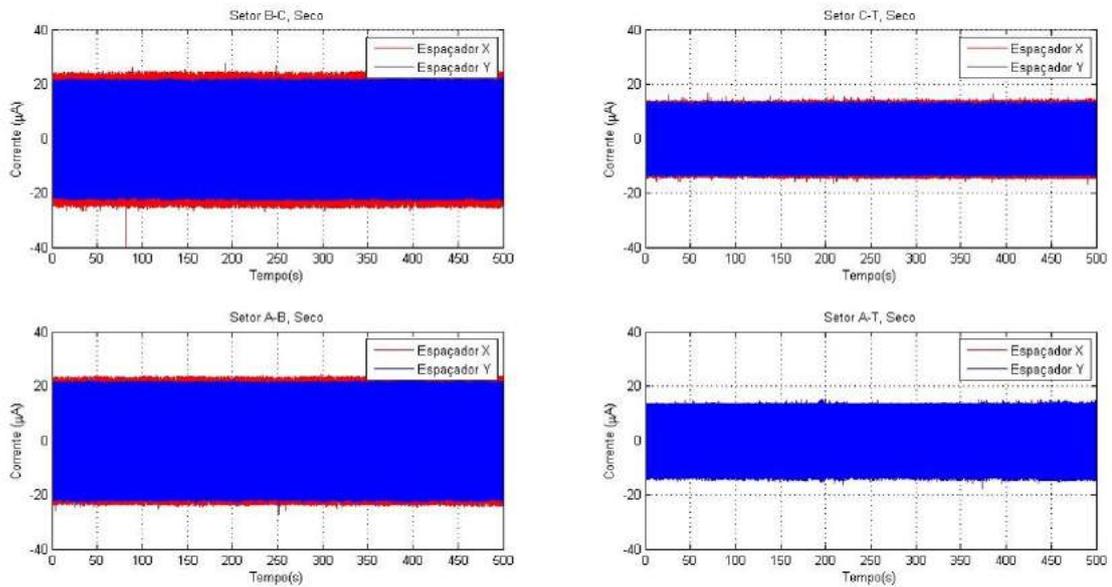
Visando diferenciar os resultados dos espaçador X do Y, os gráficos na cor vermelha correspondem ao espaçador X e os gráficos na cor azul correspondem ao espaçador Y.

Sendo o Kit de Alta Tensão monofásico, os ensaios são feitos aplicando tensão a uma única fase. Desta forma, no setor A-T é aplicada tensão de 11,831kV na fase A, e no setor C-T é aplicada tensão de 11,831kV na fase C. No setor A-B é aplicada tensão de 20,492kV na fase A, e no setor da B-C é aplicada tensão de 20,492kV na fase C. Por questões de facilidade de arranjo nas montagens, escolheu-se a fase B como referência para aplicação da tensão de 20,492kV.

No processo de medição da corrente de fuga nos setores de tensão de linha, A-B e B-C, dos espaçadores X e Y foi utilizado uma resistência de $1k\Omega$ para resistência de medição. Enquanto que quando do processo de medição nos setores de tensão de fase, A-T e C-T, dos espaçadores X e Y foi utilizado resistência de $10k\Omega$. A razão de utilizar dois valores de resistência é a de que existe limitação da amplitude do sinal da corrente de fuga no osciloscópio. Assim, sendo captado dos ensaios o valor da tensão em cima do resistor de medição e sabendo que a queda de tensão no resistor de medição é menor quando se diminui a resistência de medição, para diminuir a amplitude da tensão em cima do resistor de medição, exibida no osciloscópio, deve-se diminuir o valor do resistor de medição. Logo, quanto maior o nível de tensão utilizado, menor deve ser a resistência de medição para exibir a amplitude completa do sinal no osciloscópio.

Pode ser observado na Figura 73 as correntes de fuga nos espaçadores X e Y, estando estes espaçadores a seco. Os espaçadores possuem valores de amplitudes de corrente próximos em cada setor. Além disso, pode-se observar também nesta Figura 73 que o valor de corrente de fuga máximo nos dois espaçadores é em torno de $20\mu A$ (setores A-B e B-C), o que representa um valor muito reduzido em comparação com as situações sob poluição e umidade.

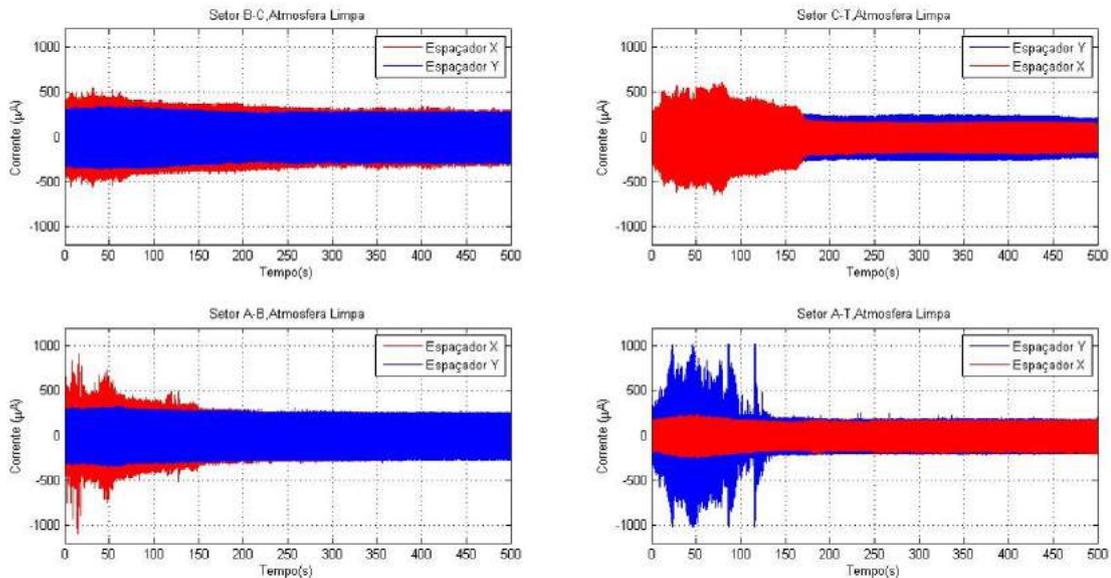
Figura 73 – Corrente de fuga nos espaçadores X e Y, a seco.



Fonte: próprio autor.

A Figura 74, apresenta os resultados de medição das correntes de fuga nos espaçadores X e Y, considerando aspersão de água destilada (durante dois minutos) com nível de poluição atmosfera limpa e, com medição continuada por mais seis minutos sem aspersão de água destilada.

Figura 74 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, atmosfera limpa.



Fonte: próprio autor.

Da Figura 74 são feitas as seguintes análises:

No espaçador X:

1) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores da ordem de $1000\mu A$. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $250\mu A$ no instante 500s.

2) O setor B-C é o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão (em torno de $300\mu A$ no instante 500s).

No espaçador Y:

3) O setor A-T é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores da ordem de $1000\mu A$. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $150\mu A$ no instante 500s.

4) O setor B-C é o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão (em torno de $300\mu A$ no instante 500s).

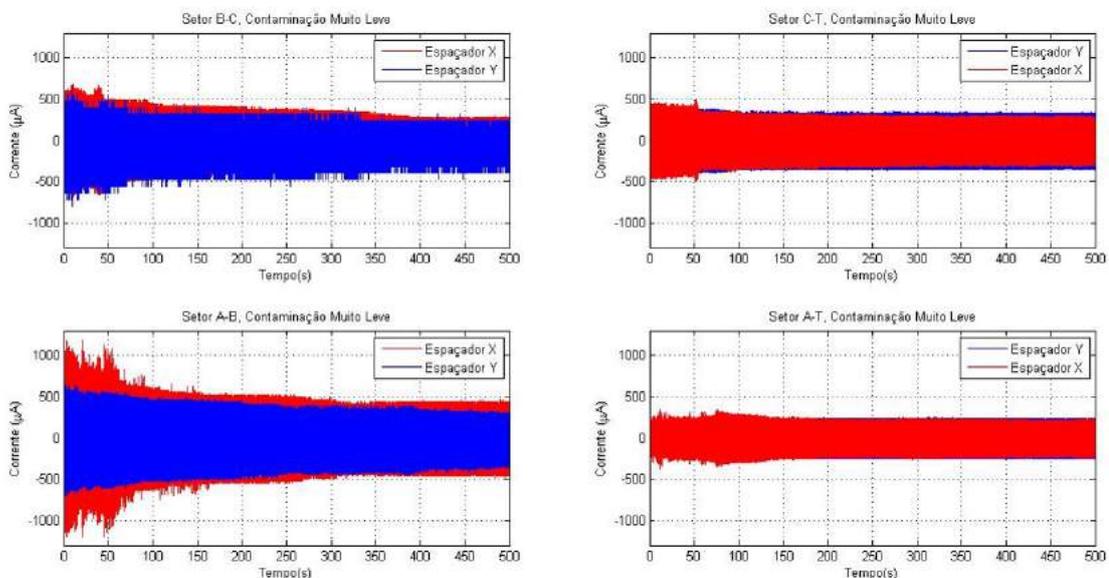
Comparando o espaçador X com o espaçador Y:

5) Durante a aspersão, o espaçador X apresenta valores de corrente de fuga maiores nos setores A-B (cerca de 100% acima), B-C (cerca de 50% acima) e C-T (cerca de 110% acima). Para o setor A-T o espaçador Y, apresenta correntes de fuga de até $1000\mu A$, enquanto que o espaçador X apresenta correntes da ordem de $200\mu A$. 6) Após a aspersão, os setores A-B e A-T

dos espaçadores X e Y apresentam valores de corrente de fuga próximos (cerca de $250\mu A$). Para o setor B-C dos espaçadores, os valores de corrente de fuga são também aproximadamente iguais (da ordem de $300\mu A$). Para o setor C-T a corrente de fuga do espaçador Y é da ordem de 30% superior a corrente de fuga do espaçador X (cerca de $200\mu A$).

A Figura 75, apresenta os resultados de medição das correntes de fuga nos espaçadores X e Y, considerando aspersão em água destilada (durante dois minutos) com nível de contaminação muito leve e, com medição continuada por mais seis minutos sem aspersão em água destilada.

Figura 75 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, contaminação muito leve.



Fonte: próprio autor.

Da Figura 75 são feitas as seguintes análises:

No espaçador X:

1) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores da ordem de $1200\mu A$. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $480\mu A$ no instante 500s.

2) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão.

No espaçador Y:

3) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores da ordem de $650\mu A$. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $250\mu A$ no instante 500s.

4) O setor C-T é o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão (em torno de

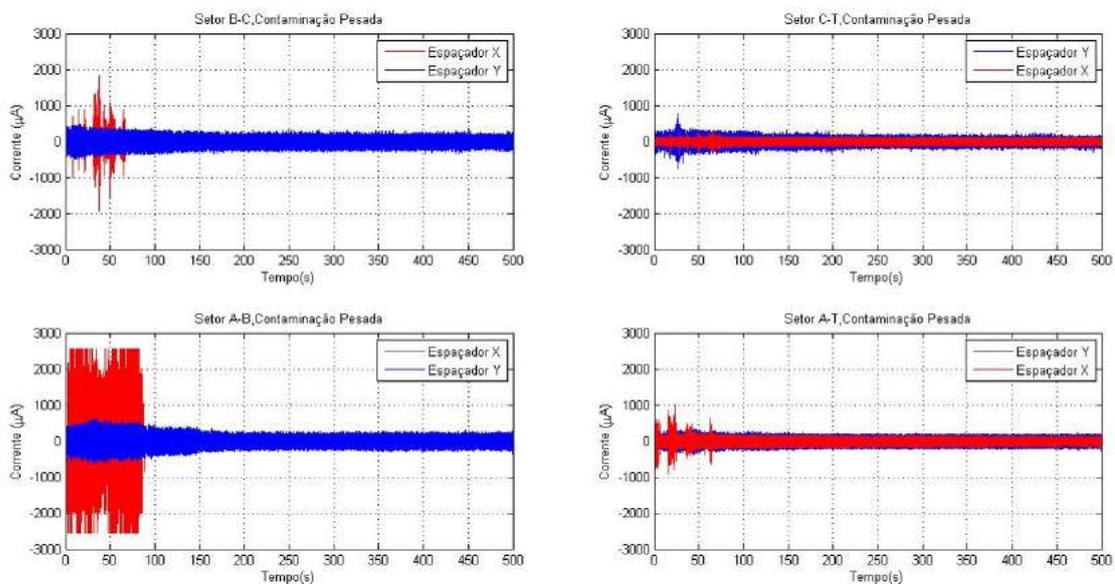
300 μ A no instante 500s).

Comparando o espaçador X com o espaçador Y:

5) Durante a aspersão, o espaçador X apresenta valores de corrente de fuga maiores nos setores A-B (cerca de 100% acima), A-T (cerca de 50% acima) e C-T (cerca de 60% acima). Para o setor B-C os espaçadores X e Y, apresentam correntes de fuga de até 600 μ A. 6) Após a aspersão, o setor A-T dos espaçadores X e Y apresentam valores de corrente de fuga próximos (cerca de 200 μ A), e o setor C-T dos espaçadores X e Y apresentam valores de corrente de fuga próximos (cerca de 250 μ A). Para o setor B-C dos espaçadores, os valores de corrente de fuga são também aproximadamente iguais (da ordem de 250 μ A). Para o setor A-B a corrente de fuga do espaçador X é da ordem de 50% superior a corrente de fuga do espaçador Y (cerca de 250 μ A).

A Figura 76, apresenta os resultados de medição das correntes de fuga nos espaçadores X e Y, considerando aspersão em água destilada (durante dois minutos) com nível de contaminação pesada e, com medição continuada por mais seis minutos sem aspersão em água destilada.

Figura 76 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, contaminação pesada.



Fonte: próprio autor.

Da Figura 76 são feitas as seguintes análises:

No espaçador X:

1) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a

valores maiores que $2500\mu\text{A}$, vale salientar que apesar da saturação da ponta de prova, na medição deste setor, não perdemos a avaliação comparativa da corrente de fuga entre os espaçadores X e Y. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $250\mu\text{A}$ no instante 500s.

2) Os setores A-B e B-C são o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão (em torno de $250\mu\text{A}$ no instante 500s).

No espaçador Y:

3) O setor C-T é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores da ordem de $750\mu\text{A}$. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $200\mu\text{A}$ no instante 500s.

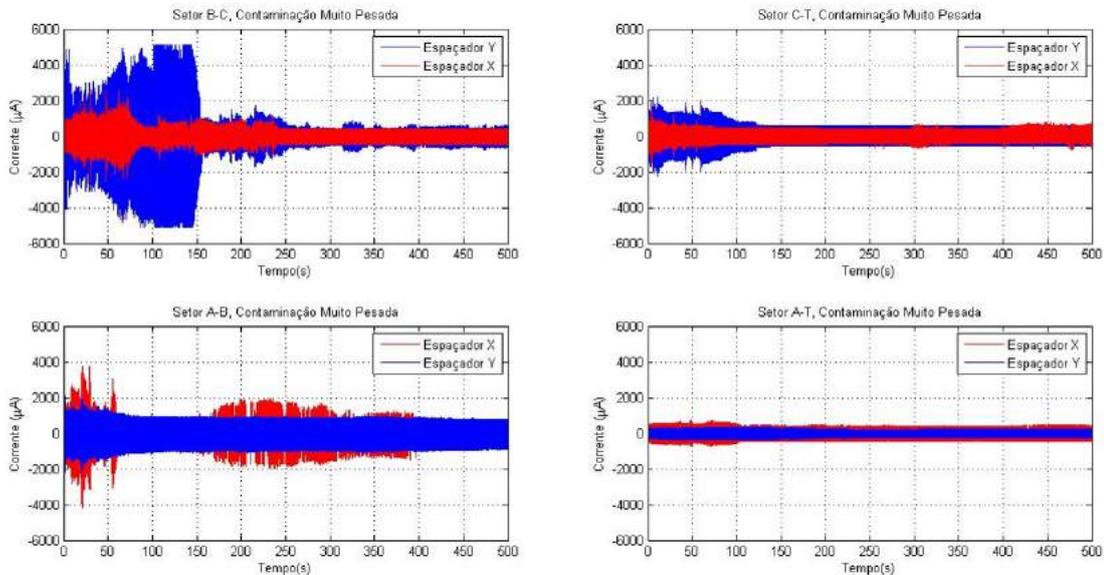
4) Os setores A-B, B-C e A-T são os que apresentam maiores corrente de fuga após a aspersão (em torno de $250\mu\text{A}$ no instante 500s).

Comparando o espaçador X com o espaçador Y:

5) Durante a aspersão, o espaçador X apresenta valores de corrente de fuga maiores nos setores A-B (cerca de 500% acima), B-C (cerca de 600% acima) e A-T (cerca de 400% acima). Para o setor C-T o espaçador Y, apresenta correntes de fuga de até $800\mu\text{A}$, enquanto que o espaçador X apresenta correntes da ordem de $250\mu\text{A}$. 6) Após a aspersão, os setores A-B e B-C dos espaçadores X e Y apresentam valores de corrente de fuga próximos (cerca de $250\mu\text{A}$). Para o setor C-T dos espaçadores X e Y, os valores de corrente de fuga são da ordem de $180\mu\text{A}$ para o espaçador Y e da ordem de $150\mu\text{A}$ para o espaçador X. Para o setor A-T a corrente de fuga do espaçador Y é da ordem de 25% superior a corrente de fuga do espaçador X (cerca de $200\mu\text{A}$).

A Figura 77, apresenta os resultados de medição das correntes de fuga nos espaçadores X e Y, considerando aspersão em água destilada (durante dois minutos) com nível de contaminação muito pesada e, com medição continuada por mais seis minutos sem aspersão em água destilada.

Figura 77 – Corrente de fuga espaçadores X e Y, contaminação muito pesada.



Fonte: próprio autor.

Da Figura 77 são feitas as seguintes análises:

No espaçador X:

1) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores da ordem de $4000\mu A$. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $800\mu A$ no instante 500s.

2) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão.

No espaçador Y:

3) O setor B-C é o que apresenta maior corrente de fuga durante a aspersão, chegando a valores maiores que $5000\mu A$, vale salientar que para este nível de poluição modificou-se a resistência de medição para $1k\Omega$ o que fez a saturação da ponta de prova ocorrer em uma corrente de fuga maior sem perder a sensibilidade de se poder observar correntes de fuga menores. Apesar da saturação ter ocorrido, não se perde a avaliação comparativa entre os espaçadores X e Y. Para este mesmo setor, após a aspersão, a corrente de fuga cai para valores em torno de $500\mu A$ no instante 500s.

4) O setor A-B é o que apresenta maior corrente de fuga após a aspersão (em torno de $800\mu A$ no instante 500s).

Comparando o espaçador X com o espaçador Y:

5) Durante a aspersão, o espaçador X apresenta valores de corrente de fuga maiores nos setores A-B (cerca de 100% acima) e A-T (cerca de 50% acima). Para os setores B-C e C-T o espaçador Y, apresenta correntes de fuga maiores que $5000\mu\text{A}$ no setor B-C, e correntes da ordem de $2100\mu\text{A}$ no setor C-T. 6) Após a aspersão, o setor A-B dos espaçadores X e Y apresentam valores de corrente de fuga próximos (cerca de $800\mu\text{A}$). Para o setor B-C dos espaçadores, os valores de corrente de fuga do espaçador Y é da ordem de $500\mu\text{A}$ e do X é da ordem de $450\mu\text{A}$. Para o setor C-T a corrente de fuga do espaçador X é da ordem de 40% superior a corrente de fuga do espaçador Y (cerca de $500\mu\text{A}$). Para o setor A-T a corrente de fuga do espaçador X é da ordem de 100% superior a corrente de fuga do espaçador Y.

Pode-se concluir que sob a situação a seco que os espaçadores X e Y apresentam amplitudes de correntes de fuga aproximadamente iguais. Contudo, apesar do crescimento da corrente de fuga no espaçador X ser superior ao crescimento da corrente de fuga no espaçador Y, à medida que ocorre aumento da poluição, este crescimento não é significativo ao ponto de considerar o espaçador Y mais adequado à sua aplicação em ambientes poluídos. Pode-se observar quando na presença de umidade em diferentes níveis de poluição que os espaçadores X e Y esboçam comportamentos diferentes nos seus diferentes setores de medição. O setor B-C do espaçador Y (na situação de contaminação muito pesada) apresenta valores acima de $5000\mu\text{A}$ durante a aspersão de água destilada, tornando-o o setor com maior amplitude de corrente de fuga dentre todos os setores e níveis de poluição, indicando, desta forma, que este espaçador não deva ser utilizado em locais de contaminação muito pesada; pois, na presença de elevada umidade poderá ocorrer rompimento dielétrico para este setor do espaçador. O fato de ter constatado no setor B-C dos espaçadores X e Y um aumento brusco da corrente de fuga no espaçador Y, nos levou a investigar a condutividade superficial depositada neste setor, logo, seguindo os procedimentos estabelecidos pela norma IEC 60507, foi constatado que a condutividade no modelo Y foi de $11,270\text{ mS/cm}$, enquanto que no modelo X de $3,877\text{ mS/cm}$, o fator que levou o modelo X a apresentar a menor medição de condutividade superficial foi o formato de suas aletas neste setor, esta geometria permitiu menor concentração de condutividade neste setor. Outro ponto, a se considerar é a possibilidade de atuação da proteção considerando o somatório das correntes de fuga nos diversos espaçadores de uma linha de distribuição (PINHEIRO, 2008).

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho apresenta contribuições relacionadas com o comportamento de espaçadores em ambientes poluídos. A performance desses acessórios está diretamente associada ao nível de poluição depositada, visto que, os isolantes podem estar sujeitos a descargas intermitentes, aumentando a corrente de fuga e perdas decorrentes. Tais eventos advêm dos elevados campos elétricos e distribuição irregular da tensão ao longo do isolante que podem provocar um colapso total da superfície isolante ou uma degradação gradual do dielétrico.

Os resultados obtidos em experimentos laboratoriais não traduziram fielmente o que se esperava a partir das simulações realizadas. Há de se ponderar, logicamente, que os dados obtidos nos experimentos se referiam a corrente de fuga, enquanto os simulados estavam associados à tensão de ruptura superficial do isolante (tensão de flashover).

Os resultados de medição de corrente fuga conduziram às seguintes constatações: o setor C-T do espaçador X apresentou desempenho superior ao mesmo setor do espaçador Y; o setor A-T do espaçador Y apresentou desempenho superior ao mesmo setor do espaçador X; o setor A-B do espaçador Y apresentou desempenho superior em relação ao mesmo setor do espaçador X; para o setor B-C dos espaçadores X e Y, embora a tensão de flashover obtida por simulações sejam próximas o espaçador Y apresenta, na poluição muito pesada, aumento brusco de corrente de fuga durante a aspersão de água destilada.

Para a busca de uma maior validação dos resultados seria necessária a avaliação das mesmas variáveis, como já comentado. Contudo, os setores A-B, C-T e A-T apresentam resultados similares tanto da tensão de flashover simulada, quanto das correntes de simulação obtidas nos experimentos, variando-se o nível da poluição depositada.

Há de se considerar, ainda, que os modelos para obtenção da tensão de flashover foram inicialmente concebidos para isoladores de disco de porcelana ou vidro e aqui utilizados para espaçadores poliméricos.

Os procedimentos adotados neste estudo podem ser aprimorados e adaptados para diferentes tipos de espaçadores, ou até mesmo para concepção de projetos de novos espaçadores, ajudando a entender como seria o seu comportamento operacional e eventuais melhorias em seu design.

5.1 Trabalhos Futuros

Em seguida, são enumeradas algumas sugestões para trabalhos futuros relacionados com o tema desta dissertação:

1. Desenvolvimento de modelo que permita extrair a corrente de fuga utilizando o próprio COMSOL;
2. Aprimoramentos no modelo para obtenção da tensão de flashover, adequando-o a espaçadores poliméricos;
3. Aferição experimental da tensão de flashover em espaçadores losangulares submetidos a contaminação;
4. Realização das simulações em um ambiente tridimensional, levando em conta outros elementos como os condutores;
5. Estudo através de simulações com outros pacotes físicos presentes no COMSOL, para determinação de pontos quentes (pacote de transferência de calor) que possa ser correlacionado com a corrente de fuga no isolante;
6. Desenvolvimento de protótipo de espaçador losangular polimérico, que apresente menores perdas relacionadas às correntes de fuga e menores concentrações de campo elétrico para evitar futuras degradações.

Referências

- ANEEL. *METODOLOGIA DE CÁLCULO TARIFÁRIO DA DISTRIBUIÇÃO*. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/metodologia-distribuicao/-/asset_publisher/e2INtBH4EC4e/content/perdas/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 16 Out 2016. Citado na página 16.
- ARCANJO, A. M. C. *Avaliação do Desempenho de Espaçadores de Linhas Compactas de 13.8kV através de Experimentos Laboratoriais*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, fevereiro 2015. Citado na página 24.
- ASENJO, E. S.; MORALES, N. O.; VALDENEGRO, A. E. Solution of low frequency complex fields in polluted insulators by means of the finite element method. *IEEE Trans. on Dielectric and Electrical Insulation*, Curitiba, Brazil., v. 4, p. 10–17, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 41.
- BARROS, R. M.; FERREIRA, T. V.; COSTA, E. G. Determinação de posicionamento Ótimo de anel equalizador em isoladores poliméricos. *Revista Científica Ingeniería Energética.*, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae, Havana, Cuba, v. 34, 2013. Citado na página 27.
- BASAVARAJA, B.; SIVAKUMAR, V. Design and evaluation of different types of insulators using pde tool box. *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies [ICCEET]*, v. 1, p. 332–337, 2012. Citado na página 27.
- BASTOS, J. P.; SADOWSKI, N. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. New York, USA.: Marcel Dekker, Inc, 2003. Citado na página 38.
- BEZERRA, J. M. B. *Caracterização de atributos de sinais para utilização de técnicas de reconhecimento de padrões na avaliação do isolamento de instalações e de equipamentos elétricos*. Dissertação (Tese de Doutorado) — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Abril 2004. Citado 4 vezes nas páginas 8, 40, 42 e 87.
- BEZERRA, J. M. B. et al. Avaliação de sensor de ultra-som como técnica preditiva na manutenção de subestações e linhas de transmissão e distribuição. *Revista Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel*, Brasília, p. 107–109, 2009. Citado na página 16.
- BEZERRA, J. M. B. et al. Estudo da distribuição de tensão em cadeias de isoladores aéreos de alta tensão em ambientes poluídos. *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.*, Uberlândia, Minas Gerais, v. 17, p. 6, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- DOI, H.; MIYUACHI, H.; MATSUMOTO, M. T. Cabos cobertos com xlpe para linhas de distribuição. *Mundo Elétrico*, p. 90–93, 1987. Citado na página 16.
- DUARTE, J. V. P. *Danos à camada isolante de cabos cobertos em redes não blindadas devido a distorções do campo elétrico na proximidade de objetos aterrados*. Dissertação (Trabalho da disciplina Teoria Eletromagnética) — UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, fevereiro 2001. Citado na página 35.
- EPRI. *Transmission Line Reference Book 345 kV and above*. 2. ed. California: Electric Power Research Institute, 1982. Citado 3 vezes nas páginas 83, 87 e 90.

FAGUNDES, R. C. *Avaliação de acessórios poliméricos de redes compactas protegidas por meio de ensaio de multiestressamento e simulação computacional*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFPR, Universidade Federal do Paraná, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 24.

FERNANDO, M. A. R. M.; GUBANSKI, S. M. Leakage current patterns on contaminated polymeric surfaces. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 6, p. 688–694, 1999. Nenhuma citação no texto.

HACKAM, R. Outdoor hv composite polymeric insulators. *IEEE*, v. 6, p. 3, 1999. Citado na página 36.

HIELEBE. *Catalogo de Condutores*. 2014. Disponível em: <<http://www.hielebe.com.br/catalogo2/sexoes.asp?item=30>>. Acesso em: 16 Out 2016. Citado na página 20.

IEC60507. *Artificial Pollution Tests on High-Voltage Insulators to be used on A.C. Systems*. Genebra, Suíça, 1991. Citado 9 vezes nas páginas 36, 79, 80, 81, 82, 83, 86, 87 e 90.

J.M.B. XAVIER J.A.R., L. D. J. S. L. Z. D. A. A. M. C. B.; SILVA, A. Computational and experimental analysis between compact distribution lines' spacers under polluted environments. *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, 2016. Citado na página 72.

KARADY, G. G.; SCHNEIDER, H. M.; RISK, F. A. M. Review of cigre and ieee research into pollution performance of nonceramic insulators: field aging effects and laboratory test techniques. *IEEE*, 1994. Citado na página 36.

KIM, J. et al. Leakage current monitoring and outdoor degradation of silicone rubber. *IEEE*, v. 8, 2001. Nenhuma citação no texto.

LAMARAO, S. T. N. *A Energia Elétrica como Campo de Pesquisa Historiográfica do Brasil*. 1996. Disponível em: <<http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4833347.pdf>>. Acesso em: 16 Out 2016. Citado na página 19.

LIMA, R. A. *Contribuições para o Desenvolvimento de um Sistema de Monitoração via Satélite do Estado de Poluição de Cadeias de Isoladores de Alta Tensão*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Fevereiro 2010. Citado na página 87.

LOPES, D. S. *Modelo de Elementos Finitos Aplicado na Avaliação de Desempenho de Isolantes em Ambientes Contaminados*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, julho 2016. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 28 e 40.

LUNA, A. M. *Materias de Engenharia Elétrica*. 1. ed. Recife: Aelfo Marques Luna, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 24, 30, 31, 32 e 49.

MACHADO, K. D. *Teoria do Eletromagnetismo*. 1. ed. Paraná: Ponta Grossa, 2000. Citado na página 26.

NADERIAN, A.; SANAYE, M.; MOHSENI, H. A. A review of artificial contamination withstand test methods of high voltage outdoor insulators. *IEEE*, p. 3, 2004. Citado na página 36.

NISHIMURA, F.; CICARELLI, L. D.; MARTINS, J. P. Rede aérea isolada e protegida de média tensão. *Eletricidade Moderna*, p. 68–73, 1994. Citado na página 16.

OLIVEIRA, S. C. *Sistema de Detecção Óptica de Descargas Parciais em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão de Alta Tensão*. Dissertação (Tese de Doutorado) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Outubro 2008. Citado na página 87.

PIAZZA, F. Acompanhamento comparativo entre ensaios de laboratório e desenvolvimento de campo de materiais poliméricos de redes compactas protegidas de distribuição de 13,8 kv. *Encontro Luso-Afro-Brasileiro de Planejamento e Exploração de Redes*, 1999. Citado na página 19.

PINHEIRO, W. *A corrente de fuga como parâmetro indicativo do estado de degradação de materiais poliméricos de rede compacta de média tensão, instalados em ambientes agressivos*. Dissertação (Tese de Doutorado) — USP, Universidade de São Paulo, julho 2008. Citado 4 vezes nas páginas 34, 86, 87 e 97.

PLP. *Catálogo de Espaçadores*. 2015. Disponível em: <<http://www.plp.com.br/site/aprovados-no-curso-de-cabeamento-senac/itemlist/user/62-administrator?start=20>>. Acesso em: 1 junho 2016. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 22.

PROJECT-EHV. *EHV Transmission Line Reference Book*. Nova Iorque, NY, EUA.: [s.n.], 1968. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.

PUC-MINAS. *Apostila de Métodos Numéricos*. 109 p. Disponível em: <<http://www.matematica.pucminas.br/lcn/apostilas/ApostiladeElementosFinitos.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2016. Citado na página 39.

RIZK, F. A. M. Mathematical models for pollution flashover. *Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.

R.SUNDARARAJAN; GORUR, R. Dynamic modeling of flashover on dielectric surfaces. *Electra*, v. 78, p. 71–103, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 40, 42 e 72.

SEGATTO, A. G. *Estudo e Projeto de Rede Elétrica Compacta Protegida*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — UFES, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 19, 22 e 23.

SILVA, R. F. *Trilhamento Elétrico sobre Materiais Poliméricos pela Análise da Energia Absorvida Devido as Descargas Elétricas Superficiais*. Dissertação (Tese de Doutorado) — UFPR, Universidade Federal do Paraná, 2014. Citado na página 37.

SILVA, S. H. M. *Aplicação de Técnicas de Elementos Finitos para Mapeamento de Campos Elétricos sobre Cavidades Internas a Isoladores Poliméricos de 13.8 kv*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Junho 2013. Citado na página 39.

SOUZA, R. M. *O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor*. 2003. 40 p. Disponível em: <http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>. Acesso em: 1 maio 2016. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

VILAR, P. B. et al. Caracterização térmica e elétrica de poluição salina em isoladores de vidro. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE.*, p. 6, 2012. Citado na página 27.

VOLAT, C. Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer. *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE, C*, p. 409–413, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 11, 27, 40, 41 e 47.

WERNECK, M. M. et al. Desenvolvimento de sistema de detecção e monitoramento de correntes de fuga em isoladores através de fibra Óptica. *II Citenel*, 2003. Citado na página 32.

XAVIER, J. A. R. *Aplicação de Modelos de Elementos Finitos para Mapeamento da Distribuição de Potencial em Espaçadores de Redes de Distribuição na Classe de Tensão de 13.8 kV*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Fevereiro 2015. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 40 e 44.

ZHAO, T.; COMBER, M. G. Calculation of electric field and potential distribution along nonceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers. *IEEE Transactions on Power Delivery.*, p. 313–318, 2000. Citado na página 29.