

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



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Modelo de Elementos Finitos Aplicado na Avaliação  
de Desempenho de Isolantes em Ambientes Contaminados**

**Diego Soares Lopes**

Diego Soares Lopes

# Modelo de Elementos Finitos Aplicado na Avaliação de Desempenho de Isolantes 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: José Maurício de Barros Bezerra, *D.Sc.*

Recife, Brasil

Julho de 2016

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

L864m	<p>Lopes, Diego Soares. Modelo de elementos finitos aplicado na avaliação de desempenho de isolantes em ambientes contaminados / Diego Soares Lopes. – 2016. 92 folhas, il., gráfs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2016. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia Elétrica. 2. Isoladores. 3. Modelagem. 4. Distribuição de potencial. 5. Distribuição de campo elétrico. 6. Poluição. I. Bezerra, José Maurício de Barros. (Orientador). II. Título.</p>	
		UFPE
	621.3 CDD (22. ed.)	BCTG/2016-203



# Universidade Federal de Pernambuco

## *Pós-Graduação em Engenharia Elétrica*

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

# DIEGO SOARES LOPES

TÍTULO

***“MODELO DE ELEMENTOS FINITOS APLICADO NA AVALIAÇÃO DE  
DESEMPENHO DE ISOLANTES EM AMBIENTES CONTAMINADOS”***

A comissão examinadora composta pelos professores: JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA, DEE/UFPE, ZANONI DUEIRE LINS, DEE/UFPE e LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, DEE/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **DIEGO SOARES LOPES APROVADO.**

Recife, 19 de Julho de 2016.

---

**MARCELO CABRAL CAVALCANTI**  
Coordenador do PPGEE

---

**JOSÉ MAURÍCIO DE BARROS BEZERRA**  
Orientador e Membro Titular Interno

---

**LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS**  
Membro Titular Externo

---

**ZANONI DUEIRE LINS**  
Membro Titular Interno

*Dedico este trabalho à minha mãe,  
companheira determinada, dedicada e corajosa  
graças à ela tudo isso foi possível.*

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, não importando de qual religião seja, que me deu o dom da vida e a capacidade de perseverar conseguindo assim percorrer o longo caminho em busca do título de mestre em engenharia elétrica. Agradeço também à minha mãe, Arlene, que se esforçou na criação de sua família, que me deu forças pra continuar a estudar, que nas madrugadas de estudo me apoiou, enfim por tudo que ela fez e representou na minha vida e nessa conquista. Agradeço também a toda minha família, em especial ao meu irmão Thiago, que sempre esteve presente nos momentos, sejam eles bons ou ruins, pelos quais passei. Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco e ao professor José Maurício de Barros Bezerra, pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por me orientarem e me moldarem para melhor servir a sociedade através dos conhecimentos adquiridos na elaboração desta pesquisa. Agradeço aos companheiros do GPTD (Grupo de Pesquisa em Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica) Ayrllw, Alexandro Xavier, Alexsandro Aleixo, Caio, Jadiel, João Marcus, Lauro, Lígia, Márcio Silva, Samuel, Suelen, Viviane e Zanoni pelos questionamentos pertinentes e ajuda oferecida durante todo o andamento da pesquisa. Agradeço ao Paulo Britto da STN (Sistema de Transmissão Nordeste S.A.), pelo fornecimento dos desenhos e informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço a todos os meus amigos que me trazem momentos de alegria e ajudam a superar as adversidades que se apresentam no caminho, assim como todos aqueles que de forma direta ou indireta me ajudaram a realizar essa conquista.

A Todos vocês os meus sinceros agradecimentos.

# Resumo

A presente dissertação aplica um modelo computacional para mapeamento da distribuição de potencial e campo elétrico ao longo de dispositivos isolantes na presença de uma camada condutiva em sua superfície. Na natureza, a formação dessa camada se dá através da deposição de poluição juntamente com a umidade ambiental. A pesquisa teve como base outros estudos presentes na literatura que abordam a mesma temática. A avaliação do comportamento da distribuição de potencial e campo elétrico em peças isolantes é de fundamental importância na determinação de possíveis regiões, as quais esses dispositivos apresentem maior estresse elétrico, tais regiões podem levar a descargas parciais e possíveis desgastes dos acessórios levando assim à sua falha. O modelo aplicado foi implementado utilizando o MEF (Método dos Elementos Finitos) através da construção do ambiente no *software COMSOL Multiphysics* e da representação gráfica do acessório no *AutoCAD*. O estudo foi realizado em isoladores de vidro e polimérico, bem como em espaçadores, sob diferentes níveis de poluição. Os resultados obtidos são coerentes e apresentam consonância com a teoria envolvida neste estudo.

**Palavras-chave:** Isoladores. Modelagem. Distribuição de Potencial. Distribuição de Campo elétrico. Poluição.

# Abstract

This dissertation applies a computational model to map the voltage distribution and electric field along dielectric devices in presence of a thin conductive layer on its surface. In the nature this thin layer may appear due to pollution deposition with environmental humidity. The base of this research are another studies found in literature with the same theme. The behavior of voltage distribution and electric field in dielectric devices has significant importance helping to determine possible regions where this devices present higher stress levels, causing partial discharges and possible damage to the accessories leading them to a failure condition. The applied model was implemented using FEM (finite element method) building an environment in *COMSOL Multiphysics* software and graphically representing each accessory through using *AutoCAD*. The present study was done in insulators made of glass and polymer, as well as spacers, under several pollution levels. The obtained results are consistent and show consonance with the whole theory involved in this research.

**Keywords:** Insulators. Modeling. Voltage Distribution. Electric Field Distribution. Pollution.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura de um isolador polimérico. . . . .	21
Figura 2 – Exemplos de isoladores de pino . . . . .	22
Figura 3 – Exemplos de isoladores tipo pilar. . . . .	22
Figura 4 – Exemplos de isoladores de suspensão. . . . .	23
Figura 5 – Exemplo de espaçador losangular instalado em rede. . . . .	24
Figura 6 – Exemplos de distribuição de potencial em isoladores de vidro. . . . .	26
Figura 7 – Exemplos de distribuição de potencial e campo elétrico ao longo da distância de escoamento em isoladores poliméricos. . . . .	26
Figura 8 – Desenvolvimento das descargas em uma unidade de isolador contaminado durante o ciclo de umedecimento. . . . .	29
Figura 9 – Aplicação do Método dos Elementos Finitos em peça industrial com geometria irregular e composição não homogênea. . . . .	30
Figura 10 – Discretização de um domínio em sub-regiões. . . . .	31
Figura 11 – Elementos finitos mais usuais. . . . .	31
Figura 12 – Fotos do isolador de vidro. . . . .	33
Figura 13 – Foto do isolador polimérico. . . . .	34
Figura 14 – Espaçador utilizado. . . . .	35
Figura 15 – Interface do AutoCAD. . . . .	36
Figura 16 – Interface do COMSOL. . . . .	37
Figura 17 – Representação gráfica do isolador de vidro utilizado. . . . .	38
Figura 18 – Representação gráfica da cadeia de isoladores de vidro com 16 unidades. . . . .	38
Figura 19 – Representação gráfica do isolador polimérico. . . . .	39
Figura 20 – Representação gráfica do espaçador. . . . .	39
Figura 21 – Geometria desenvolvida para a simulação. . . . .	41
Figura 22 – Regiões de cada material (em azul mais escuro). . . . .	42
Figura 23 – Condições de contorno. . . . .	43
Figura 24 – Malhas geradas no COMSOL. . . . .	43
Figura 25 – Comparação de resultados. . . . .	44
Figura 26 – Distribuição de campo elétrico. . . . .	44
Figura 27 – Resultados em curvas de nível. . . . .	45
Figura 28 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus. . . . .	45
Figura 29 – Geometria desenvolvida para a simulação em cadeia com três unidades. . . . .	46
Figura 30 – Regiões de cada material, cadeia com três unidades (em azul mais escuro). . . . .	47
Figura 31 – Condições de contorno, cadeia com três unidades (em azul mais escuro). . . . .	48
Figura 32 – Malhas geradas no COMSOL, cadeia com três unidades. . . . .	49
Figura 33 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia com três unidades. . . . .	49

Figura 34 – Resultado de campo elétrico para cadeia com três unidades. . . . .	50
Figura 35 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus, cadeia com três unidades. . .	50
Figura 36 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia com dezesseis unidades. . .	51
Figura 37 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia com dezesseis unidades. . .	52
Figura 38 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus, cadeia com dezesseis unidades.	52
Figura 39 – Geometria desenvolvida para a simulação, isolador polimérico de alta tensão.	53
Figura 40 – Regiões de cada material, cadeia polimérica próxima ao pino (em azul mais escuro). . . . .	54
Figura 41 – Condições de contorno, cadeia de isolador polimérico (em azul mais escuro).	55
Figura 42 – Malhas geradas no COMSOL, isolador polimérico de alta tensão. . . . .	55
Figura 43 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia de isolador polimérico. . .	56
Figura 44 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia de isolador polimérico. . .	56
Figura 45 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus, cadeia isolador polimérico.	57
Figura 46 – Geometria desenvolvida para simulação, espaçador. . . . .	58
Figura 47 – Regiões de cada material presente na simulação do espaçador (em azul mais escuro). . . . .	58
Figura 48 – Condições de contorno aplicadas no espaçador (em azul mais escuro). . . .	59
Figura 49 – Malha desenvolvida para simulação, espaçador. . . . .	60
Figura 50 – Resultados de distribuição de potencial no espaçador. . . . .	60
Figura 51 – Resultados de distribuição de campo elétrico no espaçador. . . . .	61
Figura 52 – Distribuição de potencial por setor no espaçador. . . . .	61
Figura 53 – Distribuição de campo elétrico por setor no espaçador. . . . .	62
Figura 54 – Modelo numérico de um isolador de 28kV, exibindo as duas formas de aproximação. . . . .	64
Figura 55 – Distribuição de potencial variando-se a poluição. . . . .	67
Figura 56 – Distribuição de campo elétrico variando-se a poluição. . . . .	67
Figura 57 – Distribuição de potencial variando-se o nível de poluição (visualização em 3D).	68
Figura 58 – Distribuição de campo elétrico variando-se o nível de poluição (visualização em 3D). . . . .	69
Figura 59 – Distribuição de potencial variando-se a poluição em cadeia com três unidades.	70
Figura 60 – Distribuição de campo elétrico variando-se a poluição em cadeia com três unidades. . . . .	70
Figura 61 – Potencial elétrico variando-se a poluição em cadeia de três unidades (em 3D).	71
Figura 62 – Campo elétrico variando-se a poluição em cadeia de três unidades (em 3D).	72
Figura 63 – Distribuição de potencial, variando-se a poluição em cadeia com dezesseis unidades. . . . .	73
Figura 64 – Campo elétrico variando-se a poluição em cadeia com dezesseis unidades. . .	73
Figura 65 – Potencial elétrico variando-se a poluição em cadeia de dezesseis unidades (em 3D). . . . .	74

Figura 66 – Campo elétrico cadeia com dezesseis unidades próximo ao pino (em 3D). . . . .	75
Figura 67 – Campo elétrico cadeia com dezesseis unidades em torno da sexta unidade considerando o sentido terra para potencial (em 3D). . . . .	76
Figura 68 – Distribuição de potencial em isolador polimérico. . . . .	77
Figura 69 – Campo elétrico variando-se a poluição em isolador polimérico. . . . .	77
Figura 70 – Potencial elétrico variando-se a poluição em isolador polimérico (em 3D). . . . .	78
Figura 71 – Campo elétrico variando a poluição em isolador polimérico junto ao pino (em 3D). . . . .	78
Figura 72 – Campo elétrico variando a poluição em isolador polimérico do meio para o lado terra (em 3D). . . . .	79
Figura 73 – Exemplos de distribuição de potencial em setores do espaçador no instante em que a fase A apresenta-se no valor de pico. . . . .	80
Figura 74 – Distribuição de potencial no espaçador. (Pico da fase A) . . . . .	81
Figura 75 – Distribuição de campo elétrico no espaçador (Pico da fase A). . . . .	81
Figura 76 – Distribuição de potencial no espaçador (Pico da fase B). . . . .	82
Figura 77 – Distribuição de campo elétrico no espaçador (Pico da fase B). . . . .	82
Figura 78 – Distribuição de potencial elétrico no espaçador (Pico da fase C). . . . .	83
Figura 79 – Distribuição de campo elétrico no espaçador (Pico da fase C). . . . .	83
Figura 80 – Geometria da cadeia de dezesseis unidades com anéis equalizadores. . . . .	86
Figura 81 – Distribuição de potencial e campo elétrico na cadeia de isolador de vidro com dezesseis unidades, com e sem anel equalizador para a cadeia sem poluição (em 3D). . . . .	86
Figura 82 – Distribuição de potencial e campo elétrico na cadeia de isolador de vidro com dezesseis unidades, com e sem anel equalizador para a cadeia sem poluição. . . . .	87

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Distância de escoamento para cada setor do espaçador. . . . .	35
Tabela 2 – Permissividades elétricas relativas de cada material que compõe o modelo. .	42
Tabela 3 – Valores das distâncias de escoamento específicas para diferentes ambientes.	48
Tabela 4 – Informações sobre os valores das permissividades elétricas relativas utilizadas, cadeia de isolador polimérico de alta tensão. . . . .	54
Tabela 5 – Informações sobre os valores das permissividades elétricas utilizadas, espaçador.	59
Tabela 6 – Níveis de condutividade utilizados para modelar os níveis de poluição. . . .	66
Tabela 7 – Valores máximos de campo elétrico internos ao isolador para cada nível de poluição. . . . .	69
Tabela 8 – Valores máximos de campo elétrico internos para a cadeia de três isoladores em cada nível de poluição. . . . .	72
Tabela 9 – Valores máximos de campo elétrico internos para a cadeia de dezesseis isoladores em cada nível de poluição. . . . .	75
Tabela 10 – Valores máximos de campo elétrico internos para isolador polimérico em cada nível de poluição. . . . .	79
Tabela 11 – Valores máximos de campo elétrico na superfície de cada acessório variando-se o nível de poluição. . . . .	85

# 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
CHESF	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
EDP	Equação Diferencial Parcial
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
MEF	Método dos Elementos Finitos
STN	Sistema de Transmissão Nordeste
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

# Lista de símbolos

$\sigma_v$	Condutividade volumétrica da poluição
$J_v$	Densidade de corrente volumétrica
$D$	Densidade de fluxo elétrico
$\rho_v$	Densidade volumétrica de carga
$d_i$	Distância de escoamento de cada isolador
$d_e$	Distância de escoamento específica
$d$	Espessura da camada de poluição
$\omega$	Frequência de operação
$E$	Módulo do campo elétrico
$N_{isol}$	Número de isoladores
$\epsilon$	Permissividade absoluta do material
$\epsilon_r$	Permissividade relativa do material
$V$	Potencial elétrico
$U_\lambda$	Tensão aplicada
$\vec{E}$	Vetor campo elétrico

# Sumário

1	INTRODUÇÃO . . . . .	17
1.1	Contextualização . . . . .	17
1.2	Motivação . . . . .	17
1.3	Objetivos da Dissertação de Mestrado . . . . .	18
1.4	Organização Textual . . . . .	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .	20
2.1	Isoladores de Linhas de Transmissão . . . . .	20
2.2	Espaçadores de Redes Compactas de Distribuição . . . . .	23
2.3	Estudo da Distribuição de Potencial e Campo Elétrico em Isoladores . . . . .	24
2.4	Estudo do Fenômeno de Degradação em Materiais Isolantes . . . . .	26
2.4.1	Processo de Contaminação dos Isoladores . . . . .	27
2.4.2	Possíveis Problemas Causados pelo Fenômeno . . . . .	27
2.4.2.1	Descargas Parciais Internas . . . . .	27
2.4.2.2	Descargas Parciais Superficiais . . . . .	28
2.4.2.3	Arborescência . . . . .	28
2.4.2.4	Trilhamento . . . . .	28
2.4.3	Desenvolvimento do Processo de Ruptura Superficial em Isoladores . . . . .	28
2.5	Método dos Elementos Finitos (MEF) . . . . .	30
3	MODELAGEM DO PROBLEMA SEM POLUIÇÃO . . . . .	33
3.1	Dispositivos Utilizados . . . . .	33
3.1.1	Isolador de Vidro . . . . .	33
3.1.2	Isolador Polimérico de Alta Tensão . . . . .	34
3.1.3	Espaçador de Linhas Compactas Aéreas . . . . .	34
3.2	Softwares Utilizados . . . . .	35
3.2.1	AutoCAD . . . . .	35
3.2.2	COMSOL Multiphysics . . . . .	36
3.3	Desenhos no AutoCAD . . . . .	37
3.3.1	Desenho do Isolador de Vidro e das Cadeias dos Isoladores de Vidro . . . . .	38
3.3.2	Desenho do Isolador Polimérico . . . . .	38
3.3.3	Desenho do Espaçador . . . . .	39
3.4	Modelagem do Fenômeno no COMSOL . . . . .	40
3.4.1	Características Gerais dos Modelos . . . . .	40
3.4.2	Isolador de Vidro - Uma Unidade . . . . .	40

3.4.2.1	Geometria Utilizada . . . . .	40
3.4.2.2	Definição dos Materiais . . . . .	41
3.4.2.3	Definição das Condições de Contorno . . . . .	41
3.4.2.4	Definição da Malha . . . . .	43
3.4.2.5	Resultados Obtidos para o Isolador sem Poluição . . . . .	44
3.4.3	<b>Isolador de Vidro - Cadeia com Três Unidades . . . . .</b>	<b>46</b>
3.4.3.1	Geometria Utilizada . . . . .	46
3.4.3.2	Definição dos Materiais . . . . .	46
3.4.3.3	Definição das Condições de Contorno . . . . .	47
3.4.3.4	Definição da Malha . . . . .	48
3.4.3.5	Resultados Obtidos para a Cadeia de Três Unidades sem Poluição . . . . .	49
3.4.4	<b>Isolador de Vidro - Cadeia com Dezesesseis Unidades . . . . .</b>	<b>51</b>
3.4.4.1	Considerações Gerais . . . . .	51
3.4.4.2	Resultados Obtidos para o Isolador sem Poluição . . . . .	51
3.4.5	<b>Isolador Polimérico de Alta Tensão . . . . .</b>	<b>53</b>
3.4.5.1	Geometria Utilizada . . . . .	53
3.4.5.2	Definição dos Materiais . . . . .	53
3.4.5.3	Definição das Condições de Contorno . . . . .	54
3.4.5.4	Definição da Malha . . . . .	55
3.4.5.5	Resultados Obtidos para o Isolador sem Poluição . . . . .	56
3.4.6	<b>Espaçador de Rede de Distribuição Compacta . . . . .</b>	<b>57</b>
3.4.6.1	Geometria Utilizada . . . . .	57
3.4.6.2	Definição dos Materiais . . . . .	58
3.4.6.3	Definição das Condições de Contorno . . . . .	59
3.4.6.4	Definição da Malha . . . . .	60
3.4.6.5	Resultados Obtidos para o Espaçador sem Poluição . . . . .	60
3.5	<b>Modelo de Poluição Depositada Usando Elementos Finitos . . . . .</b>	<b>62</b>
3.5.1	Modelagem de Poluição por Aproximação Volumétrica . . . . .	62
3.5.2	Modelagem de Poluição por Aproximação Superficial . . . . .	63
4	<b>RESULTADOS DA MODELAGEM COM POLUIÇÃO . . . . .</b>	<b>66</b>
4.1	Considerações Gerais . . . . .	66
4.2	Resultados . . . . .	67
4.2.1	Isolador de Vidro Padrão . . . . .	67
4.2.2	Cadeia de Isolador de Vidro Padrão com três unidades . . . . .	70
4.2.3	Cadeia de Isolador de Vidro Padrão com Dezesesseis Unidades . . . . .	73
4.2.4	Cadeia de Isolador Polimérico de Alta Tensão . . . . .	76
4.2.5	Espaçador de Rede de Distribuição . . . . .	80
4.2.5.1	Instante em que a Fase A apresenta o valor de pico . . . . .	81
4.2.5.2	Instante em que a Fase B apresenta o valor de pico . . . . .	82

4.2.5.3	Instante em que a Fase C apresenta o valor de pico . . . . .	83
4.3	Conclusões dos Resultados e das Análises . . . . .	84
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	88
5.1	Trabalhos Futuros . . . . .	89
	REFERÊNCIAS . . . . .	90

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A energia elétrica é de fundamental importância para a sociedade atual, tornando-se, desde sua popularização, um insumo básico para quase todas as atividades desenvolvidas seja ela comercial, residencial ou industrial.

O processamento de energia elétrica é composto por sistemas complexos de geração, onde ocorre a conversão de uma forma primária de energia em eletricidade, transmissão, responsáveis pelo transporte energético dos locais de geração até os centros de consumo, e distribuição, redes as quais entregam a energia ao consumidor final. Em boa parte dos sistemas elétricos existem regiões com diferentes níveis de potencial que necessitam ser separados empregando-se dispositivos denominados de isoladores. Esses acessórios são de materiais isolantes de diversas naturezas, dispostos em vários formatos a depender da aplicação aos quais estarão sendo utilizados.

Os isolamentos podem ser divididos, de maneira geral, em poliméricos, constituídos por materiais baseados em polímeros (plásticos, borrachas, dentre outros.), e cerâmicos, constituídos por materiais de natureza cerâmica (porcelana, vidro, dentre outros.). Apesar do crescente emprego, e de uma melhor performance dos isoladores poliméricos em ambientes poluídos ou sujeitos a vandalismo, os isoladores do tipo cerâmico são mais utilizados em linhas de transmissão e subestações devido a maior experiência com esse tipo de dispositivo e das técnicas de diagnóstico dos mesmos serem mais confiáveis.

## 1.2 Motivação

A influência da poluição em isolamentos têm consequências indesejáveis, tais como a ocorrência de descargas parciais, que podem levar a degradação das unidades isolantes e, em casos mais extremos, até retirar a linha ou subestação de operação.

A interrupção, mesmo que temporária, do suprimento da energia elétrica acarreta prejuízos às unidades consumidoras e à concessionária de energia. A ocorrência de defeitos em isolamentos podem resultar em prejuízos como: danos em equipamentos; perda de faturamento; aumento do custo de manutenção; multas por parte das agências reguladoras, no caso do Brasil a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica); risco a vida da população, entre outros.

A poluição, quando associada à umidade, formam uma camada condutiva responsável pelo surgimento de descargas parciais e possível ruptura do isolamento elétrico. Ao se depositarem sobre o isolante e, caso entrem em contato com umidade, os poluentes diminuem a resistência superficial permitindo a evolução de mecanismos que levam à ruptura superficial do

isolamento. O processo desenvolve-se da seguinte forma: elevação da corrente de fuga; formação de bandas secas e de arcos elétricos superficiais, mudanças nos perfis de distribuição de potencial e campo elétrico dentre outros. Para minimizar esse problema, lavagens periódicas são realizadas junto ao isolante, removendo a poluição depositada e evitando distúrbios operacionais pelas razões supracitadas.

Com este propósito as empresas concessionárias buscam o agendamento de lavagens que possam ser realizadas de maneira otimizada, de tal forma que não se torne escassa, levando ao excesso de acúmulo de poluentes na cadeia de isoladores, nem excessiva, levando ao aumento desnecessários dos custos de manutenção.

Os estudos para entendimento do comportamento de isoladores em linhas de transmissão sob ambientes poluídos se revestem de grande importância, na conjuntura atual do setor elétrico brasileiro. Uma das formas para aferição do nível de poluição depositada é através da análise do comportamento da distribuição de tensão e campo elétrico nos acessórios isolantes, quando submetidos à presença de poluição e umidade.

### 1.3 Objetivos da Dissertação de Mestrado

O presente trabalho busca aplicar um modelo computacional para determinar o comportamento da distribuição de potencial e do campo elétrico em dispositivos isolantes submetidos a algum nível de poluição depositada juntamente com a presença de umidade, que leva à formação de uma fina camada condutiva. Esta é a motivação para o desenvolvimento desta Dissertação de Mestrado, cujos objetivos são listados a seguir:

1. Revisão bibliográfica sobre o estudo da distribuição de potencial em isoladores;
2. Revisão bibliográfica sobre as técnicas utilizadas e modelos para determinação da distribuição de potencial e campo elétrico em acessórios isolantes limpos e na presença de uma camada condutiva;
3. Aplicação de um modelo que possibilite avaliar a distribuição de potencial e do campo elétrico em um conjunto isolador quando o mesmo apresenta formação de superfície condutiva que levam a modificações em suas distribuições de potencial e de campo elétrico.

Através deste modelo buscou-se montar estudos de caso em unidades isolantes utilizadas em instalações elétricas de transmissão e distribuição de energia elétrica, tais como isoladores de vidro, isoladores poliméricos e espaçadores de redes de distribuição compactas.

## 1.4 Organização Textual

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2** - Fundamentação teórica: abordagem mais aprofundada sobre isoladores de linhas de transmissão (cerâmicos e poliméricos), bem como espaçadores de redes de distribuição compactas. Estudo da distribuição de potencial e campo elétrico em acessórios isolantes, bem como do fenômeno da formação da camada condutiva em isolantes, e suas consequências, além da abordagem sobre o método dos elementos finitos;
- **Capítulo 3** - Modelagem do Problema sem Poluição: apresentação dos dispositivos dielétricos empregados nas simulações, bem como os softwares utilizados para aplicação do modelo (AutoCAD<sup>©</sup>, e COMSOL Multiphysics<sup>®</sup>). Explanação sobre a implementação no ambiente COMSOL, para cada um dos dispositivos utilizados. Abordagem da técnica utilizada para modelagem da poluição depositada utilizando o método dos elementos finitos;
- **Capítulo 4** - Resultados da Modelagem com Poluição: apresentação das distribuições de potenciais e de campo elétrico encontradas utilizando a aplicação do modelo para diferentes tipos de acessórios e níveis de poluição, assim como a comparação dos diferentes perfis encontrados;
- **Capítulo 5** - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros oriundos desta pesquisa.

## 2 Fundamentação Teórica

Atualmente existem modelos que descrevem a modelagem da poluição em isoladores que são capazes de determinar o comportamento da distribuição de tensão e do campo elétrico em todo o isolante para diferentes valores de condutividade de poluição depositada em sua superfície.

O principal objetivo dessa dissertação de mestrado é descrever sobre a aplicação de uma técnica para obtenção e análise de diferentes perfis de distribuição de potencial e campo elétrico em um dispositivo isolador quando o mesmo apresenta a formação de uma fina camada condutiva em sua superfície. Este capítulo apresenta a teoria que embasa a pesquisa realizada bem como uma exposição mais detalhada do objeto de estudo.

### 2.1 Isoladores de Linhas de Transmissão

Isoladores em geral são aplicados a sistemas elétricos com a função de manter a distância de isolamento entre duas estruturas com potenciais elétricos diferentes. No caso das linhas de transmissão, o condutor que possui um determinado nível de potencial e a estrutura com outro nível de potencial de forma a impedir a circulação indesejável de corrente.

Ao se aplicar a uma linha aérea, um isolador eficiente deve ser capaz ainda de fazer o máximo uso do poder isolante do ar que envolve afim de assegurar o isolamento adequado. Falhas em isoladores podem ocorrer tanto no interior do material que o compõe ou pelo ar que o envolve. Seu desenho deve ser concebido de forma a assegurar uma distribuição balanceada de potenciais e, conseqüentemente, dos gradientes elétricos no ar, com objetivo de minimizar descargas elétricas superficiais. Devem ser duráveis quando em serviço, reduzindo a um mínimo o número de reposições no decorrer dos anos, e resistir bem aos choques térmicos a que estão submetidos pelas condições meteorológicas locais (FUCHS, 1977).

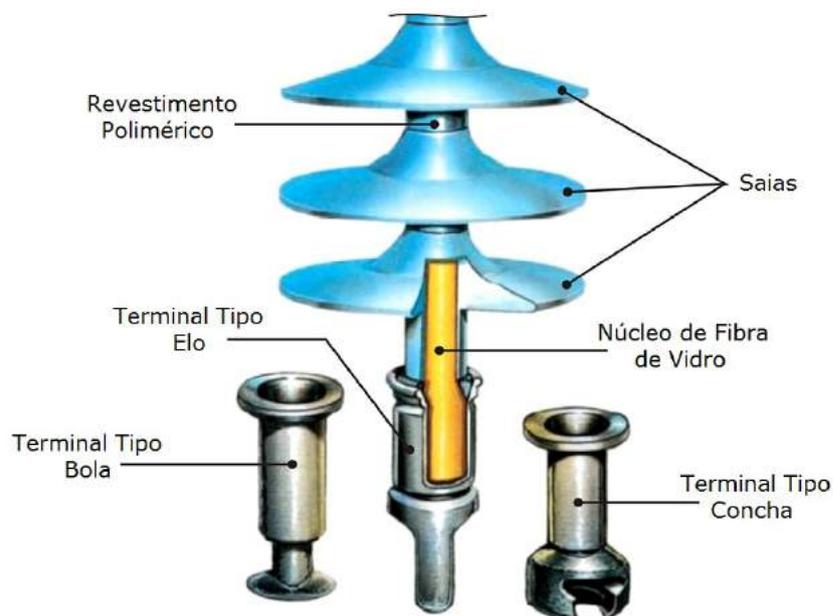
As superfícies dos isoladores devem ter acabamento capaz de resistir bem as exposições do tempo, mesmo em atmosfera de elevado grau de poluição em que haja presença de óxidos de enxofre e outros reagentes. Os materiais comumente empregados para a fabricação de isoladores são a porcelana vitrificada, o vidro temperado ou materiais orgânicos isolantes tais como os polímeros.

A utilização de materiais orgânicos como isolantes elétricos de alta tensão internos se iniciou na década de 1940. As primeiras gerações de isoladores poliméricos se depararam com problemas de trilhamento e erosão (GORUR; CHERNEY; BURNHAM., 1999), porém na década de 1950, com a aplicação da alumina trihidratada (ATH), estes problemas foram atenuados tornando o uso dos isoladores poliméricos externos viável, visto que o uso da ATH contribuiu

para o aumento da resistência ao trilhamento e a erosão no material polimérico. Já a utilização dos isoladores poliméricos em linhas aéreas de transmissão teve início, de fato, na década de 1980, quando surgiu sua primeira versão comercial (GUEDES, 2015).

Apesar de na época o custo do material polimérico ser mais elevado, as suas características mecânicas e elétricas propiciavam uma economia durante o período útil de vida, seja na instalação ou na manutenção do equipamento (GUEDES, 2015). A estrutura de um isolador polimérico é formada, basicamente, pelo núcleo, pelas saias, e pelas ferragens terminais, cada uma com suas respectivas funções, tal como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura de um isolador polimérico.



Fonte: adaptado de (RODURFLEX, 2006).

Além da classificação devido ao tipo de material que compõe o conjunto isolante, podemos classificar os isoladores com relação ao modo de instalação e funcionamento, como:

- isolador de pino;
- isolador tipo pilar;
- isolador suspensão.

Os isoladores tipo pino são fixados à estrutura através de um pino. Para tanto, em sua parte interna possuem um furo rosqueado para fixação às cruzetas através de um pino de aço cuja parte superior possui uma cabeça de chumbo filetada, sobre a qual se conecta o isolador. São normalmente solicitados à compressão e à flexão. São utilizados em linhas de até 69 kV, e

com condutores relativamente leves, em virtude da pequena resistência do chumbo na cabeça dos pinos ao esmagamento e também da pequena resistência dos próprios pinos a esforço de flexão (FUCHS, 1977). Alguns exemplos de isoladores do tipo pino são apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Exemplos de isoladores de pino



Fonte: (GERMER, 2014).

Os isoladores tipo pilar são menos utilizados em linhas de transmissão do que os isoladores de pino, podendo ser construídos de uma única peça no caso de operarem em tensões mais elevadas. Dado ao seu sistema de fixação, resistem a esforços mecânicos bem mais elevados tanto de compressão quanto de flexão (FUCHS, 1977). Alguns exemplos de isoladores do tipo pilar são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Exemplos de isoladores tipo pilar.



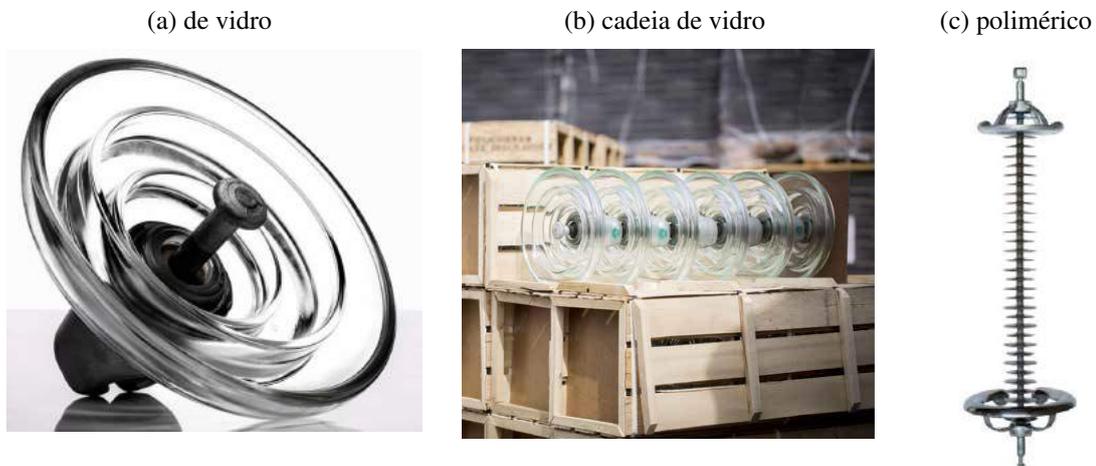
Fonte: (GERMER, 2014).

Os isoladores tipo suspensão representam o tipo de isolador com maior importância para as linhas de transmissão, alguns exemplos são exibidos na Figura 4. Empregam-se basicamente dois tipos desses dispositivos:

- isoladores monocorpo ou barra longa;

- isoladores de disco.

Figura 4 – Exemplos de isoladores de suspensão.



Fonte: (a) e (b) (GERMER, 2014), (c) (SGD, 2015).

Os isoladores monocorpo são constituídos de uma única peça de porcelana, cujo comprimento é de acordo com o nível de isolamento desejada. Para um mesmo nível de isolamento, é sempre inferior ao das cadeias de isoladores correspondentes, o que pode resultar em considerável redução nas dimensões das estruturas.

Os isoladores de disco são compostos de um corpo isolante e ferragens de suspensão, através dessas ferragens unidades de isoladores são conectadas entre si, formando longas cadeias e quanto maior o número de unidades isolantes maior o nível de tensão possível a ser isolada.

Os estudos aqui desenvolvidos, e que são apresentados nos Capítulos 3 e 4 dessa dissertação, foram realizados em isoladores de suspensão, porém é possível aplicar o método desenvolvido em outros tipos de isoladores sem maiores dificuldades.

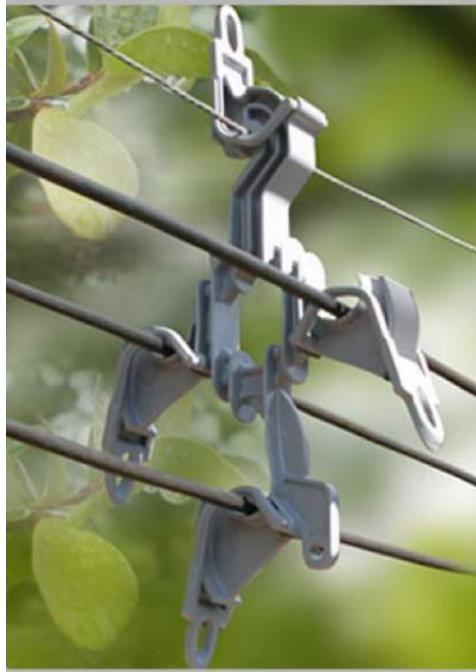
## 2.2 Espaçadores de Redes Compactas de Distribuição

Outro dispositivo isolante, que será estudado nas simulações realizadas, é o espaçador losangular de linhas de distribuição compactas, acessório polimérico cuja função é a de sustentação dos cabos semi isolados ao longo do vão, como exibido na Figura 5. Esses dispositivos mantêm a linha numa situação de compactação e separação elétrica dos cabos semi isolados, os quais ficam dispostos em formato losangular.

Esse tipo de linha tem tido uma aplicação bastante disseminada uma vez que incorpora características que permitem eventuais contatos com vegetações urbanas, possibilitando convívio

harmonioso com as mesmas e minimizando os distúrbios operacionais nas redes elétricas e reduzindo os custos com a manutenção.

Figura 5 – Exemplo de espaçador losangular instalado em rede.



Fonte: (PLP, 2014).

O espaçador é um acessório de fundamental importância para o funcionamento dessas 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 melhorando o grau de utilização de cada estrutura.

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.

## 2.3 Estudo da Distribuição de Potencial e Campo Elétrico em Isoladores

O cálculo da distribuição de potencial e do campo elétrico em estruturas isolantes é de extrema importância e extensivamente utilizado em algumas 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), dentre outros.

O problema de determinação da distribuição de potencial e campo eletrostático na superfície dos isoladores pertence à classe dos problemas de "valor de contorno", desde que sejam informados os valores de potencial sobre a fronteira de algumas regiões do objeto estudado. Uma vantagem adicional, e muito importante, é que essa técnica leva a determinação do potencial em pontos que não possuem condições de contorno estabelecidos.

Os problemas de eletrostática são modelados pelas equações de Laplace e Poisson, que são utilizadas para a determinação do potencial ao longo de todo o problema (superfície, interior e meio envolvente), para isso é especificado o potencial no pino e campânula do isolador. A equação de Poisson é dada por:

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (1)$$

Em que:

- $\rho_v$  -> densidade volumétrica de carga ( $C/m^3$ );
- $\epsilon$  -> 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:

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

Para a definição da intensidade campo elétrico resolve-se a seguinte equação:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (3)$$

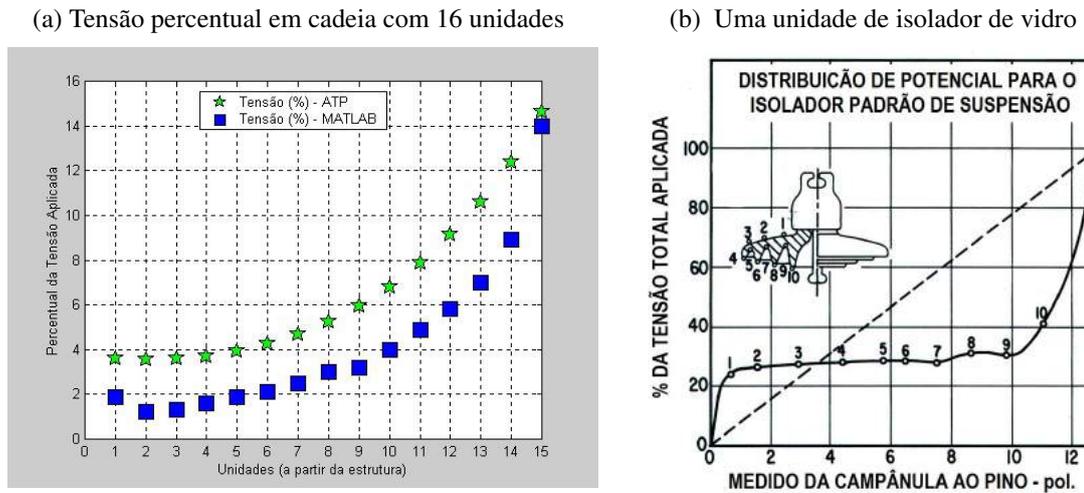
Em que:

- $E$  -> intensidade de campo elétrico em ( $V/m$ ).

Alguns exemplos de distribuições de potenciais em estruturas isolantes são exibidos nas Figuras 6 e 7.

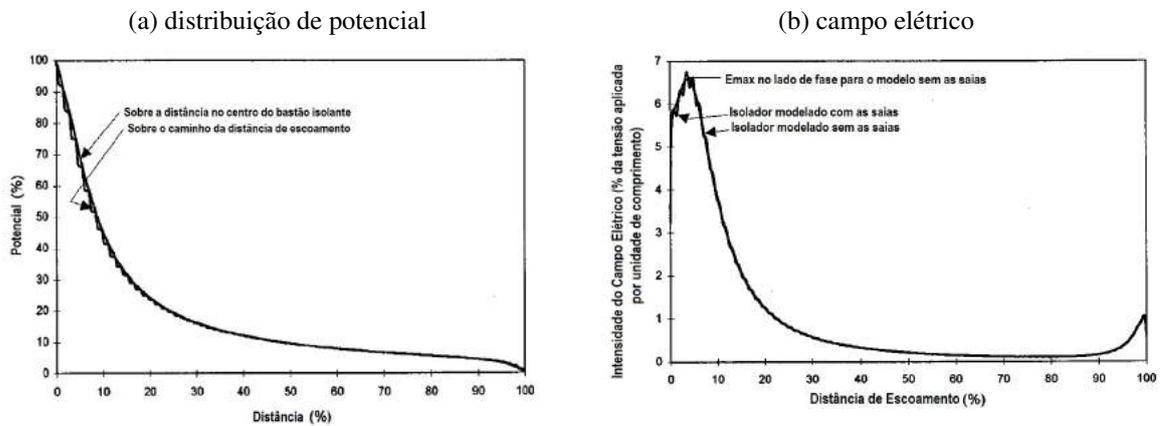
Para um dado problema específico pode ser muito mais simples calcular o potencial elétrico e depois extrair o campo elétrico através do gradiente do potencial, visto que essas grandezas estão diretamente relacionadas. O estudo do potencial se faz muito importante, pois o nível de tensão elétrica sofre variações dependendo dos materiais existentes num sistema, levando a variações no campo elétrico e a um maior estresse sobre o dielétrico.

Figura 6 – Exemplos de distribuição de potencial em isoladores de vidro.



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

Figura 7 – Exemplos de distribuição de potencial e campo elétrico ao longo da distância de escoamento em isoladores poliméricos.



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

## 2.4 Estudo do Fenômeno de Degradação em Materiais Isolantes

O estudo dos processos de condução e ruptura dielétrica tem imensa importância, visto que ao ser submetido a um campo elétrico, o dielétrico tende à polarizar-se e esta polarização é um rearranjo das cargas dentro de um meio neutro, juntamente com esta polarização teremos a corrente de condução, uma corrente de natureza capacitiva, que representa o movimento de deslocamento dos portadores de carga num meio neutro. Sendo retirada a tensão que age sobre o meio dielétrico, as cargas tendem a voltar à sua posição inicial, porém dentro de um sistema onde

temos um campo elétrico alternado, esta corrente capacitiva tende a durar um longo período de tempo (FAGUNDES, 2008).

### 2.4.1 Processo de Contaminação dos Isoladores

É comum que isolamentos aéreos de sistemas de potência fiquem expostos a intempéries características das regiões atravessadas por esses sistemas, em especial a poluição ambiental e industrial presentes. O processo se inicia a partir da precipitação de diversos agentes sobre a superfície dos isoladores dentre eles: umidade, neve, granizo, depósito de cimento, sal, carbono, terra, poeira, entre outros (PROJECT-EHV, 1968). Esses depósitos combinados com a chuva ou neblina reduzem a suportabilidade do isolamento de tal forma que descargas superficiais venham a ocorrer na superfície dos isoladores.

Muitos dos tipos de precipitação seca que existe na forma de sujeira ou pó possuem uma resistividade bastante elevada, porém em tempo úmido as precipitações secas absorvem umidade do ar e a resistividade decresce formando um filme muito mais condutivo que a porcelana. A condutividade deste filme depende da quantidade de umidade e da composição química do contaminante. Esta camada condutiva é responsável pela perda do comportamento capacitivo, naturalmente encontrado em isoladores, e pelo surgimento de um regime resistivo.

### 2.4.2 Possíveis Problemas Causados pelo Fenômeno

A ação do campo elétrico no meio isolante, associado com fatores de natureza mecânica ou química, tende a inserir estresses nos materiais onde alguns problemas associados a este fenômeno podem ocorrer, tais como: descargas parciais internas; descargas parciais superficiais; arborescência (*treeing*) e trilhamento elétrico (*tracking*).

#### 2.4.2.1 Descargas Parciais Internas

Essas descargas ocorrem devido a existências de regiões ocas ou heterogeneidade dentro do material isolante sólido. Esses defeitos levam a uma alta concentração de campo elétrico, onde se dá início ao processo de descargas parciais que erodem a cavidade no interior do dielétrico (FAGUNDES, 2008). Sejam as permissividades elétricas da cavidade  $\epsilon_2$  e do material isolante  $\epsilon_1$ , a relação entre os campos elétricos encontrados dentro da cavidade e fora da mesma é dada pela Equação 4 da Seção 2.4.2.1.

$$E_2 = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} E_1 \quad (4)$$

Em que:

- $E_1$  -> campo elétrico no dielétrico 1 (V/m);
- $E_2$  -> campo elétrico no dielétrico 2 (V/m);

- $\epsilon_1$  -> permissividade do dielétrico 1 ( $F/m$ );
- $\epsilon_2$  -> permissividade do dielétrico 2 ( $F/m$ ).

Quanto maior a razão  $\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}$ , maior o valor do campo dentro da cavidade, podendo levar a ocorrência de descargas parciais, caso o valor do campo ultrapasse a rigidez dielétrica do meio.

#### 2.4.2.2 Descargas Parciais Superficiais

São descargas que ocorrem na superfície do material, são provenientes do campo elétrico paralelo à superfície, quando este excede um valor crítico. Da mesma forma como as descargas internas, as superficiais também erodem o material, podendo levar a uma ruptura total do material isolante (FAGUNDES, 2008).

#### 2.4.2.3 Arborescência

A arborescência elétrica ocorre devido a presença de pontos de concentração de estresses, cavidades e impurezas, juntamente com a ocorrência de descargas parciais. A ocorrência de descargas parciais leva a decomposição e carbonização do material, formando canais permanentes a partir do ponto de origem com encaminhamento paralelo ao campo aplicado e que apresenta a forma de um arbusto de estrutura ramificada e tonalidade escura. Podendo ter também arborescência em água, esta que ocorre devida uma ação combinada entre campo elétrico e umidade, este tipo possui estruturas difusas e temporárias, desaparecem na secagem da isolação, mas reaparecem quando umedecido novamente. Ambos os tipos são prejudiciais a isolação elétrica, causando cisão das cadeias isolantes levando a uma diminuição da rigidez dielétrica (SILVA, 2000).

#### 2.4.2.4 Trilhamento

Trata-se de um fenômeno que ocorre na superfície do dielétrico, resulta da ação de cargas próximas ou na superfície do material isolante, gera trilhas elétricas, que causam uma perda localizada e gradual de massa no decorrer do tempo. Como espaçadores, bem como outros acessórios da linha compacta, são feitos de polietileno, possuem uma grande resistência superficial, isso limita as correntes as correntes superficiais, sendo que poluentes juntamente com a presença de umidade podem reduzir muito a resistência superficial, dando brechas para possíveis descargas entre pontos de diferentes potenciais (SILVA, 2000).

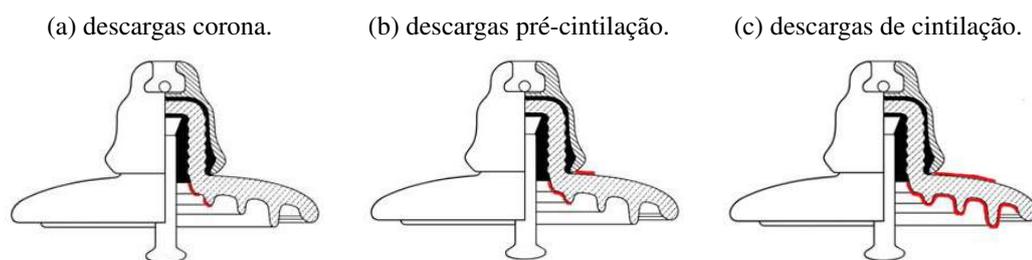
### 2.4.3 Desenvolvimento do Processo de Ruptura Superficial em Isoladores

Em experimentos realizados (PROJECT-EHV, 1968), ficou evidenciado que, quando uma cadeia contaminada com sal é energizada em estado seco não existe evidência de cintilação. A corrente de fuga é tão pequena que praticamente toda corrente do isolador permanece capacitiva.

Nesta ocasião o isolador possui a maior parte de sua suportabilidade como se estivesse limpo e seco. Com o surgimento da neblina, se forma um filme de umidade na superfície contaminada, ocorrendo, por conseguinte, um aumento gradual na amplitude da corrente de fuga. A fase da corrente de fuga muda para um tipo mais resistivo. Como o contaminante começa a conduzir levemente, centelhas de corona aparecem nas superfícies isolantes, como mostra a Figura 8-(a). Essas centelhas se formam no contorno da porcelana e do cimento do pino. Alguma vez essas centelhas também se formam na saia interna do isolador e na cavidade entre a campânula e a porcelana. Essas centelhas formam uma faixa azul circular, pouco intensa, com algumas faixas mais brilhantes interpassadas. Possuem um pequeno comprimento (0,64 a 1,27 cm), ocorrem próximo ao dielétrico e persistem continuamente. Uma corrente em torno de 1mA flui neste estágio.

Com a neblina contínua, dentro de um minuto ou mais, um tipo de descarga um pouco mais intensa aparece por debaixo da unidade de isolador como mostrado na Figura 8-(b). Essas descargas têm uma característica mais amarelada, a partir da parte central do cimento próxima a porcelana e sobre a menor saia. Ambos terminais do arco têm forma de escova, o que indica que eles absorvem as cargas superficiais das áreas próximas aos terminais. Desde que se trata de uma descarga capacitiva, o pulso máximo de corrente é limitado a 1-10nA e o tempo de fiação é em microssegundos. Essas descargas podem disparar descargas similares no topo um pouco mais fortes que se iniciam sempre na campânula.

Figura 8 – Desenvolvimento das descargas em uma unidade de isolador contaminado durante o ciclo de umedecimento.



Fonte:(BEZERRA, 2004).

Posteriormente, a primeira descarga de cintilação real começa quando o depósito de umidade se intensifica, Figura 8-(c). Ela deixa o pino e, no começo, termina na parte de dentro da saia interna. Essas descargas, usualmente, se mantêm por muitos ciclos. Se a contaminação e a tensão forem bastante adversas, as descargas se estenderão posteriormente sobre a saia interna e algumas vezes atingirão a saia central e externa. Essas descargas também disparam descargas solidárias da campânula. As amplitudes das correntes são da ordem de 10-1.000 mA. Quando os picos das amplitudes alcançam mais de 300 mA, o isolador será provavelmente submetido

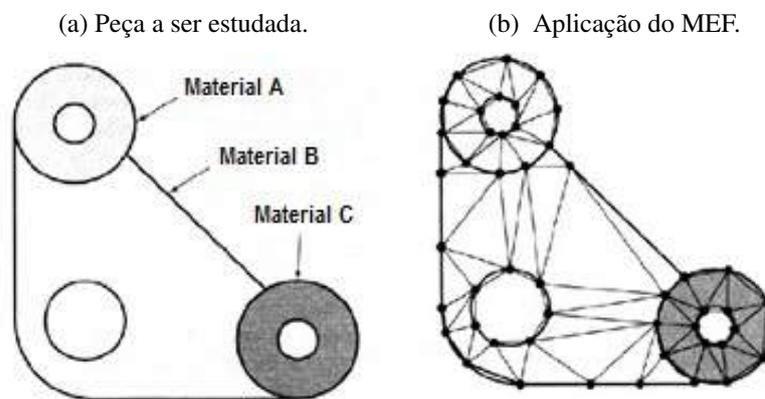
ao *flashover*. Todas essas constatações apesar de antigas (PROJECT-EHV, 1968), retratam com fidelidade as manifestações elétricas do isolamento submetido a poluição e umidade.

A distribuição de campo elétrico tem grande importância no caso de isolações, como visto, se o campo for muito intenso a rigidez dielétrica do material pode ser quebrada e este passa de isolante para condutor. As imperfeições na distribuição não homogênea de campo elétrico podem provocar sobretensões em alguns pontos e assim causar danos à rede elétrica (FAGUNDES, 2008).

## 2.5 Método dos Elementos Finitos (MEF)

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é um método amplamente utilizado para resolução de problemas com Equações Diferenciais Parciais (EDP) em geometrias complexas e heterogêneas. Neste método o domínio é dividido em nós, ou pontos discretos, onde as EDP são aplicadas a cada elemento, o método possui uma boa aproximação até mesmo diante de geometrias irregulares, condições de contorno não usuais ou composição heterogênea (RIBEIRO, 2004) (AVILA, 2010) (PUC-MINAS, 20- -), como mostrado na Figura 9.

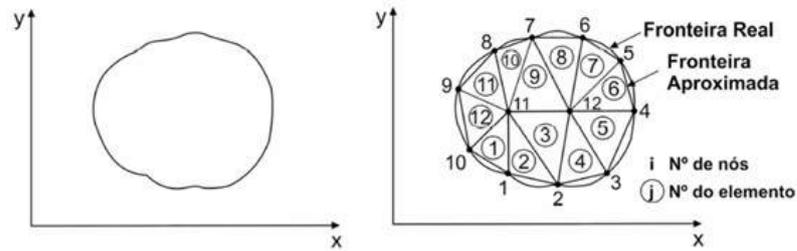
Figura 9 – Aplicação do Método dos Elementos Finitos em peça industrial com geometria irregular e composição não homogênea.



Fonte: (PUC-MINAS, 20- -).

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. Na discretização se procura a divisão do objeto em sub-regiões de geometria mais simples denominadas elementos finitos, exibidos na Figura 10. Na Figura 11 são apresentados exemplos de elementos utilizados na resolução de problemas (SILVA, 2013) (PUC-MINAS, 20- -).

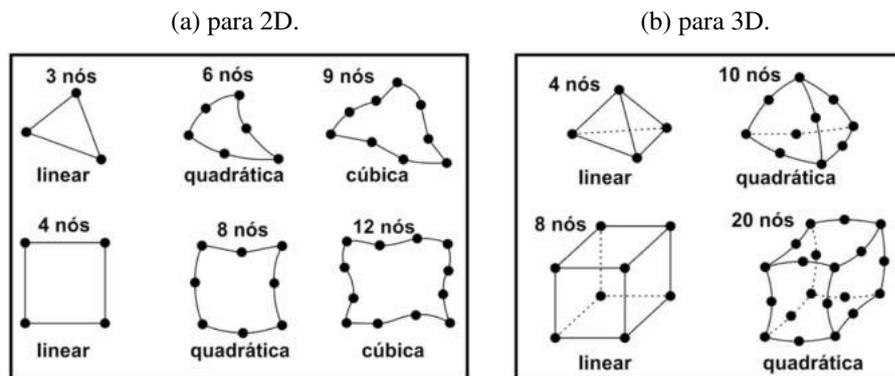
Figura 10 – Discretização de um domínio em sub-regiões.



Fonte: (SILVA, 2013).

Os elementos finitos são interligados por nós e este conjunto de nós interligados é denominado de malha (mesh). 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 numero de elementos e o tipo mais adequado para cada caso de maneira que possa encontrar resultados mais próximos dos reais (SILVA, 2013).

Figura 11 – Elementos finitos mais usuais.



Fonte: (BASTOS; SADOWSKI, 2003).

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, 20- -);
- 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, 20- -);
- 3) pós- processamento: Obtida solução do sistema, que será exibida na forma de tabelas ou gráficos (PUC-MINAS, 20- -).

Neste capítulo foi apresentado a fundamentação teórica sobre os objetos estudados tais como isoladores e espaçadores de redes de transmissão e distribuição. O estudo da degradação desses dispositivos isolantes e como eles ocorrem. E uma breve apresentação sobre o método dos elementos finitos que será utilizado nas simulações apresentadas nesta dissertação.

O próximo capítulo especifica exatamente os objetos estudados e os *softwares* utilizados nas simulações, bem como a maneira com a simulação foi desenvolvida. São apresentados os resultados para cada um dos casos com o isolante limpo, sem a presença da poluição. Também é apresentada a teoria relacionada a como inserir uma camada condutiva na simulação.

## 3 Modelagem do Problema sem Poluição

Neste capítulo são apresentados os *softwares* utilizados no desenvolvimento de modelos para obtenção da distribuição de potencial e campo elétrico na presença de uma fina camada condutiva, os dispositivos dielétricos utilizados nas simulações e a maneira os modelos de diversos isoladores foram implementados.

### 3.1 Dispositivos Utilizados

#### 3.1.1 Isolador de Vidro

Para o desenvolvimento das simulações utilizou-se o isolador padrão IEEE por se tratar de um dispositivo conhecido e estudado por outros autores (BEZERRA, 2004), sendo possível assim a comparação dos resultados obtidos com os apresentados em estudos anteriores.

Figura 12 – Fotos do isolador de vidro.



Fonte: próprio Autor.

O isolador citado é do tipo disco de suspensão, composto de vidro como principal material dielétrico, pino e campânula de aço galvanizado, possui uma distância de escoamento de  $30,5\text{cm}$ , aproximadamente  $13,7\text{cm}$  de altura e diâmetro de  $27,2\text{cm}$ ; sua tensão nominal suportável à seco é de  $15\text{kV}$ , porém podem ser acoplados em outras unidades formando assim uma cadeia de isoladores e aumentando a tensão suportável. Além da aplicação para uma única

unidade, utilizou-se duas cadeias formadas pelo isolador ST-254 VB CB: uma de três unidades, por ser uma quantidade possível de se realizar experimentos laboratoriais, e uma de dezesseis unidades, por se tratar do padrão utilizado nas linhas de  $230kV$ , valor de tensão eficaz entre fases, da CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco).

### 3.1.2 Isolador Polimérico de Alta Tensão

Utilizou-se nas simulações realizadas o isolador, constituído de material polimérico, projetado para funcionar em sistemas com linhas de  $500kV$ , valor de tensão eficaz entre fases, com núcleo de fibra de vidro impregnado com resina, revestimento de silicone e os terminais metálicos de aço forjado ou ferro fundido galvanizados a quente apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Foto do isolador polimérico.



Fonte: próprio Autor.

O isolador possui uma distância de escoamento de aproximadamente  $1532,4cm$ , ou seja,  $15,3$  metros;  $129$  aletas onde a maior possui um diâmetro de  $13,7cm$  e a menor de  $11,9cm$  e o comprimento de  $382,3cm$ , ou seja, como apresentado na Figura 13,  $3,82m$  aproximadamente  $4m$ .

### 3.1.3 Espaçador de Linhas Compactas Aéreas

O espaçador utilizado neste estudo foi o mesmo encontrado em (XAVIER, 2015), trata-se de um espaçador de polietileno de alta densidade empregado em sistemas de distribuição de redes aéreas compactas, possui uma tensão nominal de  $15kV$ .

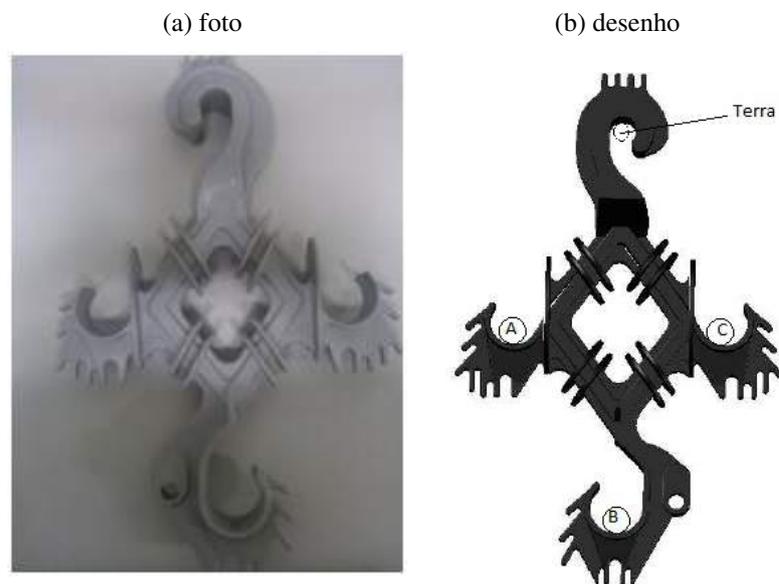
Por apresentar quatro condutores, ou seja, quatro possíveis níveis de potenciais diferentes ao qual a peça estará submetida, consideramos quatro setores: da fase A ao cabo mensageiro, que está aterrado, da fase C ao cabo mensageiro, entre as fases A e B e entre as fases B e C, em que suas distâncias de escoamento estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Distância de escoamento para cada setor do espaçador.

Setor	Distância de Escoamento
Fase A - Terra	55,3cm
Fase C - Terra	28,7cm
Fase A - Fase B	57,5cm
Fase C - Fase B	100,1cm

Fonte: próprio autor.

Figura 14 – Espaçador utilizado.



Fonte: (XAVIER, 2015).

## 3.2 Softwares Utilizados

Os *softwares* AutoCAD e COMSOL Multiphysics que foram utilizados para o desenvolvimento do modelo de elementos finitos para avaliação de isolantes em ambientes contaminados são apresentados nesta seção.

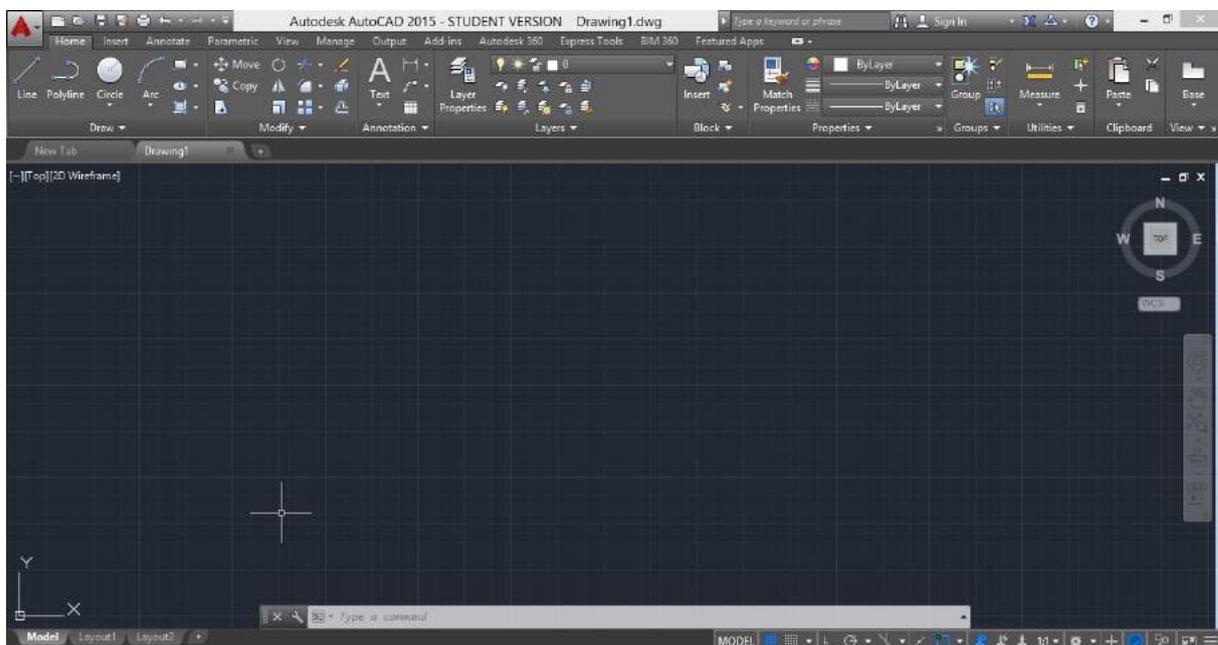
### 3.2.1 AutoCAD

AutoCAD é um software do tipo CAD, *Computer Aided Design* ou desenho auxiliado por computador, criado e comercializado pela Autodesk, Inc. desde 1982. É utilizado principalmente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões (2D) e para criação de modelos tridimensionais (3D). Além dos desenhos técnicos, o *software* vem disponibilizando, em suas versões mais recentes, vários recursos para visualização em diversos formatos. É amplamente

utilizado em arquitetura, design de interiores e nas engenharias civil, mecânica, geográfica, elétrica e em vários outros ramos da indústria (ROJAS, 2014).

Outra característica do AutoCAD é o uso de uma programação consolidada em linguagem interpretada, conhecida como AutoLISP, derivado da linguagem LISP, ou uma variação do Visual Basic, que permitem personalizações de rotinas e comandos. Interpreta também sequências de comandos comuns gravados em arquivos de texto geralmente com a extensão .scr carregados através do comando *script*, estes sem relação com a linguagem LISP, embora possam também conter códigos desta linguagem (ROJAS, 2014).

Figura 15 – Interface do AutoCAD.



Fonte: próprio Autor.

Na elaboração desta pesquisa utilizou-se o AutoCAD 2015, por se tratar de um programa de fácil utilização e compatível com os outros *softwares* utilizados.

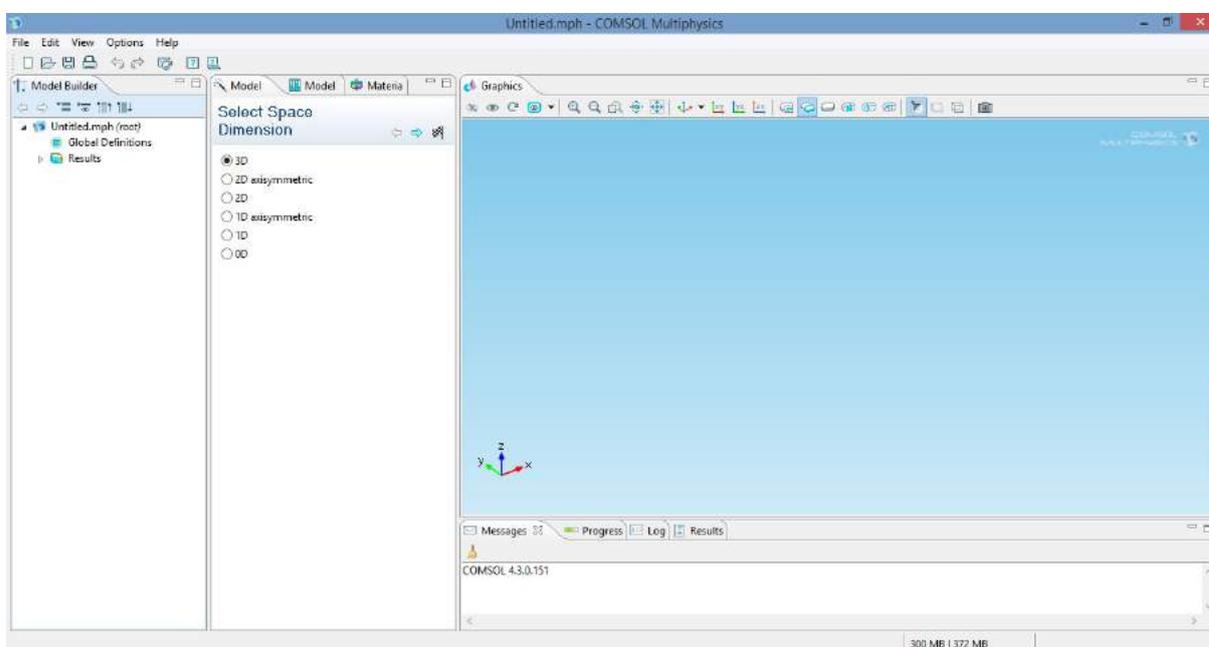
### 3.2.2 COMSOL Multiphysics

O COMSOL Multiphysics é uma poderosa ferramenta para modelagem e resolução de um grande número de problemas de ciência e engenharia. Recebeu este nome em 2006, anteriormente era conhecido como FEMLAB (*Finite Element Method Laboratory*). O *software* provê um ambiente poderoso e integrado com um construtor de modelos onde pode-se ter uma visão geral do problema a ser solucionado e acesso a todas as funcionalidades. Com o COMSOL Multiphysics pode-se facilmente estender modelos convencionais para um tipo de física em modelos multi-físicos que solucionam problemas com físicas acopladas de maneira

simultânea. Para desenvolver esse tipo de aplicação não é necessário um conhecimento profundo em matemática ou análise numérica (COMSOL, 2012).

O COMSOL Multiphysics utiliza a consagrada técnica de elementos finitos, para resolver os modelos citada na Seção 2.5. O *software* executa a análise em elementos finitos juntamente com a geração adaptativa de malha e controle de erro usando uma variedade considerável de solucionadores numéricos. Os estudos podem ser realizados com sistemas de multiprocessadores e computação via *cluster*. O COMSOL Multiphysics tem como base a resolução de EDP que forma a base para as leis das ciências naturais e a fundação para modelagem de uma ampla faixa de fenômenos da ciência e engenharia (COMSOL, 2012).

Figura 16 – Interface do COMSOL.



Fonte: próprio Autor.

Na elaboração desta pesquisa utilizou-se a versão 4.3 do COMSOL, por se tratar de uma versão já adquirida pelo grupo de pesquisa e compatível com os outros *softwares* utilizados.

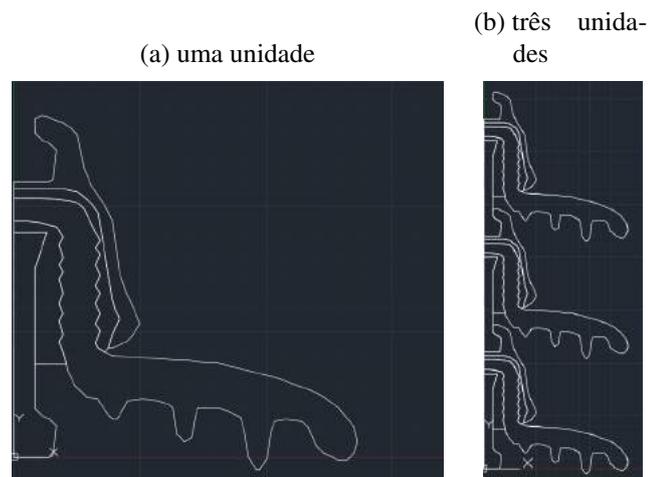
### 3.3 Desenhos no AutoCAD

Primeiramente é necessário criar uma representação gráfica do acessório isolante no ambiente computacional, devido a complexidade da geometria dos objetos estudados optou-se por desenhá-lo no AutoCAD, que é uma ferramenta adequada para esta atividade.

### 3.3.1 Desenho do Isolador de Vidro e das Cadeias dos Isoladores de Vidro

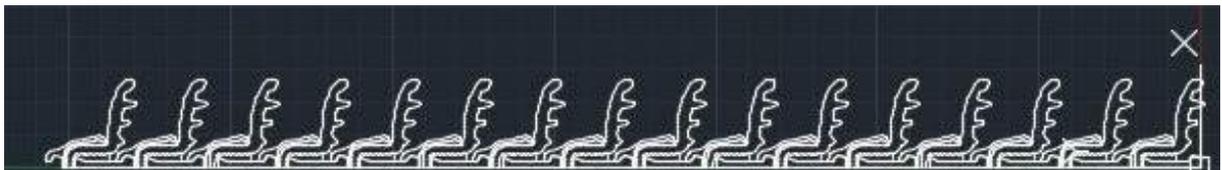
O desenho utilizado foi o mesmo confeccionado no trabalho de outro autor (BEZERRA, 2004), o qual representava o desenho da superfície de vidro através de pontos para uso em um *script*, estes pontos foram plotados no AutoCAD e conectados formando assim, a superfície que representa o perfil do isolador como mostrado na Figura 17. Para criação das cadeias de isoladores, com três e com dezesseis unidades, bastou-se a realização da conexão dos mesmos através do pino e da campânula como observado nas Figuras 17 e 18.

Figura 17 – Representação gráfica do isolador de vidro utilizado.



Fonte: Próprio autor.

Figura 18 – Representação gráfica da cadeia de isoladores de vidro com 16 unidades.

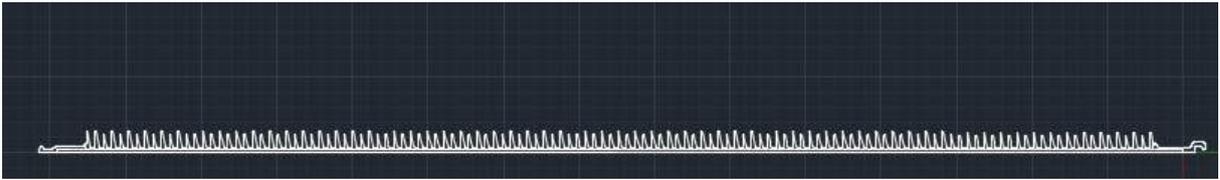


Fonte: Próprio autor.

### 3.3.2 Desenho do Isolador Polimérico

Realizou-se o desenho do isolador polimérico através de alteração em um arquivo do próprio fabricante, para que fosse possível a realização de simulações tais como: a aparição de pontas, a verificação de ligação entre todos os pontos do desenho e a inserção de aletas. Visto que, o desenho do fabricante é simplificado com apenas vinte e cinco aletas o resultado é exibido na Figura 19.

Figura 19 – Representação gráfica do isolador polimérico.

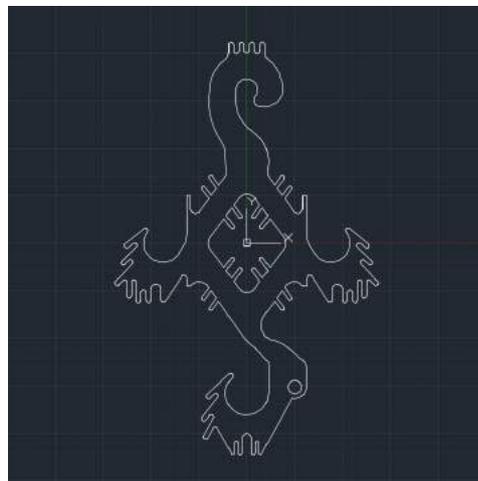


Fonte: Próprio autor.

### 3.3.3 Desenho do Espaçador

A representação do espaçador utilizado foi a mesma de outro autor (XAVIER, 2015), com fins de comparação e validação dos resultados referentes a distribuição de potencial e campo elétrico para o espaçador sem a presença da camada condutiva que modela a poluição. Na Figura 20 nota-se a ausência dos condutores mensageiro, e das fases, no espaçador. Isto ocorre pois eles foram inseridos posteriormente no próprio modelo do COMSOL. No caso dos isoladores, o potencial é aplicado diretamente ao pino, não sendo necessária a representação das ferragens de conexão e dos condutores.

Figura 20 – Representação gráfica do espaçador.



Fonte: próprio Autor.

Os desenhos elaborados no AutoCAD possuem, por definição, a extensão .dwg, que não é reconhecida pelo COMSOL Multiphysics. Para possibilitar a importação do desenho criado é utilizado o recurso de exportação do AutoCAD que converte o arquivo .dwg em um arquivo .dxf, extensão reconhecida por projetos no COMSOL Multiphysics.

## 3.4 Modelagem do Fenômeno no COMSOL

Esta seção é voltada para o detalhamento da modelagem do fenômeno utilizando o *software* COMSOL Multiphysics para cada um dos dispositivos, onde questões como: Condições de contorno consideradas, espaço de simulação, quantidade de elementos na malha, permissividade dos materiais utilizados e maneira de modelagem da poluição são abordadas.

### 3.4.1 Características Gerais dos Modelos

Escolheu-se ambiente de duas dimensões (2D) para elaboração do modelo, visto que, com exceção do caso do espaçador, se tratam de problemas onde pode se aproveitar a simetria do objeto estudado, reduzindo o custo computacional e gerando visualizações de resultados através de revolução para obter-se uma visualização em três dimensões (3D).

No caso do espaçador também utilizou-se o ambiente em duas dimensões neste caso por motivos de facilidade na implementação. A geometria em três dimensões do espaçador é bastante complexa e de uso problemático no que tange a utilização pelo COMSOL, tentou-se a importação de geometria em três dimensões do espaçador porém devido a algumas regiões muito finas e com vários detalhes erros ocorriam durante a importação da geometria impossibilitando assim sua utilização.

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. O módulo de Eletrostática assume que todos os materiais presentes, incluindo-se os metálicos, são isolantes. Devido a esta limitação alguns atributos, como uma possível corrente que flui no dielétrico, não são possíveis de serem computadas. Porém para determinação da distribuição de potencial e campo elétrico é o módulo ideal.

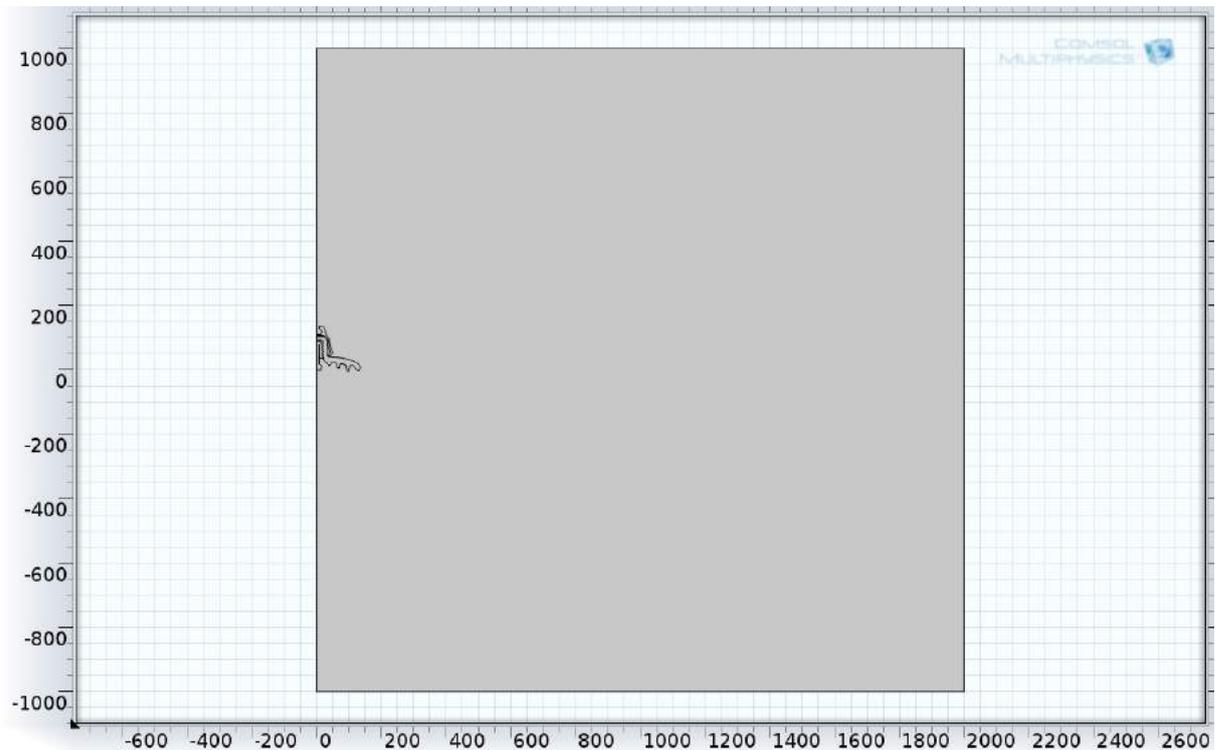
Para definição do espaço de simulação várias tentativas foram realizadas variando-se o tamanho do espaço até o momento em que os resultados da distribuição de potencial e campo elétrico pouco variassem para cada caso, com exceção dos casos do isolador padrão IEEE e do espaçador que foram baseados nas pesquisas de outros autores (BEZERRA, 2004) e (XAVIER, 2015). As condições de contorno nos limites do entorno adotadas foram uma condição de Dirichlet com valor de zero volt.

### 3.4.2 Isolador de Vidro - Uma Unidade

#### 3.4.2.1 Geometria Utilizada

A geometria do isolador associado ao ambiente modelado é bem simples e basicamente consiste no desenho do isolador a ser estudado juntamente com um espaço de simulação, no formato de um retângulo, que faz o papel do ar que cerca o isolador, como exibido na Figura 21.

Figura 21 – Geometria desenvolvida para a simulação.



Fonte: próprio Autor.

O retângulo possui lados iguais, sendo portanto um quadrado, apresentando uma face de  $2000\text{mm}$ . Encontrou-se este valor após algumas simulações de sintonia, onde os resultados de distribuição de potencial eram comparados com valores encontrados na literatura até que os mesmos fossem compatíveis.

#### 3.4.2.2 Definição dos Materiais

A definição dos materiais, quando utiliza-se o módulo físico de eletrostática, consiste apenas na definição dos valores de permissividade relativa para cada material. As informações utilizadas estão apresentadas na tabela 2, e estão de acordo com valores utilizados por outros autores (BEZERRA, 2007).

#### 3.4.2.3 Definição das Condições de Contorno

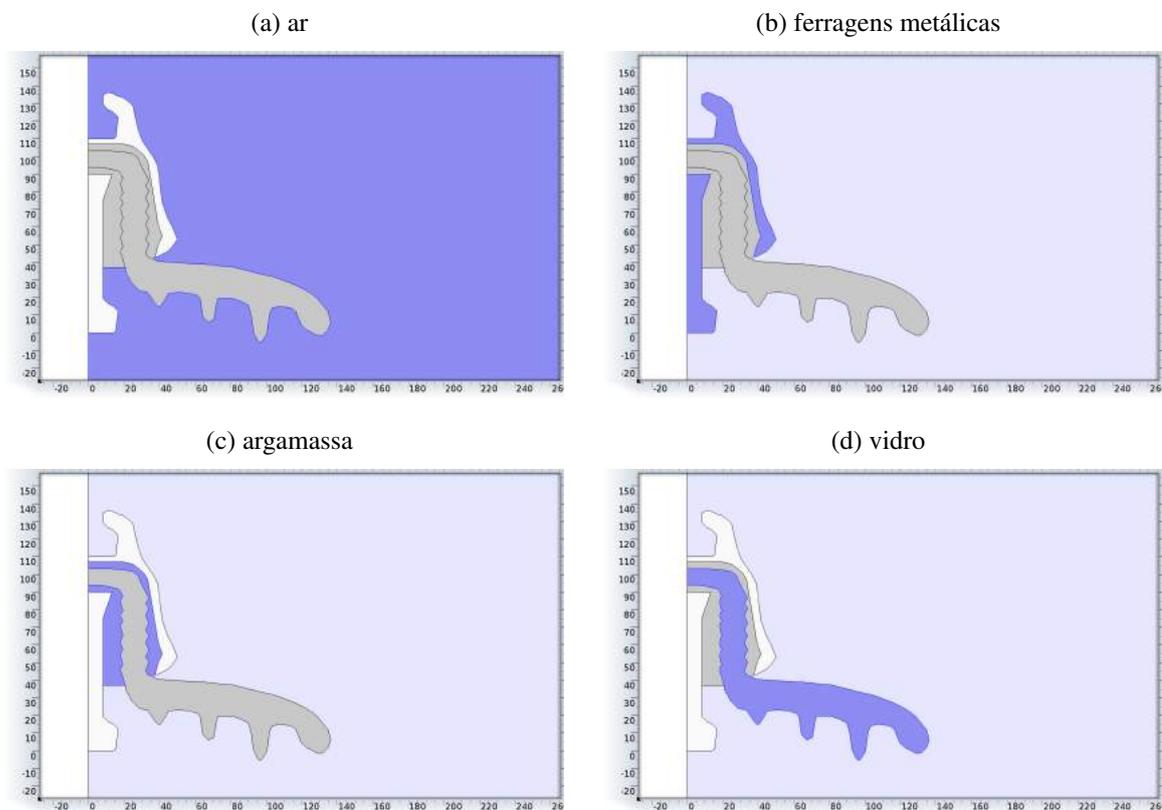
As condições de contorno são fundamentais para a resolução do problema pelo MEF. De maneira simplificada, podemos dizer que consistem em estabelecer contornos que possuem o valor de uma determinada grandeza, ou de sua derivada, conhecidos. Caso seja o valor da grandeza, tem-se uma condição de contorno de Dirichlet, caso seja estabelecida o valor da derivada da grandeza de interesse, tem-se uma condição de contorno de Neumann; através da

Tabela 2 – Permissividades elétricas relativas de cada material que compõe o modelo.

Material	Permissividade Relativa
Ar	1
Argamassa	$10^{-6}$
Ferragens metálicas	$10^{-6}$
Vidro	4,2

Fonte: próprio autor.

Figura 22 – Regiões de cada material (em azul mais escuro).



Fonte: próprio autor.

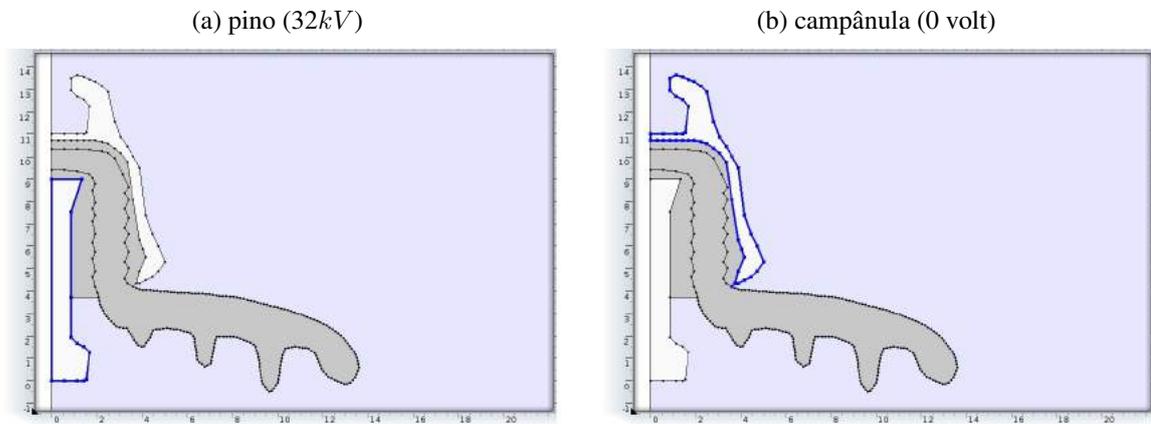
determinação dessas condições é que o problema pode ser solucionado.

Para todos os casos simulados neste estudo aplicaram-se duas condições de Dirichlet onde definiu-se contornos com determinados níveis de potencial conhecidos. Uma delas é o pino, no qual está presente um contorno com o valor do potencial ao qual o isolador está submetido. A outra é a campânula que está no potencial de terra zero volt.

Para o nível de tensão ao qual o isolador está submetido foi adotado, para validação da distribuição de potencial encontrada, o valor de  $32kV$ . Tratando-se de um modelo variante

no tempo, tem-se que a tensão aplicada é uma senoide, porém para exibição dos resultados considerou-se o valor em que o isolador encontrasse em maior estresse elétrico, neste caso, para validação dos resultados encontrados, o valor de  $32kV$

Figura 23 – Condições de contorno.

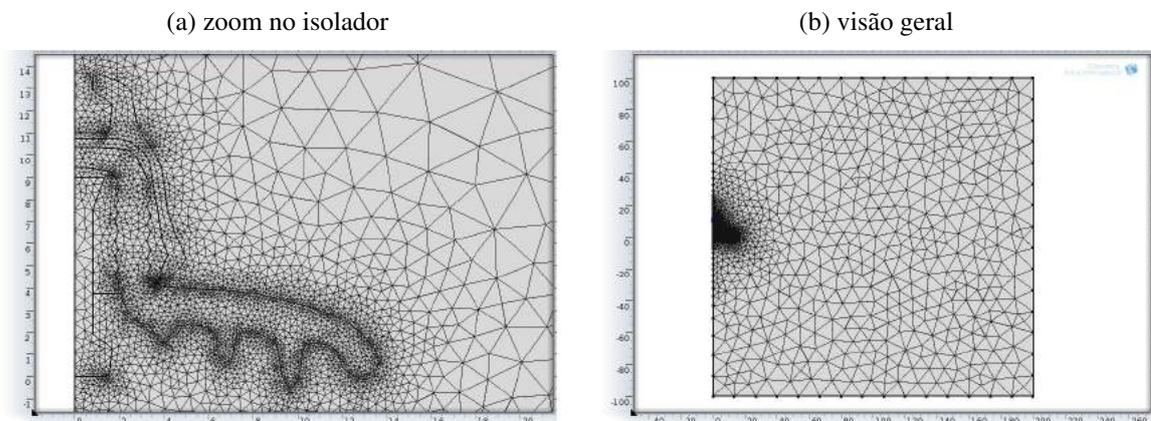


Fonte: próprio autor.

#### 3.4.2.4 Definição da Malha

Construiu-se a malha de elementos finitos utilizando as ferramentas padrões disponíveis no COMSOL. Testou-se diversos níveis de refinamento de malha, onde percebeu-se que com um nível denominado de "normal" pelo COMSOL os resultados apresentados estão de acordo com o esperado e sem possuir um custo computacional elevado.

Figura 24 – Malhas geradas no COMSOL.



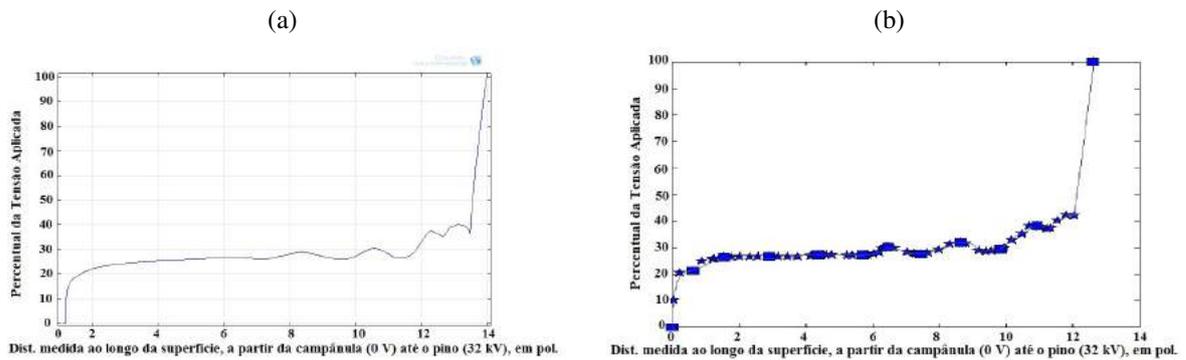
Fonte: próprio autor.

Para este caso a malha gerada possui um total de 7973 elementos quantidade esta suficiente para uma boa representação da geometria do isolador estudado.

### 3.4.2.5 Resultados Obtidos para o Isolador sem Poluição

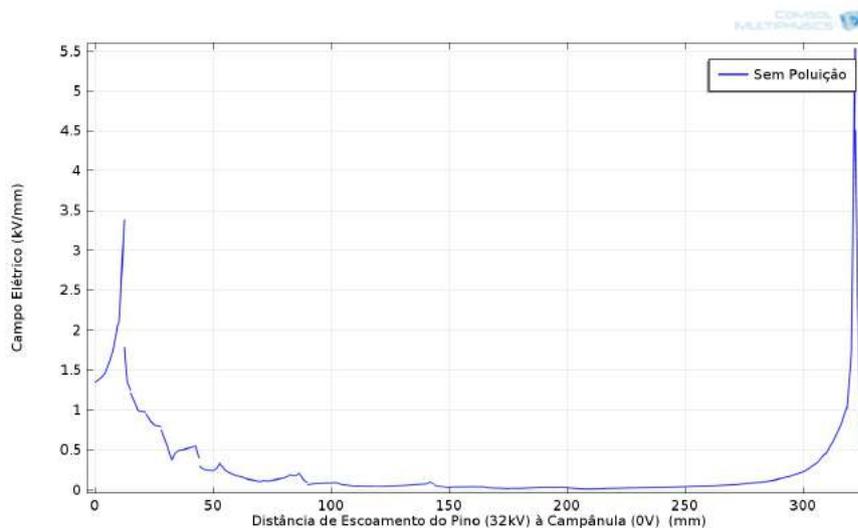
Para validação dos resultados apresentados, referentes a distribuição de potencial no isolador estudado, utilizou-se informações obtidas por outros autores (BEZERRA, 2004) e (PROJECT-EHV, 1968) para o mesmo isolador:

Figura 25 – Comparação de resultados.



Fonte: (a) próprio autor (b) (BEZERRA, 2007) .

Figura 26 – Distribuição de campo elétrico.



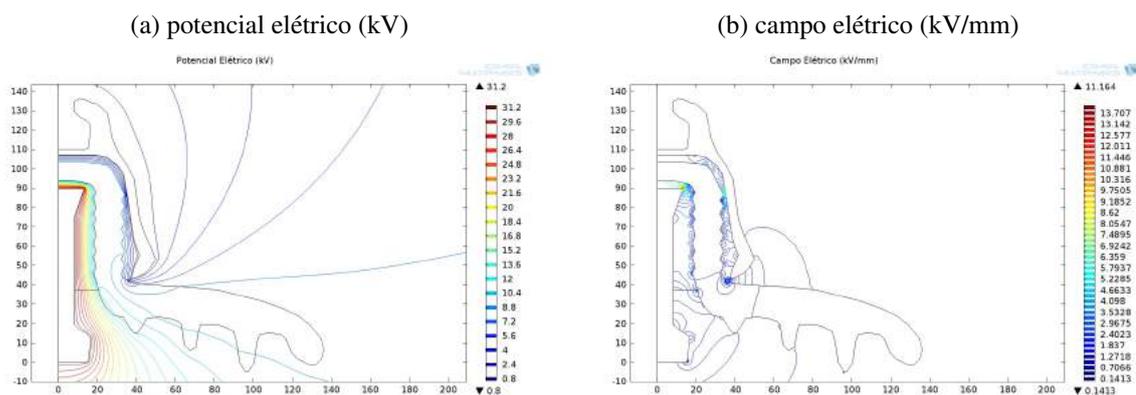
Fonte: próprio Autor.

Percebe-se que os resultados obtidos para distribuição de potencial estão de acordo com valores encontrados por outros autores na literatura (BEZERRA, 2004) (PROJECT-EHV, 1968).

Como consequência tem-se que os resultados adquiridos para campo elétrico estão coerentes, devido a relação direta entre as duas grandezas.

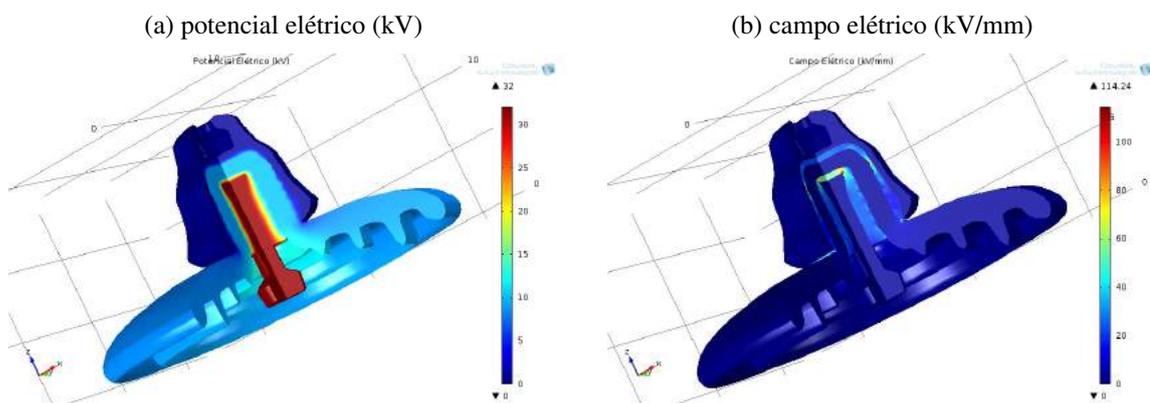
O COMSOL é uma ferramenta que possibilita a visualização das grandezas de interesse de diferentes formas, além dos gráficos em "uma dimensão" gerados pelas Figuras 25 e 26, pode se gerar gráficos com linhas equipotenciais e em três dimensões, aproveitando a simetria do objeto em estudo, como exibido na Figura 27 e 28.

Figura 27 – Resultados em curvas de nível.



Fonte: próprio autor .

Figura 28 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus.



Fonte: próprio autor.

Podem ser exibidos os valores das grandezas no envolto de ar, no caso 3D, porém o interesse é o comportamento dessas grandezas no acessório isolante. Percebe-se, na Figura 26, que junto a campânula existe um crescimento considerável. Isto ocorre por dois motivos: o primeiro é a presença da fronteira entre três materiais, o ar, o vidro e a argamassa e o segundo motivo é a grande variação de tensão em um pequeno trecho da distância de escoamento.

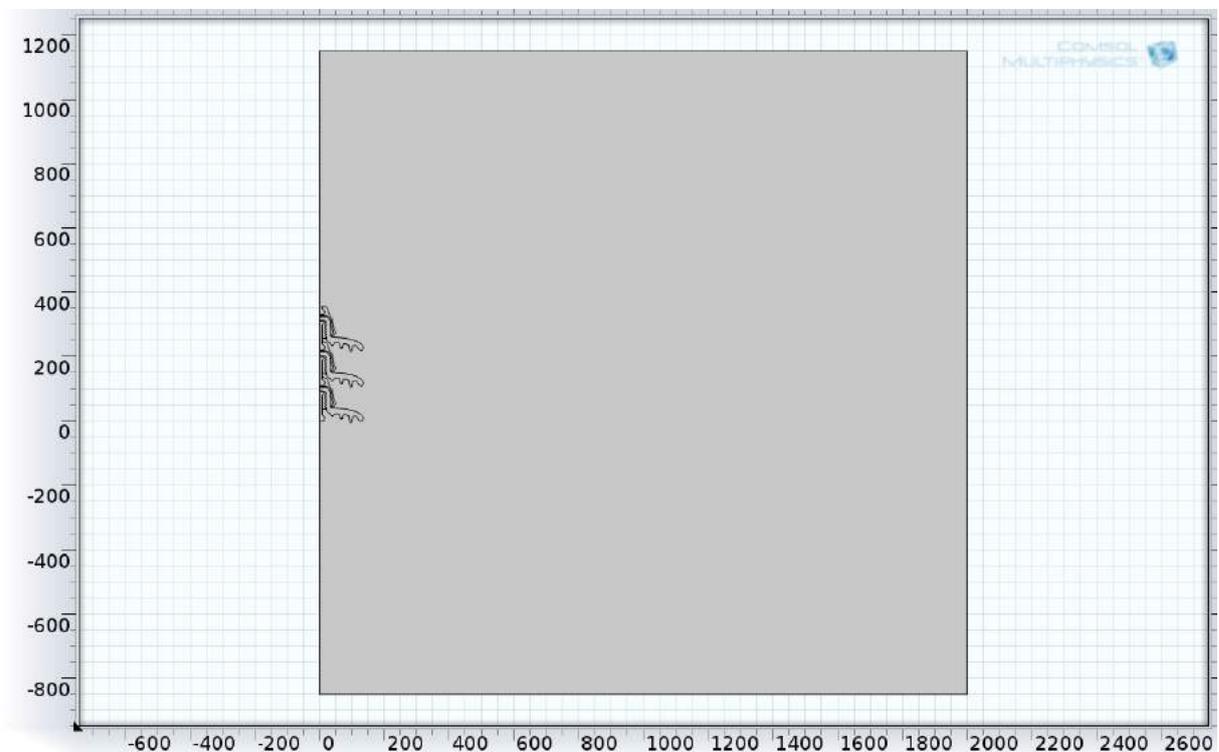
### 3.4.3 Isolador de Vidro - Cadeia com Três Unidades

O interesse em verificar o comportamento da distribuição de potencial e campo elétrico em uma cadeia de isoladores com apenas três unidades se dá pelo fato de ser factível experimentos em laboratório.

#### 3.4.3.1 Geometria Utilizada

Basicamente, a geometria utilizada nada mais é que uma cadeia com três isoladores padrões exatamente iguais ao do caso anterior, imersa em ar como exibido na Figura 29. O espaço de simulação se manteve o mesmo, com um retângulo de  $2000mm$ .

Figura 29 – Geometria desenvolvida para a simulação em cadeia com três unidades.

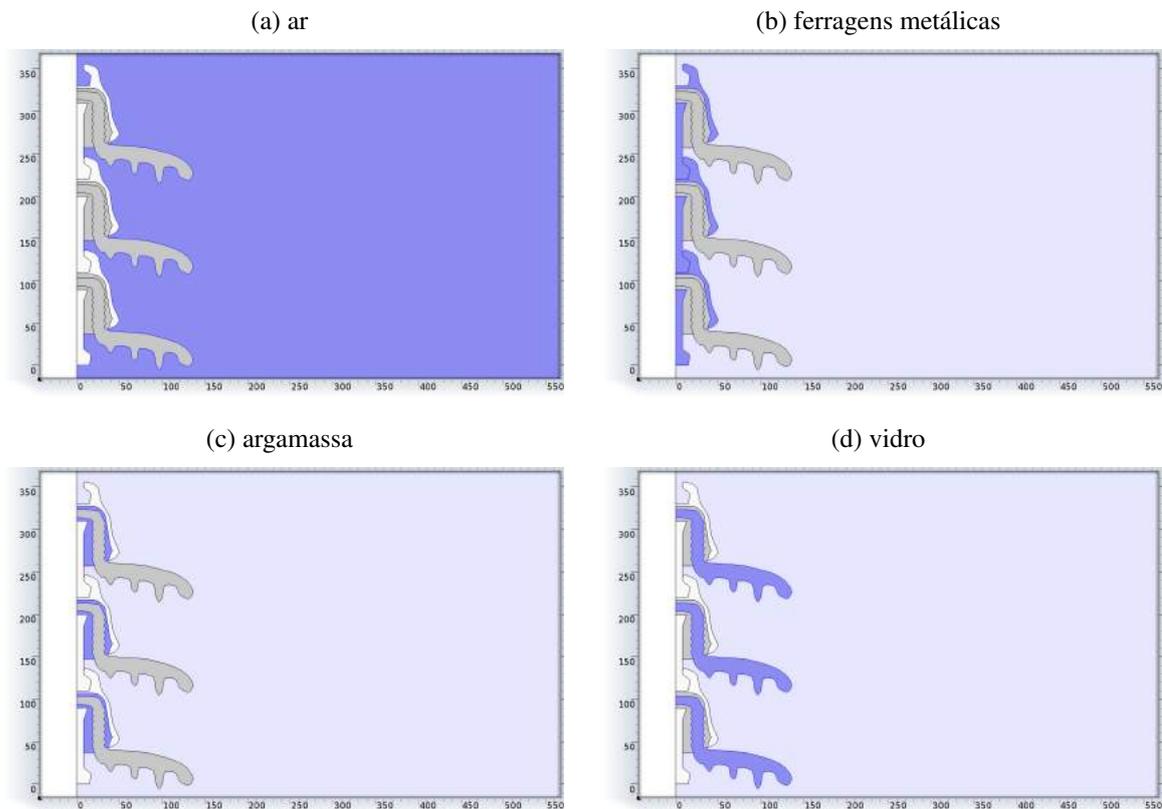


Fonte: próprio Autor.

#### 3.4.3.2 Definição dos Materiais

Utilizou-se os mesmos materiais do caso de um único isolador, que estão apresentados na tabela 2, em que os pinos e as campânulas são de ferragens metálicas, a superfície isolante é composta de vidro e os elementos que conectam os componentes são de argamassa.

Figura 30 – Regiões de cada material, cadeia com três unidades (em azul mais escuro).



Fonte: próprio autor.

### 3.4.3.3 Definição das Condições de Contorno

Definiu-se como condições de contorno o pino do isolador inferior, onde é aplicado a tensão à qual a cadeia está submetida, e a campânula do isolador superior que está aterrada zero volt, como pode ser visto na Figura 31. A tensão aplicada à cadeia de três unidades foi determinada através da expressão 1 obtida em (IEC, 1986):

$$N_{isol} = \frac{U_{\lambda} d_e}{d_i} \quad (1)$$

Em que:

- $N_{isol}$  -> Número de isoladores;
- $U_{\lambda}$  -> tensão aplicada ( $kV$ );
- $d_e$  -> distância de escoamento específica ( $cm/kV$ );
- $d_i$  -> distância de escoamento de cada isolador ( $cm$ ).

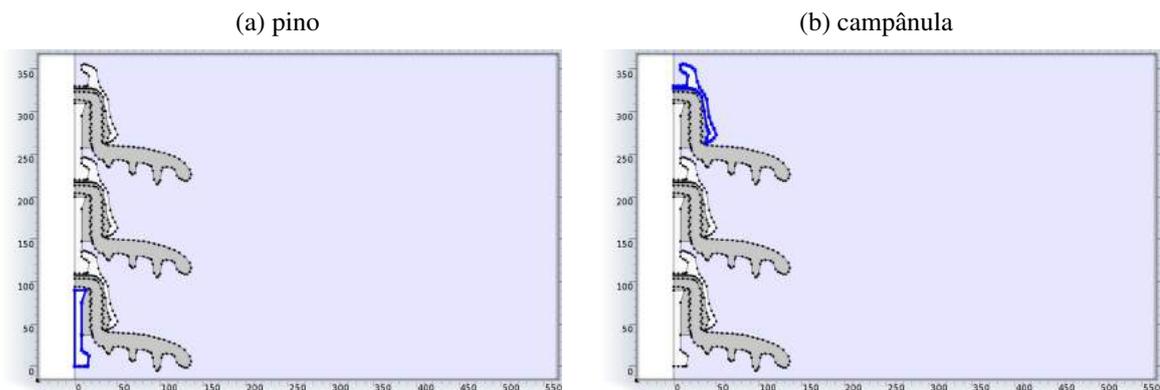
Tem-se três isoladores. A distância de escoamento de cada isolador é de  $30,5\text{cm}$  e a distância de escoamento específica adotada foi de 2 (valor referente ao ambiente limpo) encontrado da Tabela 3 retirada da (IEC, 1986). Substituindo esses valores na Expressão 1 da Seção 3.4.3.3 tem-se que a tensão encontrada é de  $45,75\text{kV}$ , valor adotado nessa simulação.

Tabela 3 – Valores das distâncias de escoamento específicas para diferentes ambientes.

Severidade da poluição	Distância de escoamento específica
Sem poluição	2,0 a 2,30
Poluição leve	3,20
Poluição intensa	4,50
Poluição muito intensa	6,30

Fonte: (IEC, 1986).

Figura 31 – Condições de contorno, cadeia com três unidades (em azul mais escuro).



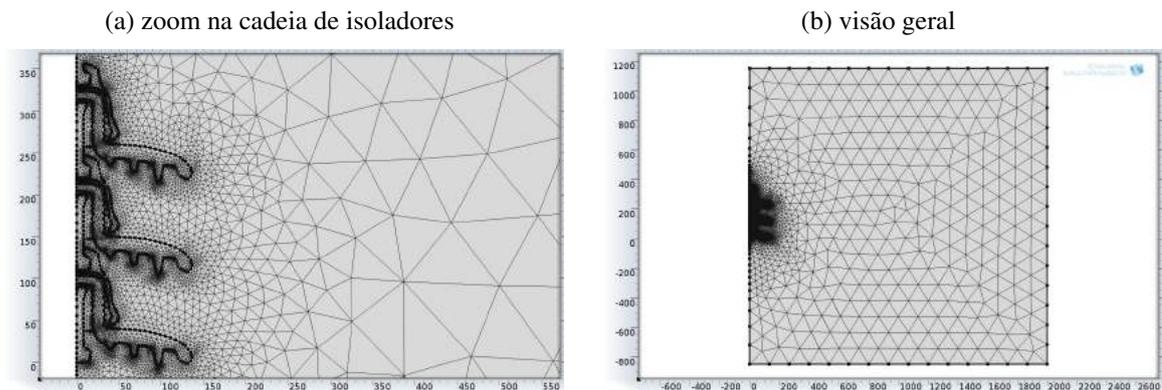
Fonte: próprio autor.

#### 3.4.3.4 Definição da Malha

Sabendo-se que a geometria é praticamente a mesma do problema anterior, sem maiores detalhes nem refinamentos pertinentes, adotou-se a mesma geração de malha "normal" disponível no COMSOL e adotada anteriormente.

Para este caso a malha gerada possuiu um total de 12522 elementos quantidade esta suficiente para uma boa representação da geometria da cadeia de isoladores estudada como pode ser visto na Figura 32.

Figura 32 – Malhas geradas no COMSOL, cadeia com três unidades.

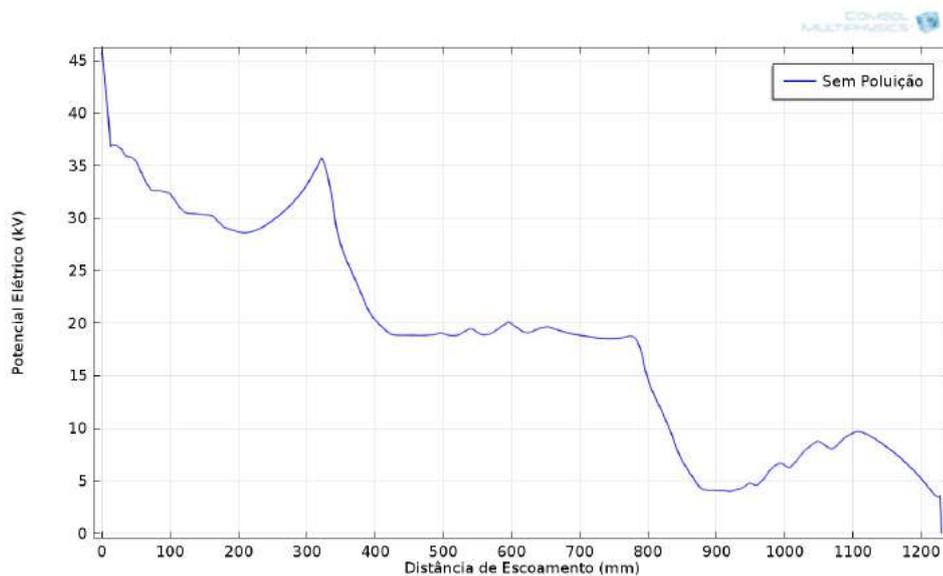


Fonte: próprio autor.

### 3.4.3.5 Resultados Obtidos para a Cadeia de Três Unidades sem Poluição

Os resultados referentes à distribuição de potencial e campo elétrico estão apresentados nas Figuras 33, 34 e 35.

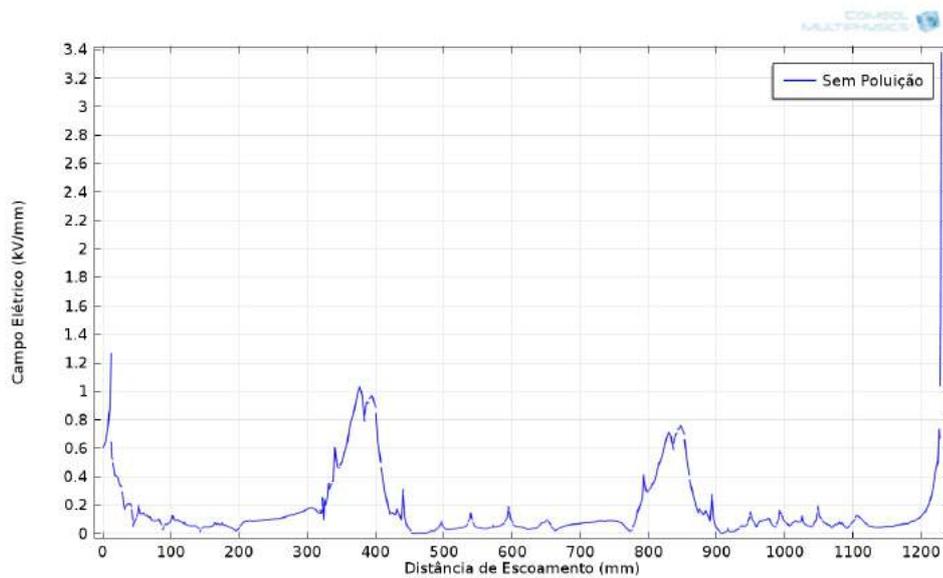
Figura 33 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia com três unidades.



Fonte: próprio autor.

Analisando a Figura 33 percebe-se que ocorre um aumento de tensão súbito junto a campânula da unidade mais próxima ao ponto onde aplica-se a tensão. Isto ocorre devido a representação adotada de aplicar a tensão no pino, sem levar em consideração um condutor e as ferragens de conexão que tornaria o modelo mais preciso.

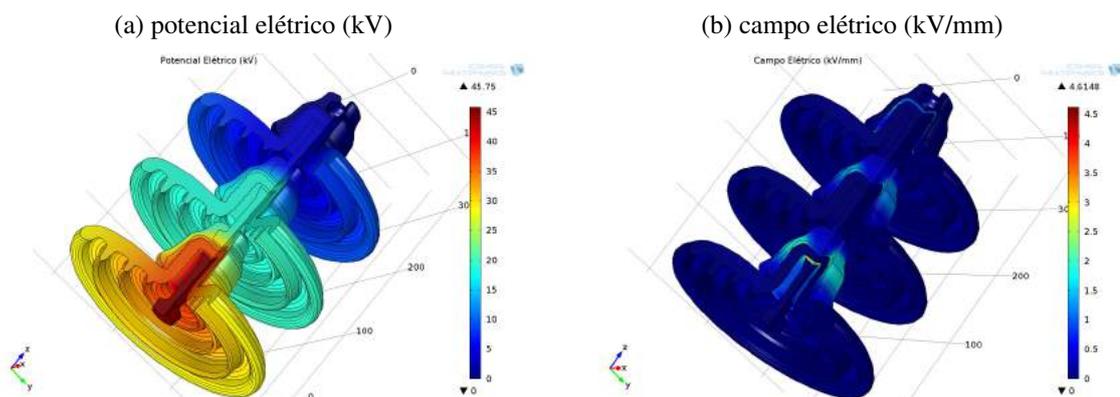
Figura 34 – Resultado de campo elétrico para cadeia com três unidades.



Fonte: próprio autor.

Analisando a Figura 34 percebe-se que os pontos em que ocorrem elevações nos valores de campo elétrico são justamente as regiões entre cada unidade isolante. Devido as conexões entre as ferragens e as trocas de material, além de serem regiões com grande variação de potencial elétrico.

Figura 35 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus, cadeia com três unidades.



Fonte: próprio autor.

### 3.4.4 Isolador de Vidro - Cadeia com Dezesesseis Unidades

O interesse em verificar o comportamento da distribuição de potencial e campo elétrico em uma cadeia de isoladores com dezesseis unidades se dá pelo fato de ser o padrão adotado nas linhas de  $230kV$  pela CHESF.

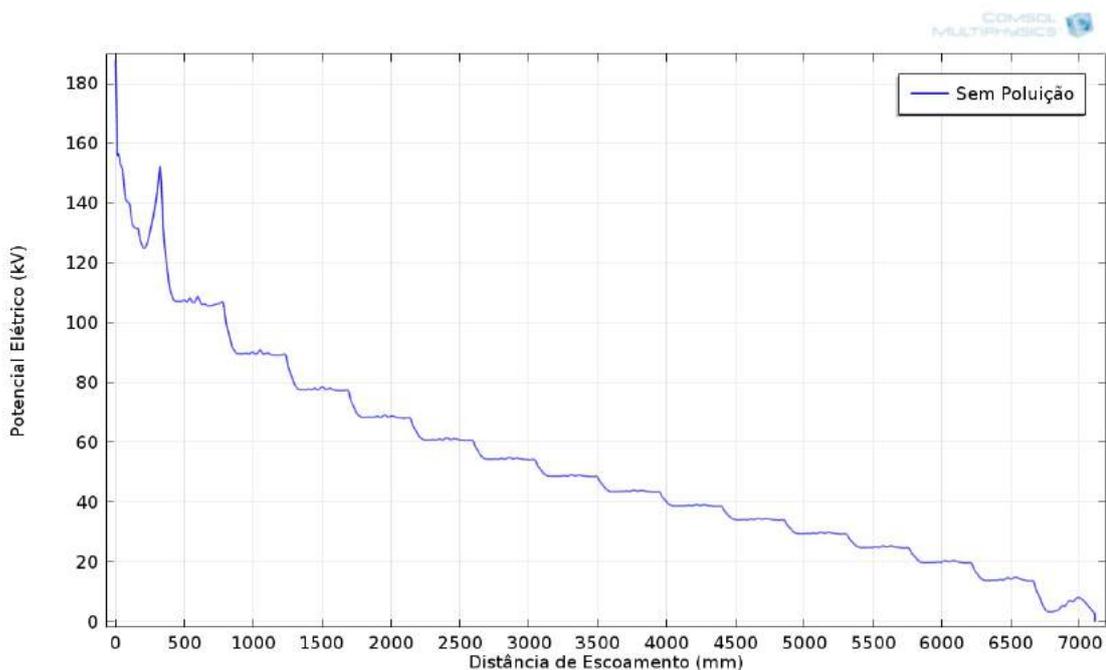
#### 3.4.4.1 Considerações Gerais

O procedimento para simulação da cadeia de dezesseis unidades é o mesmo da cadeia com três unidades. O espaço de simulação utilizado foi um quadrado de  $8000mm$  de lado, os materiais aplicados são os mesmos e nas mesmas regiões, as condições de contorno são aplicadas no pino do isolador mais inferior, com uma tensão de  $187,79kV$  ( $230kV \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ ), e na campânula do isolador superior que está aterrada. Para este caso a malha gerada possuiu um total de 53172 elementos quantidade esta suficiente para uma boa representação da geometria da cadeia de isoladores estudada.

#### 3.4.4.2 Resultados Obtidos para o Isolador sem Poluição

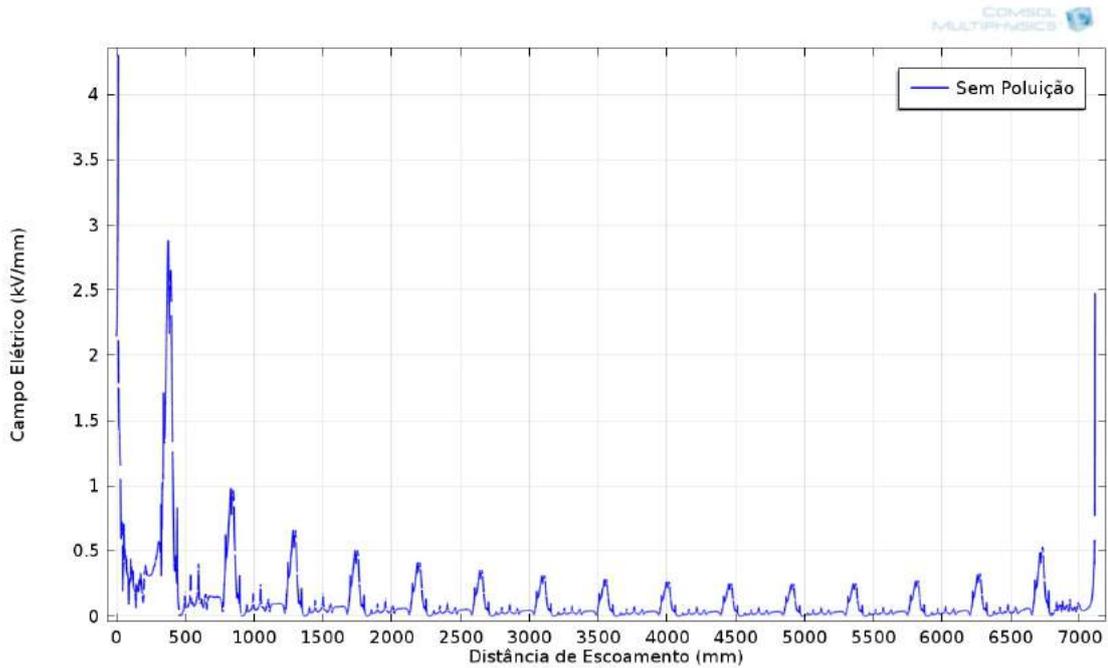
Os resultados referentes à distribuição de potencial e campo elétrico estão apresentados nas Figuras 36 e 37 respectivamente:

Figura 36 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia com dezesseis unidades.



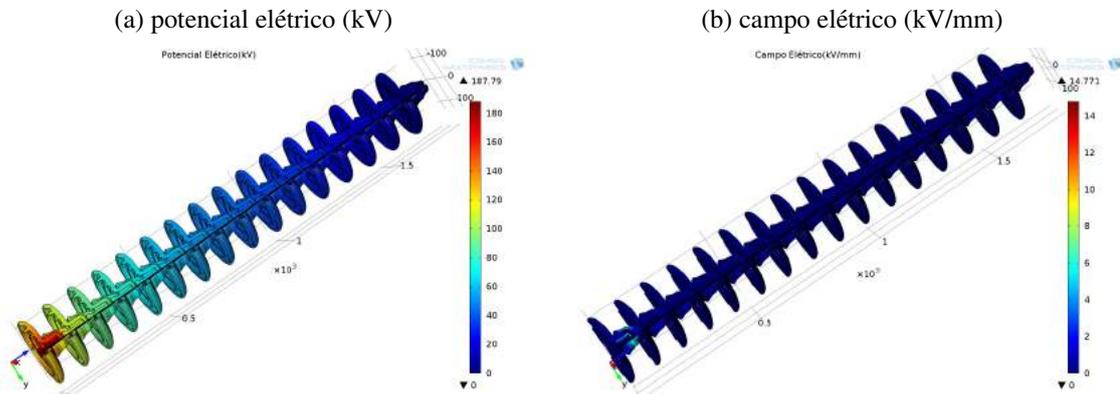
Fonte: próprio autor.

Figura 37 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia com dezesseis unidades.



Fonte: próprio autor.

Figura 38 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus, cadeia com dezesseis unidades.



Fonte: próprio autor.

As mesmas análises, referentes os gráficos encontrados para distribuição de potencial e campo elétrico realizadas para a cadeia com três unidades isolantes, são válidas para a cadeia com dezesseis unidades.

### 3.4.5 Isolador Polimérico de Alta Tensão

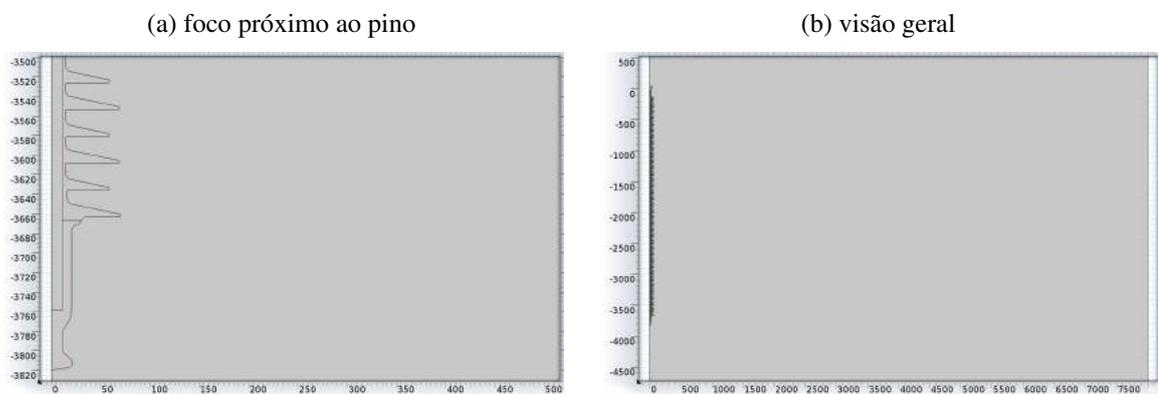
O estudo em isoladores poliméricos é pertinente, visto que os mesmos vêm sendo amplamente empregados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica por vantagens como: Resistência ao vandalismo, melhor desempenho em ambientes poluídos e serem dispositivos mais leves e de fácil manuseio. Porém, apesar das vantagens, não se possui a total compreensão do comportamento das grandezas elétricas durante o funcionamento dos isoladores poliméricos, e nem de como essas medidas influenciam na degradação do material.

Devido a falta de um sistema de diagnóstico consolidado na inspeção de isoladores poliméricos, os diversos estudos em andamento encontrados na literatura procuram o desenvolvimento de sistemas que indiquem quando um isolador está danificado, ou não, e a análise da distribuição de potencial e campo elétrico pode ser um dos caminhos.

#### 3.4.5.1 Geometria Utilizada

A geometria da simulação, bem como as outras apresentadas, consiste no acessório imerso em um envolto de ar. O isolador polimérico possui estrutura semelhante àquela apresentada na Figura 1, e a geometria no ambiente do COMSOL é exibida na Figura 39.

Figura 39 – Geometria desenvolvida para a simulação, isolador polimérico de alta tensão.



Fonte: próprio autor.

O espaço de simulação foi de  $8000\text{mm}$ , ou seja,  $8\text{m}$  determinado através de simulações, com o objetivo de obter uma curva semelhante a apresentada na Figura 7, obtida por outros pesquisadores.

#### 3.4.5.2 Definição dos Materiais

Utilizou-se os valores de permissividade elétrica encontrado em (ZHAO; COMBER, 2000) e apresentados na tabela 4.

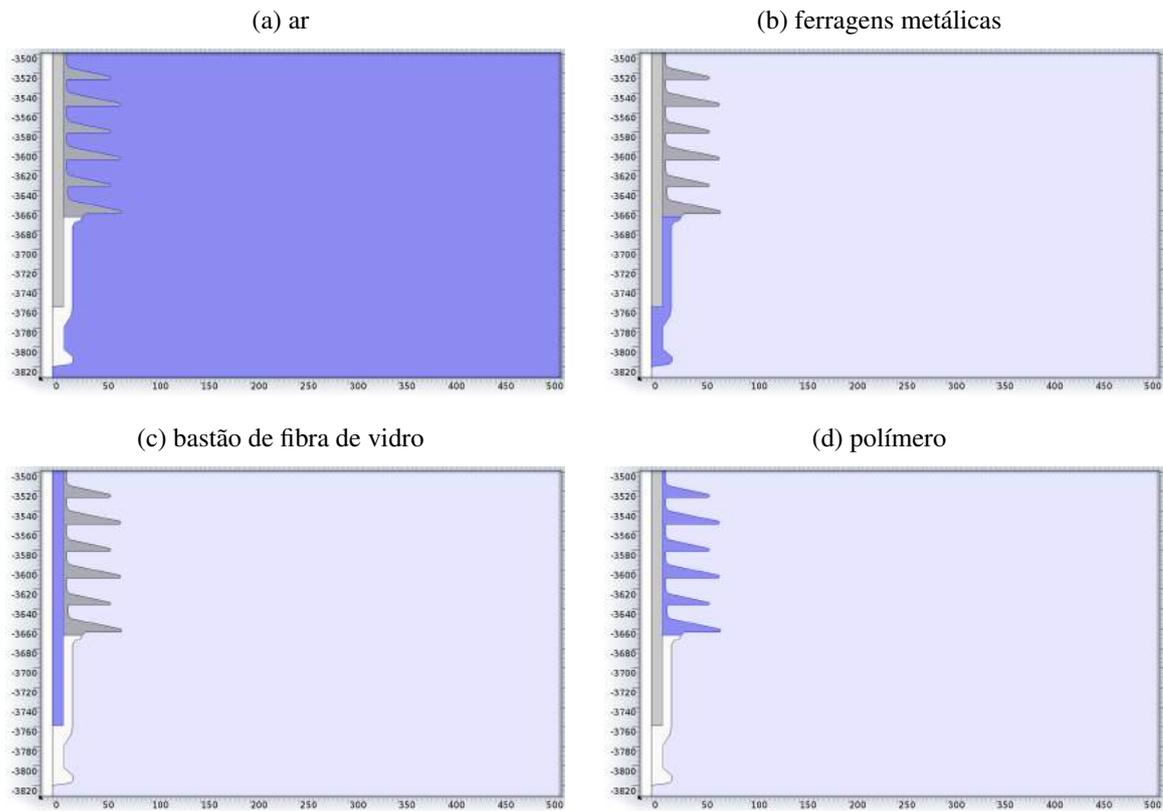
Tabela 4 – Informações sobre os valores das permissividades elétricas relativas utilizadas, cadeia de isolador polimérico de alta tensão.

Material	Permissividade Relativa
Ferragens metálicas	$10^{-6}$
Bastão de fibra de vidro	7,2
Material das aletas	4,5

Fonte: próprio autor.

Por tratar-se de uma cadeia de isoladores comprida, cerca de 4m de comprimento, as imagens apresentadas nesta seção serão focadas na região do pino, com o objetivo de facilitar a visualização.

Figura 40 – Regiões de cada material, cadeia polimérica próxima ao pino (em azul mais escuro).



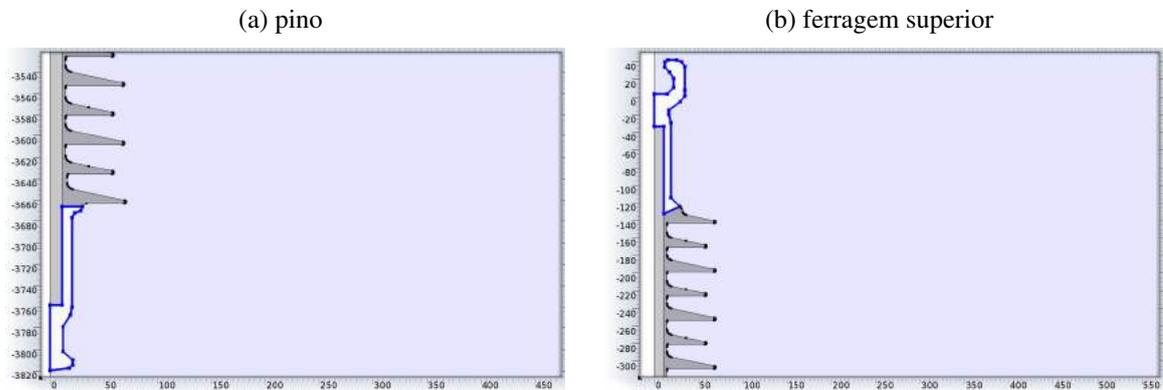
Fonte: próprio autor.

### 3.4.5.3 Definição das Condições de Contorno

Definiu-se como condições de contorno o pino do isolador, onde é aplicado a tensão a qual a cadeia está submetida, e a ferragem superior do isolador que está aterrada zero volt, como

pode ser visto na Figura 41. A tensão aplicada à cadeia de isolador polimérico de alta tensão é de  $408kV$  ( $500kV \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ ). Este nível de tensão eficaz entre fases utilizado nos sistemas de transmissão de energia elétrica de  $500kV$ .

Figura 41 – Condições de contorno, cadeia de isolador polimérico (em azul mais escuro).

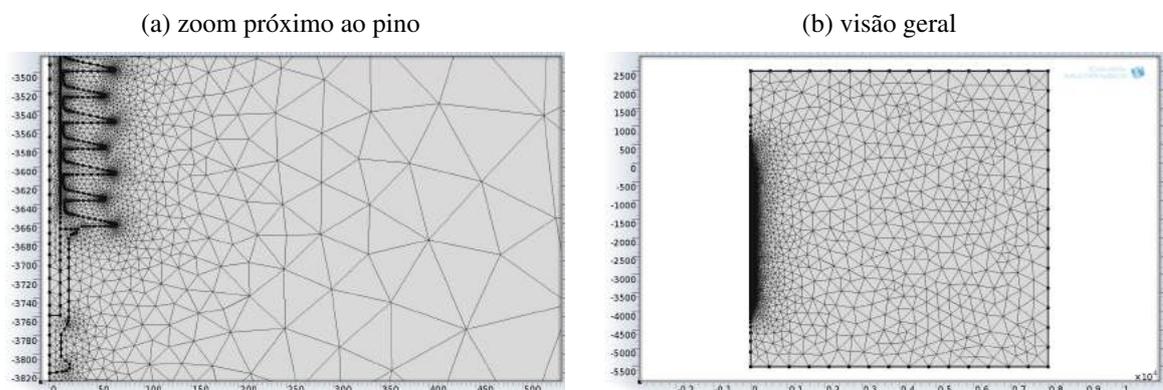


Fonte: próprio autor.

#### 3.4.5.4 Definição da Malha

Construiu-se a malha de elementos finitos utilizando as ferramentas padrões disponíveis no COMSOL. Testou-se diversos níveis de refinamento de malha, onde, novamente, percebeu-se que com um nível denominado de "normal" pelo COMSOL os resultados apresentados estão de acordo com o esperado e sem possuir um custo computacional elevado. Para este caso a malha gerada possuiu um total de 76246 elementos quantidade esta suficiente para uma boa representação da geometria da cadeia de isoladores estudada.

Figura 42 – Malhas geradas no COMSOL, isolador polimérico de alta tensão.

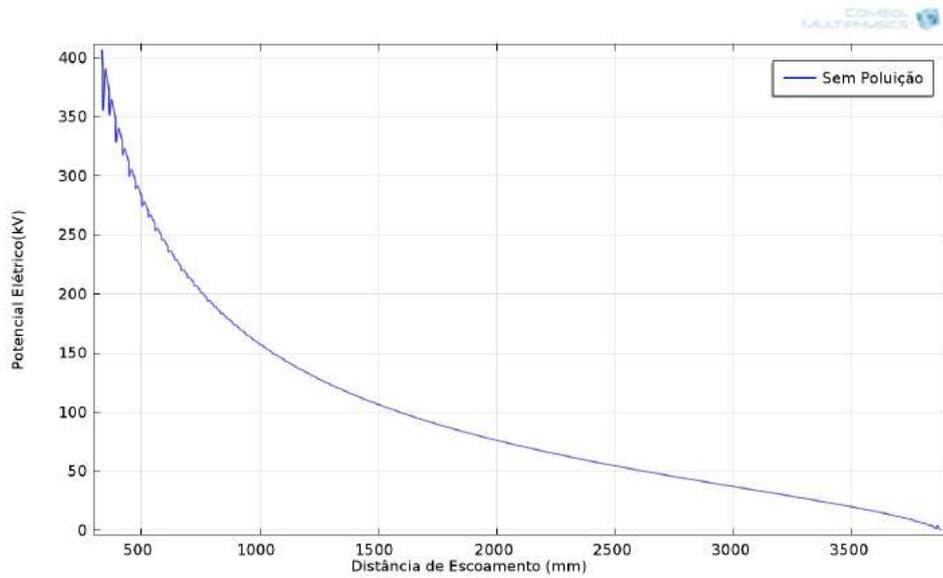


Fonte: próprio autor.

### 3.4.5.5 Resultados Obtidos para o Isolador sem Poluição

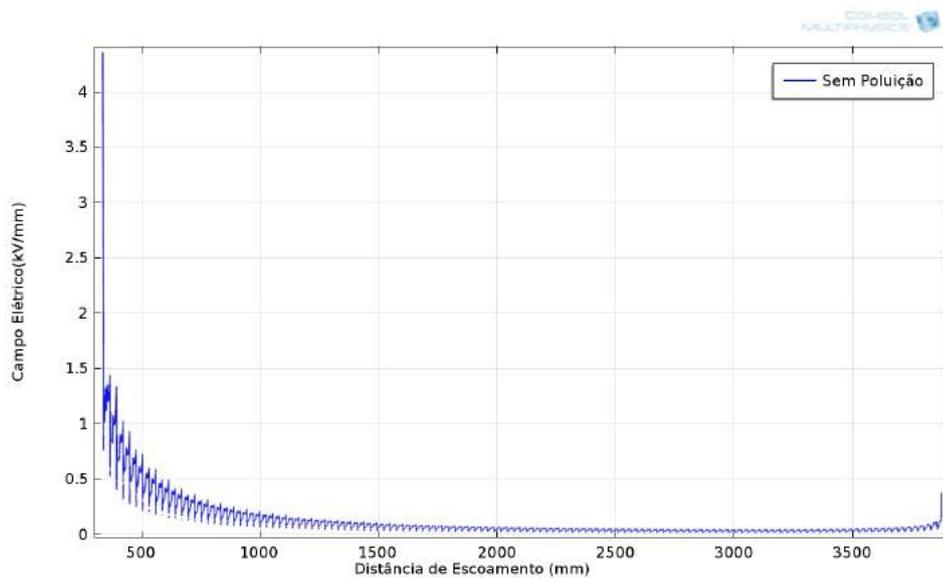
Os resultados referentes à distribuição de potencial e campo elétrico estão apresentados nas Figuras 43, 44 e 45:

Figura 43 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia de isolador polimérico.



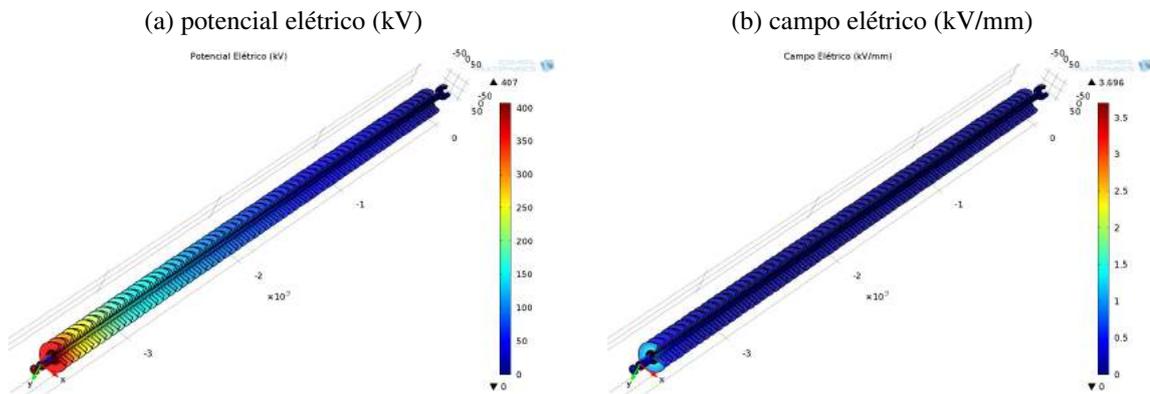
Fonte: próprio autor.

Figura 44 – Resultado da distribuição de potencial para cadeia de isolador polimérico.



Fonte: próprio autor.

Figura 45 – Resultados em 3D com revolução de 270 graus, cadeia isolador polimérico.



Fonte: próprio autor.

### 3.4.6 Espaçador de Rede de Distribuição Compacta

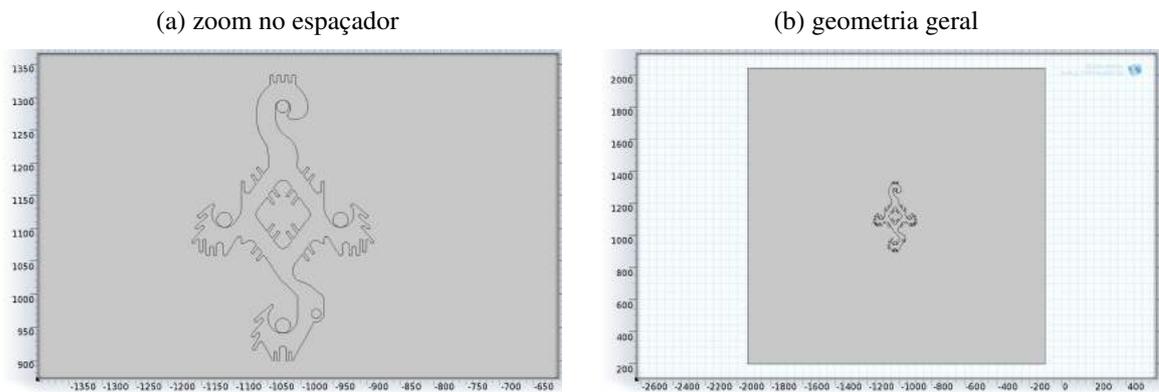
O estudo em espaçadores é interessante por ser um acessório pouco estudado e composto de um material orgânico, levando à análises semelhantes ao dos isoladores poliméricos. Por estarem predominantemente presentes em zonas urbanas, que se tratam de regiões onde mais circuitos são necessários para a distribuição de energia. Logo, a compactação trazida pelos espaçadores é bem-vinda. Normalmente, em tais regiões, a presença de poluição que venha a se depositar na superfície do espaçador é constante; portanto o estudo com esses acessórios em ambientes poluídos é de fundamental importância.

Apresentação dos resultados nesta seção foram obtidos no instante de tempo em que a fase A encontra-se no valor de pico  $11.86kV$ , considerando um sistema de distribuição de  $13kV$ , neste instante as fases B e C apresentam o mesmo nível de tensão, aproximadamente  $-6kV$ . Porém, através do modelo desenvolvido, é possível obter resultados para qualquer instante de tempo.

#### 3.4.6.1 Geometria Utilizada

A geometria desenvolvida para simulação do espaçador é idêntica a utilizada na pesquisa de outro autor (XAVIER, 2015), a contribuição será a inserção da camada condutiva na superfície do acessório, que serve para representar a poluição em conjunto com a umidade no modelo. Basicamente a geometria se constitui do espaçador imerso em um envoltório de ar, no formato de um quadrado de lado com  $1840mm$ , e quatro condutores, sendo três fases, que denominamos de A, B e C, conforme mostrado na Figura 14, e o chamado cabo mensageiro, que está aterrado.

Figura 46 – Geometria desenvolvida para simulação, espaçador.

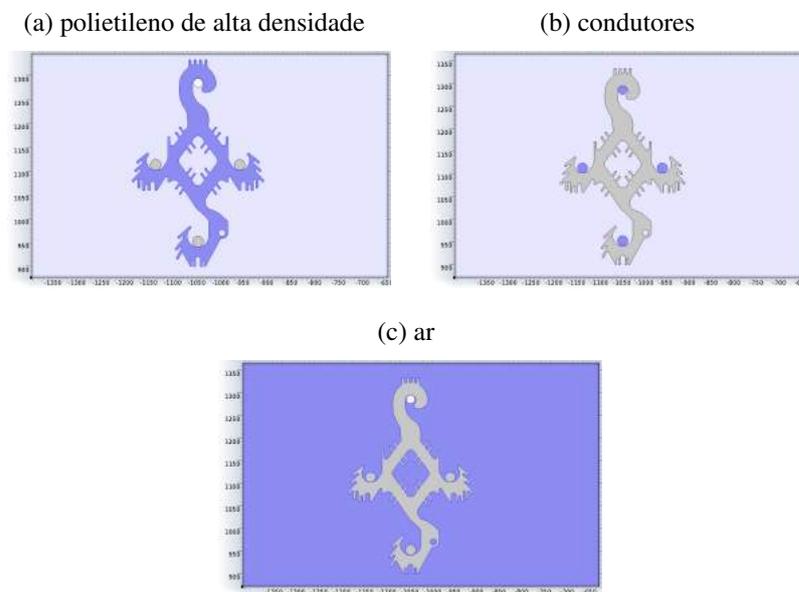


Fonte: próprio autor.

### 3.4.6.2 Definição dos Materiais

Utilizou-se os valores de permissividade elétrica encontrado em (XAVIER, 2015) e apresentados na tabela 5.

Figura 47 – Regiões de cada material presente na simulação do espaçador (em azul mais escuro).



Fonte: próprio autor.

Tabela 5 – Informações sobre os valores das permissividades elétricas utilizadas, espaçador.

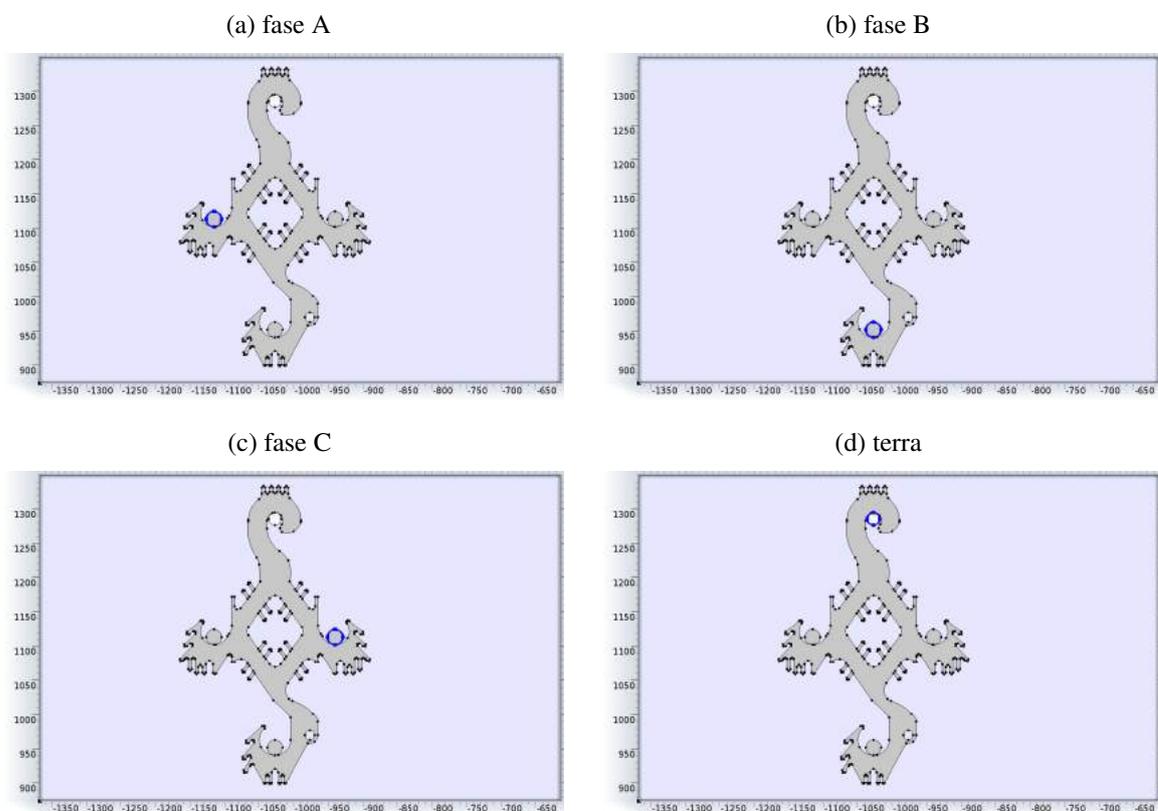
Material	Permissividade Relativa
Condutores	$10^{-6}$
Polietileno de alta densidade	2,4
Ar	1

Fonte: próprio autor.

### 3.4.6.3 Definição das Condições de Contorno

Por tratar-se de um espaçador de redes compactas de distribuição o mesmo está submetido a quatro níveis diferentes de potencial: três fases e um terra, zero volt, como mostrado na Figura 14. Considerou-se um sistema de distribuição de  $13,8kV$ , valor este entre fases e eficaz, cada uma das fases quando atinge o valor máximo chega a  $11,267kV$ . As fases estão defasadas de 120 graus entre si e nestas simulações, sem poluição, consideramos a fase A no valor de pico, a fase B defasada de 120 graus e a C defasada em 240 graus.

Figura 48 – Condições de contorno aplicadas no espaçador (em azul mais escuro).

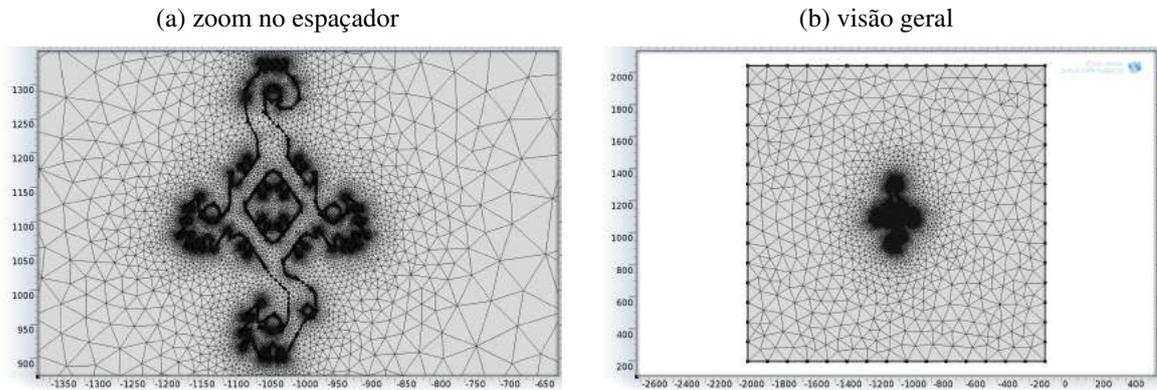


Fonte: próprio autor.

### 3.4.6.4 Definição da Malha

Utilizou-se a malha gerada automaticamente pelo COMSOL com o chamado refinamento "normal". A malha gerada é exibida na Figura 49. Esta malha contém 46916 elementos quantidade esta suficiente para uma boa representação da geometria do espaçador estudado.

Figura 49 – Malha desenvolvida para simulação, espaçador.

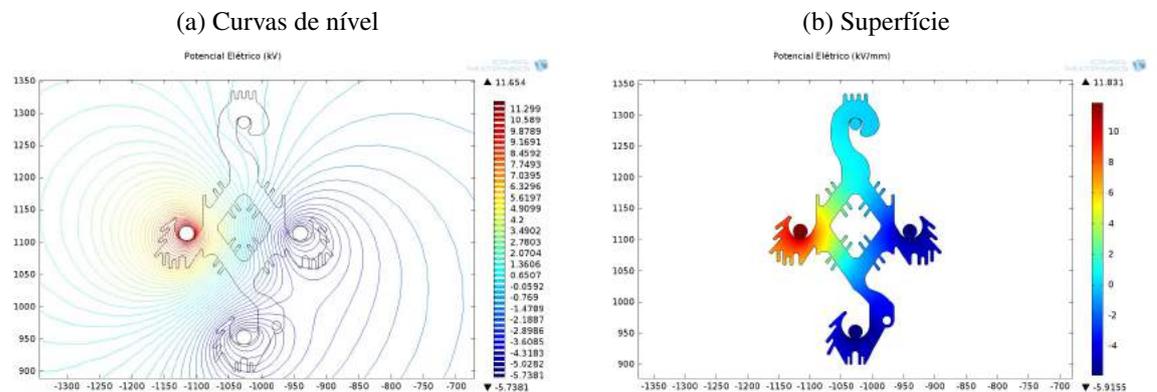


Fonte: próprio autor.

### 3.4.6.5 Resultados Obtidos para o Espaçador sem Poluição

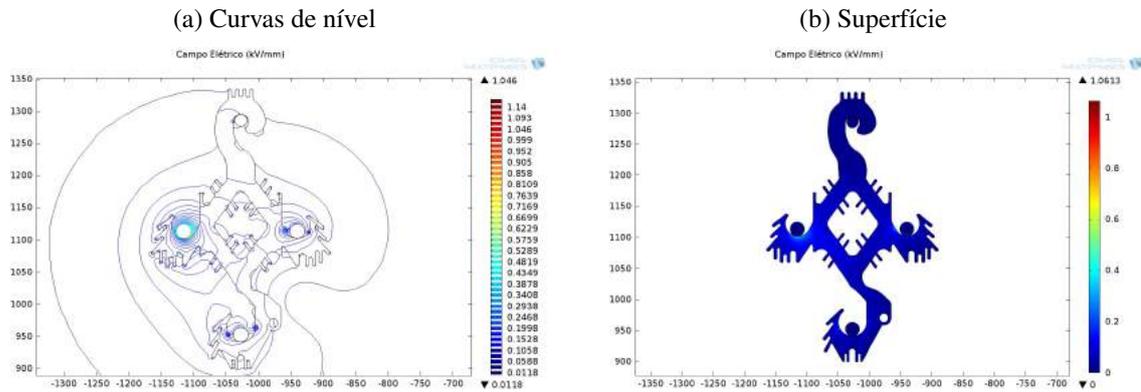
Os dados obtidos são idênticos aos encontrados por outro autor (XAVIER, 2015) e exibem o comportamento da distribuição de potencial e campo elétrico no momento em que a tensão na fase A encontra-se no valor máximo, ou seja no momento em que a fase A atinge o valor de pico de  $11,267kV$ .

Figura 50 – Resultados de distribuição de potencial no espaçador.



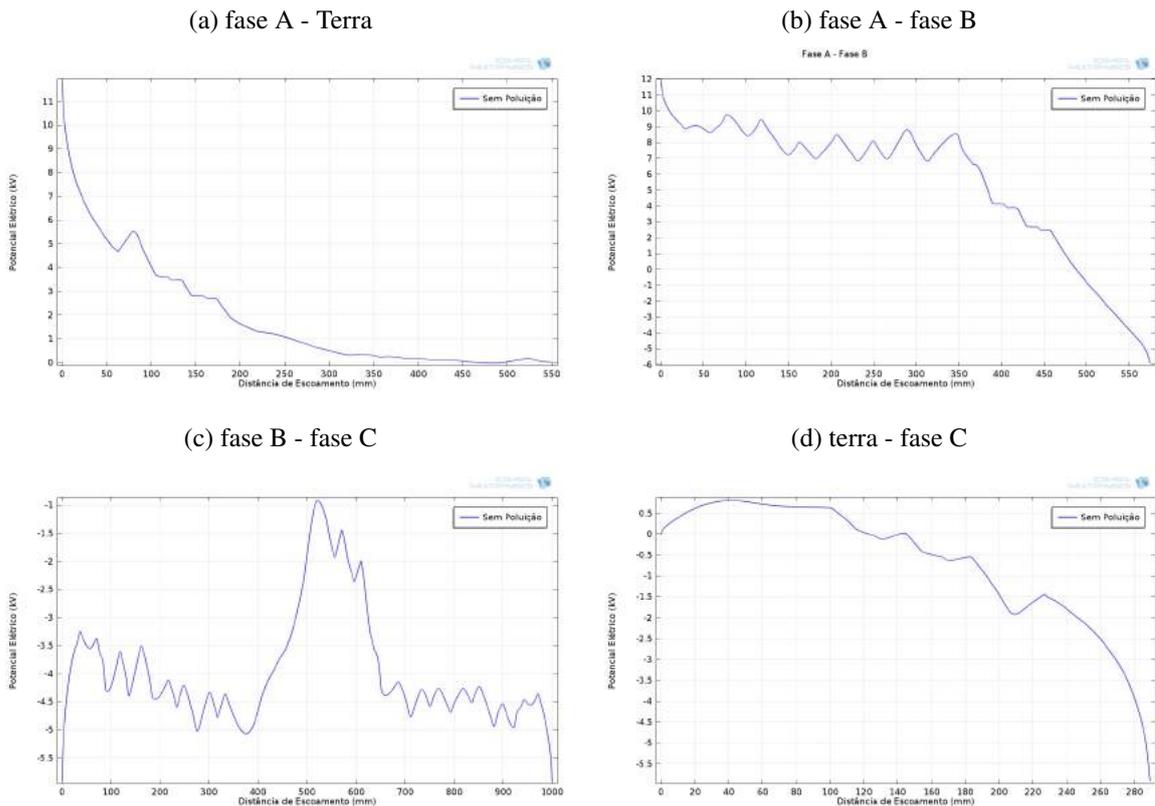
Fonte: próprio autor.

Figura 51 – Resultados de distribuição de campo elétrico no espaçador.



Fonte: próprio autor.

Figura 52 – Distribuição de potencial por setor no espaçador.

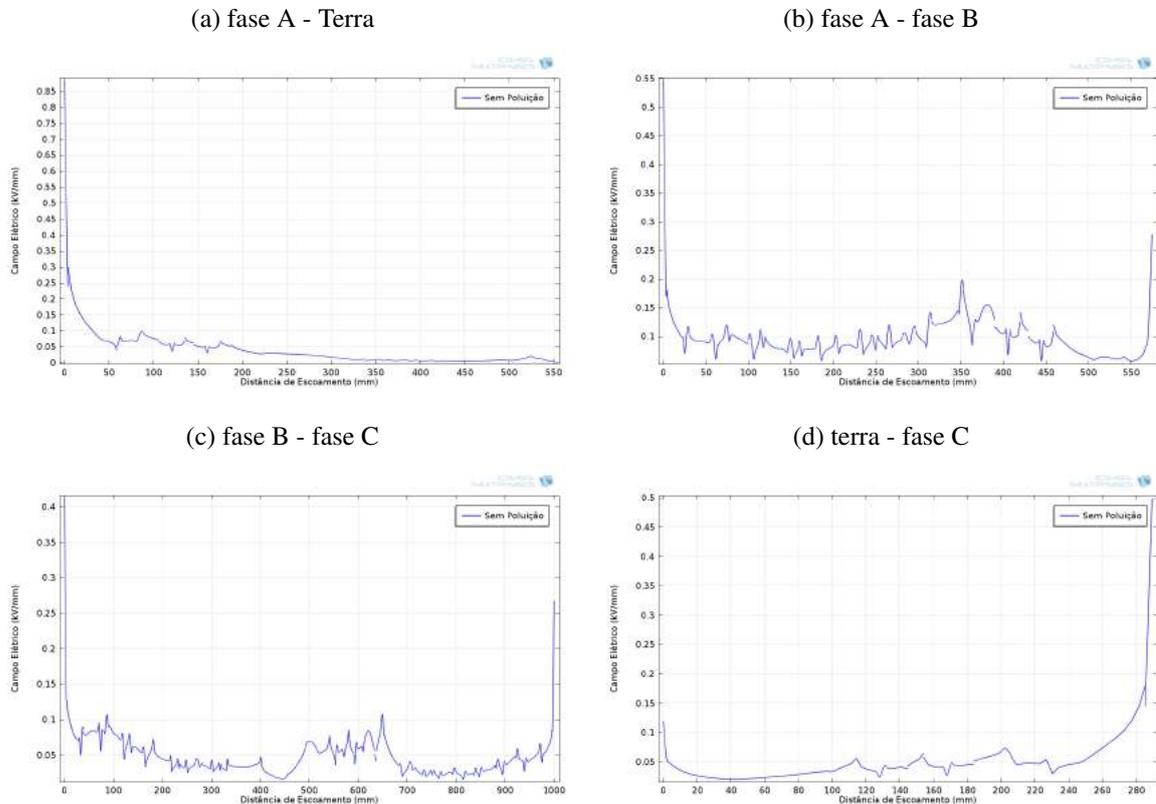


Fonte: próprio autor.

Observa-se nas Figuras 52 e 53 que com o objetivo de simplificar a exibição de resultados e os estudos realizados no espaçador o mesmo foi dividido em quatro setores: Fase A para a Terra, Fase A para a Fase B, Fase B para a Fase C e Fase C para a Terra, conforme mostrado

na Figura 14. Os dados de comprimento das distâncias de escoamento referente aos setores encontram-se na tabela 1.

Figura 53 – Distribuição de campo elétrico por setor no espaçador.



Fonte: próprio autor.

É possível, como dito anteriormente, exibir os resultados referentes a qualquer instante de tempo bastando selecionar o momento de interesse dentro do ciclo.

### 3.5 Modelo de Poluição Depositada Usando Elementos Finitos

Percebe-se que através da técnica de elementos finitos podemos simular um problema eletrostático para definir a distribuição de potencial ao longo de uma cadeia de isoladores com um determinado nível de tensão em seu pino e com uma extremidade de potencial zero. A poluição, neste estudo, é um fator fundamental e também pode ser modelada utilizando MEF. Basicamente a poluição pode ser simulada de duas formas diferentes:

#### 3.5.1 Modelagem de Poluição por Aproximação Volumétrica

Na maior parte dos equipamentos de alta tensão, a energia magnética pode ser desprezada comparado com a energia elétrica, então o campo elétrico pode ser dissociado do campo

magnético. Nesta condição, o campo elétrico pode ser expresso apenas como mostrado na Expressão 3 da Seção 2.3.

Considerando uma camada condutiva de espessura  $d(m)$ , volume de condutividade  $\sigma_v$  ( $S/m$ ) e permissividade absoluta  $\epsilon$  ( $F/m$ ), os quais são ambos considerados isotrópicos, a lei de conservação que governa a camada condutiva, em regime harmônico, pode ser expresso por:

$$\nabla \cdot \vec{J}_v + j\omega(\nabla \cdot \vec{D}) = 0 \quad (2)$$

Em que:

- $J_v$  -> densidade de corrente volumétrica ( $A/m^2$ );
- $D$  -> densidade de fluxo elétrico ( $C/m^2$ );
- $\omega$  -> frequência de operação ( $rad/s$ ).

A Expressão 2 da Seção 3.5.1 mostra que a camada condutiva é tratada como um material dielétrico condutivo. Utilizando-se a aproximação volumétrica modela-se a poluição como uma fina camada sobre a superfície do isolador.

Originalmente a Expressão 2 da Seção 3.5.1 foi proposta por (ANDERSON, 1977), implementada computacionalmente por (RASOLONJANAHARY; KRAENBUHL; NICOLAS, 1992) e utilizada por (VOLAT, 2013).

### 3.5.2 Modelagem de Poluição por Aproximação Superficial

Se a camada condutiva for muito fina, a corrente de condução e a densidade de corrente de deslocamento podem ser consideradas uniformes ao longo da espessura  $d$ . Nesse caso, a aproximação da camada como uma superfície condutiva pode ser realizada e todas as grandezas vetoriais podem ser projetadas nesta superfície condutiva, o que leva a seguinte Expressão:

$$d(\sigma_v + j\omega\epsilon)\nabla^2 V + j\omega\rho_s = 0 \quad (3)$$

Em que:

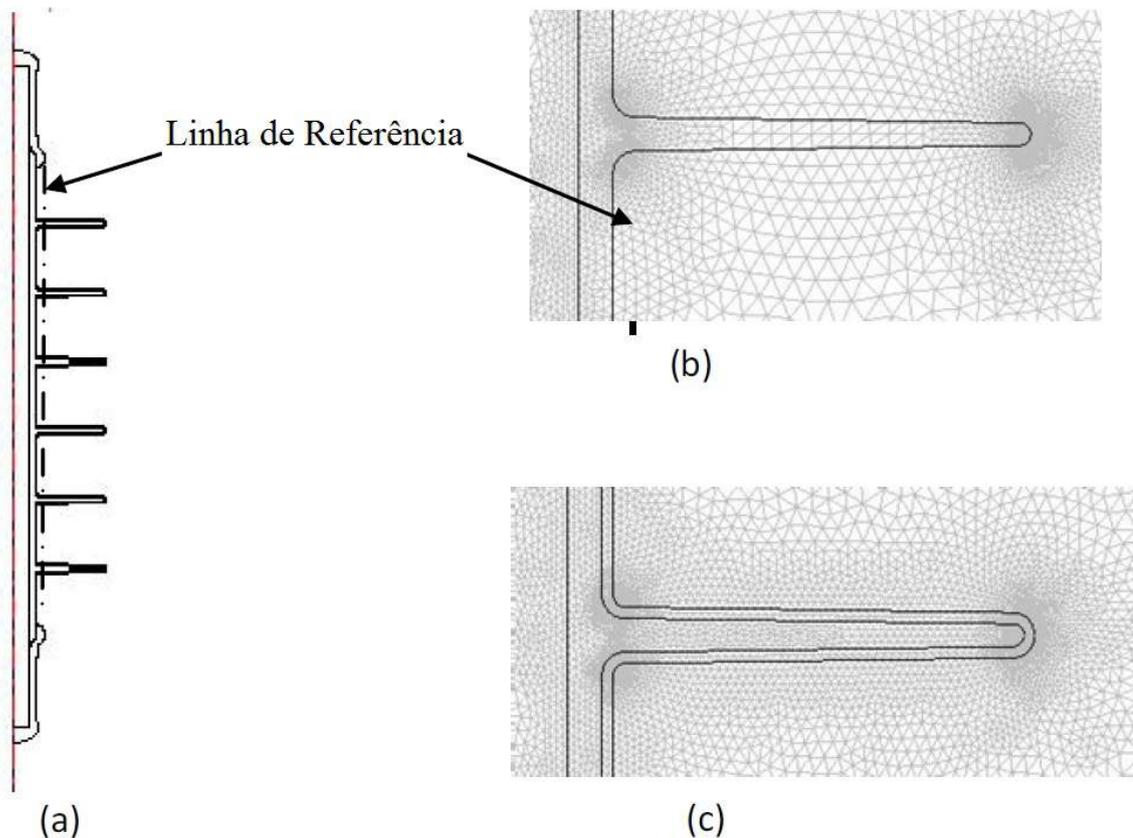
- $d$  -> Espessura da camada de poluição ( $m$ );
- $\sigma_v$  -> condutividade volumétrica da poluição ( $S/m$ );
- $\epsilon$  -> permissividade absoluta da poluição ( $F/m$ );
- $\rho_s$  -> densidade superficial de carga ( $C/m^2$ ).

A Expressão 3 da Seção 3.5.2 é utilizada como uma condição de contorno entre a superfície do isolador e o ar para modelar a presença de uma camada condutiva de espessura  $d$ , condutividade volumétrica  $\sigma_v$  e permissividade absoluta  $\epsilon$ .

Ou seja, não há a necessidade de se desenhar uma fina camada sobre o isolador e aplicar as características necessárias para configurar a camada, apenas aplica-se a condição de contorno modelando a Expressão 3 da Seção 3.5.2. Originalmente a a Expressão 3 da Seção 3.5.2 foi proposta por (ASENJO; MORALES; VALDENEGRO, 1997) e aplicado no estudo de (VOLAT, 2013).

Como verificado por (VOLAT, 2013), utilizar a modelagem por aproximação superficial ou utilizar a modelagem por aproximação volumétrica resulta em praticamente o mesmo resultado com uma diferença média de 1,74 por cento entre as duas aproximações. Para o estudo aqui realizado utilizou-se a aproximação superficial, pois poupa esforço computacional visto que a fina camada modelada precisaria de um número elevado de elementos para que fosse representada de maneira fiel.

Figura 54 – Modelo numérico de um isolador de 28kV, exibindo as duas formas de aproximação.



Fonte: Adaptado de (VOLAT, 2013).

Neste capítulo foram apresentados os dispositivos isolantes e os *softwares* utilizados nesta dissertação, bem como a construção dos modelos para obtenção da distribuição de potencial e campo elétrico e os resultados referentes ao dispositivo sem a presença de poluição. Também foi apresentado a maneira como a poluição é modelada. No capítulo seguinte apresentar-se-ão os resultados de distribuição de potencial e campo elétrico com o dispositivo poluído sob diferentes níveis de poluição depositada.

## 4 Resultados da Modelagem com Poluição

O presente capítulo apresenta expõe os resultados obtidos, e análises realizadas, referentes a distribuição de potencial e campo elétrico para as simulações com formação da camada condutiva na superfície dos dispositivos isolantes apresentados no Capítulo 3.

### 4.1 Considerações Gerais

Realizou-se as simulações para cada dielétrico conforme apresentado no capítulo 3, acrescentando a condição de contorno proposta para simular o comportamento da poluição depositada sobre o material. Utilizou-se três níveis diferentes de poluição para a camada condutiva, que são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Níveis de condutividade utilizados para modelar os níveis de poluição.

Nível de Poluição	Condutividade Utilizada
Baixo Nível de Poluição	$10nS/m$
Nível Intermediário de Poluição	$1\mu S/m$
Nível Elevado de Poluição	$0,1mS/m$

Fonte: (VOLAT, 2013).

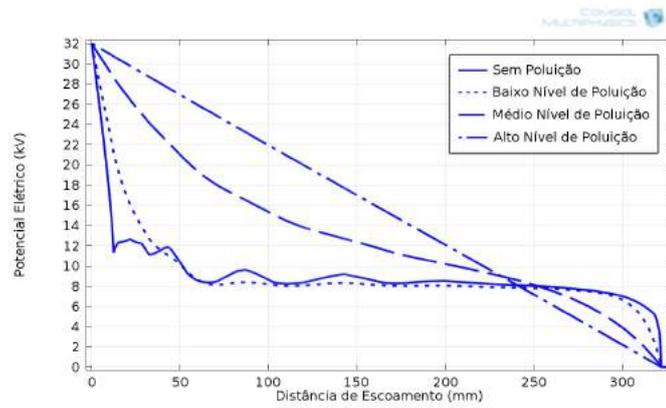
Com relação a permissividade relativa e espessura da camada utilizada optou-se por modelar com valores de 15 e de  $0.1mm$  respectivamente, que são valores empregados na literatura (VOLAT, 2013) e servem de balizamento para os resultados obtidos. A frequência de operação aplicada foi de  $60Hz$ , valor padrão nas redes elétricas brasileiras. Por falta de estudos completos e referentes aos valores da densidade superficial de carga, uma boa aproximação que pode ser considerada é fazer com que seu valor seja igual a zero.

Os resultados apresentados, que exibem o campo elétrico em cada acessório de maneira espacial (duas ou três dimensões), ou seja os gráficos de superfície, possuem a mesma escala para todos os níveis de poluição, visando-se a comparação de maneira justa entre as diferentes situações modeladas. Essa escala é baseada utilizando os menores e os maiores níveis de campo elétrico presentes nas simulações com o acessório limpo. Por exemplo, se determinado acessório apresenta como maior valor de campo elétrico em estado limpo o valor de  $5kV/mm$ , e como menor valor  $0kV/mm$ , então para os gráficos de superfície apresentados para os outros três níveis de poluição a escala será ajustada para exibir de  $0kV/mm$  à  $5kV/mm$  de forma a realizar-se uma comparação justa entre os diferentes níveis de poluição. Para as distribuições de potencial não adotou-se este procedimento, visto que os valores máximos e mínimos são iguais em todas as situações e determinados através das condições de contorno.

## 4.2 Resultados

### 4.2.1 Isolador de Vidro Padrão

Figura 55 – Distribuição de potencial variando-se a poluição.

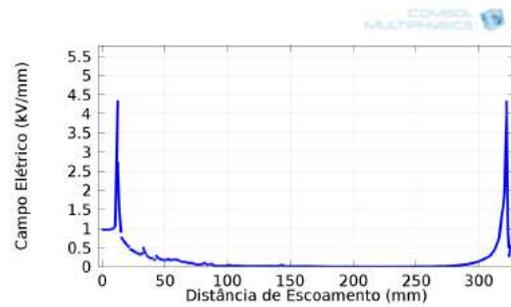
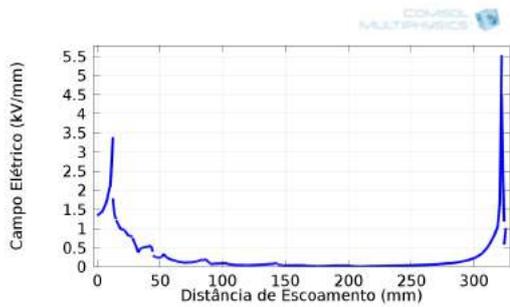


Fonte: próprio Autor.

Figura 56 – Distribuição de campo elétrico variando-se a poluição.

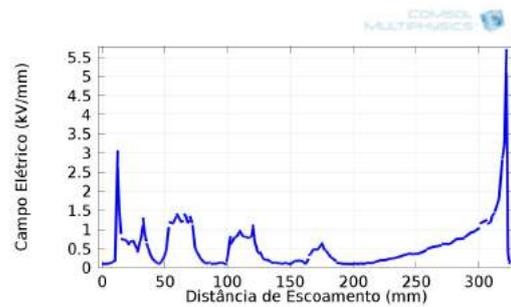
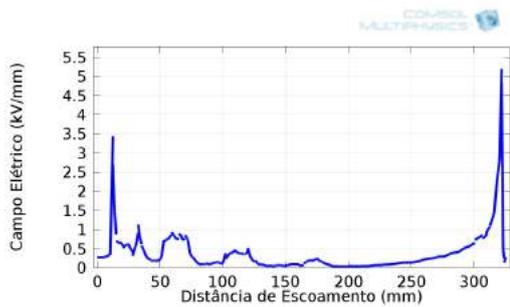
(a) sem poluição

(b) baixa poluição



(c) média poluição

(d) alta poluição

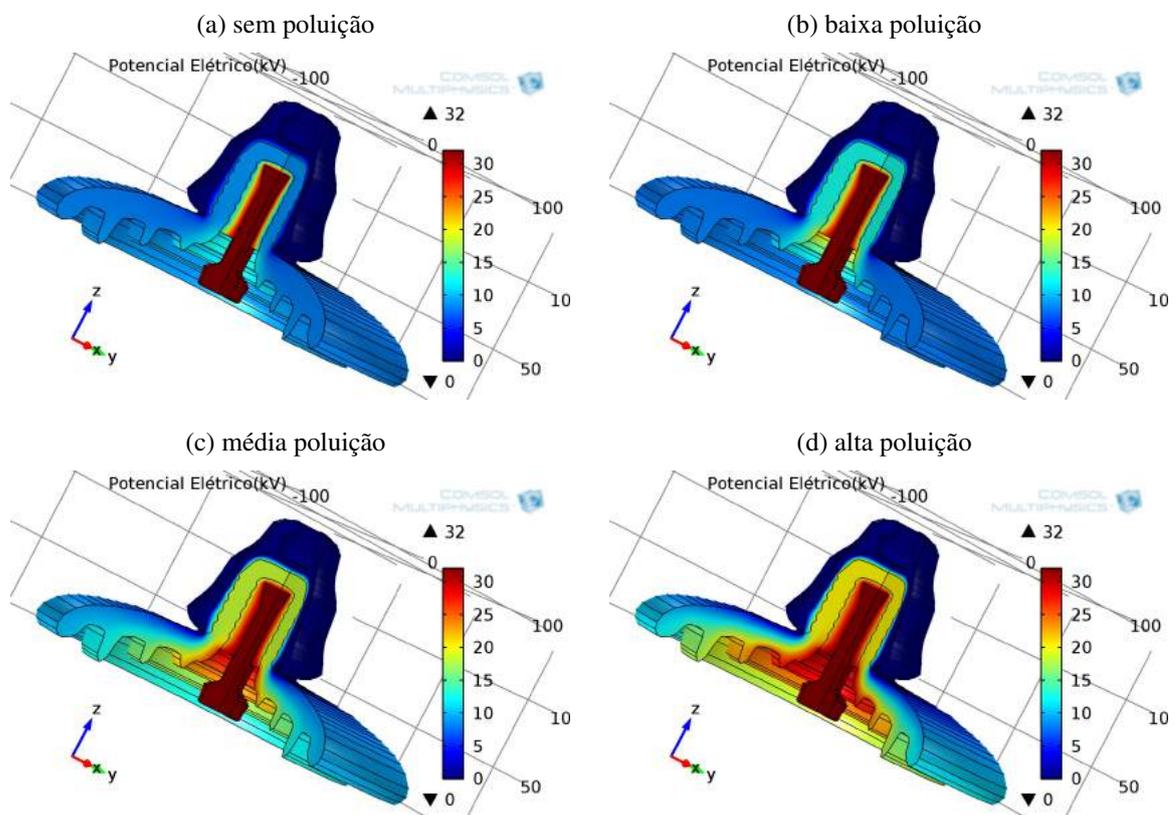


Fonte: próprio autor.

Nota-se que quanto maior o nível de poluição depositada na superfície do isolador, mais linear se torna o gráfico da distribuição de potencial. Isto ocorre devido a característica capacitiva do isolante estar dando lugar a um comportamento resistivo característico da camada condutiva. Quanto maior o nível de poluição, mais uniforme é a distribuição de potencial ao longo do isolante.

Analisando-se a distribuição de campo elétrico é possível perceber que quando aumenta-se o nível de poluição ocorre o aumento do valor de campo elétrico em outras regiões da superfície do isolante, e não apenas junto ao pino e a campânula. Esses valores de campo elétrico podem superar a rigidez dielétrica do ar, cerca de  $30kV/cm$ , levando assim a ocorrência de descargas superficiais. Caso essas descargas se propaguem elas podem vir a contornar o isolante, ocasionando assim o mau funcionamento do mesmo.

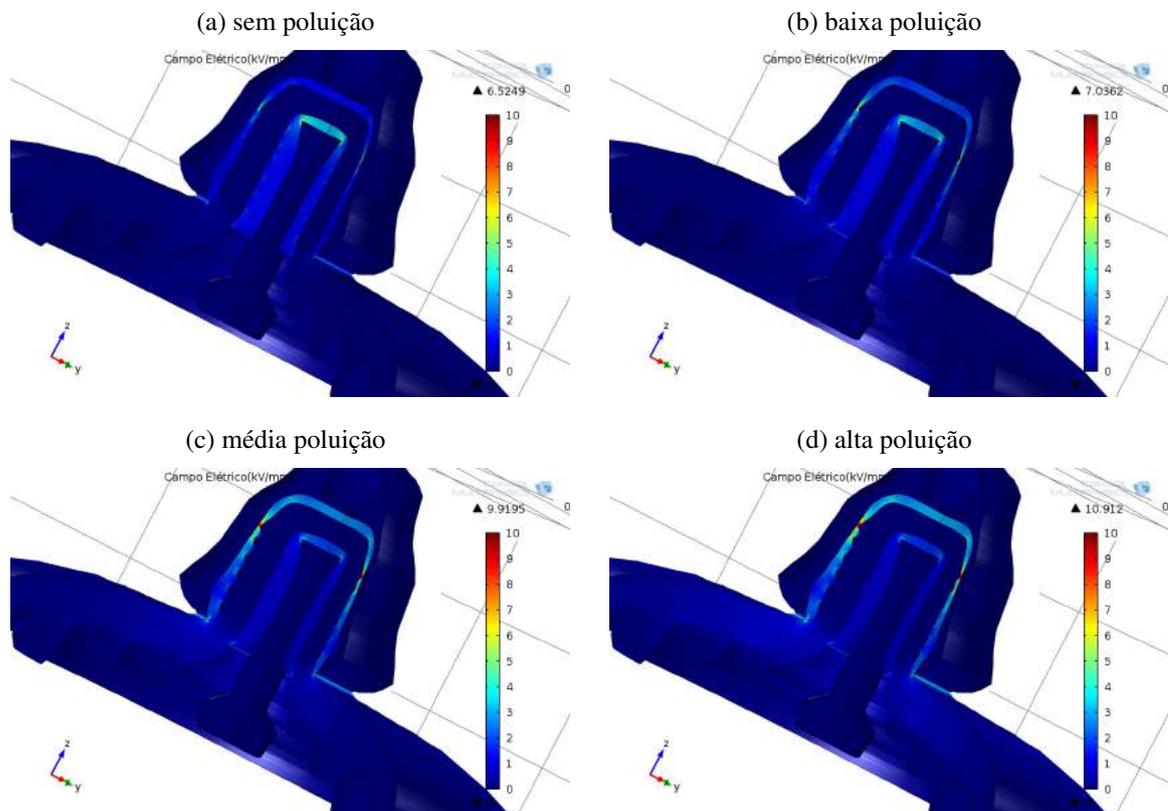
Figura 57 – Distribuição de potencial variando-se o nível de poluição (visualização em 3D).



Fonte: próprio autor.

A Figura 57 apresenta a visualização da distribuição de potencial em três dimensões com corte para mostrar como essa distribuição se comporta internamente na peça. Elevando-se a poluição percebe-se que o potencial deixa de estar concentrado predominantemente junto ao pino e começa a se uniformizar ao longo da peça, elevando os níveis de potencial em outras regiões, como visto anteriormente na Figura 55.

Figura 58 – Distribuição de campo elétrico variando-se o nível de poluição (visualização em 3D).



Fonte: próprio autor.

Tabela 7 – Valores máximos de campo elétrico internos ao isolador para cada nível de poluição.

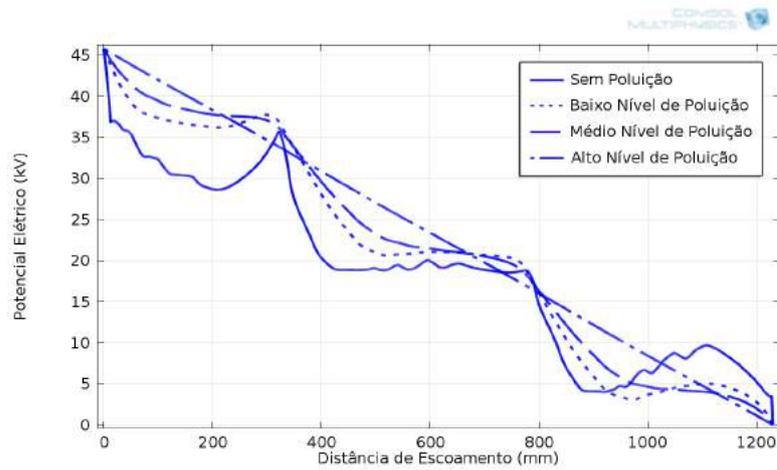
Nível de Poluição	Valor máximo de campo elétrico
Sem Poluição	6,52kV/mm
Baixo Nível de Poluição	7,03kV/mm
Nível Intermediário de Poluição	9,91kV/mm
Nível Elevado de Poluição	10,91kV/mm

Fonte: próprio autor.

A Figura 58 apresenta a visualização da distribuição de campo elétrico em três dimensões com um corte para mostrar como essa distribuição se comporta internamente na peça. Para efeito de comparação a escala de cores varia entre o azul escuro referente a  $0kV/mm$ , que seria o menor valor de campo elétrico, e satura no vermelho representando o valor de  $10kV/mm$ . Percebe-se que quanto maior o nível de poluição, maior será a quantidade de regiões com níveis maiores de campo elétrico. Os valores máximos de campo elétrico podem ser visualizados na Tabela 7.

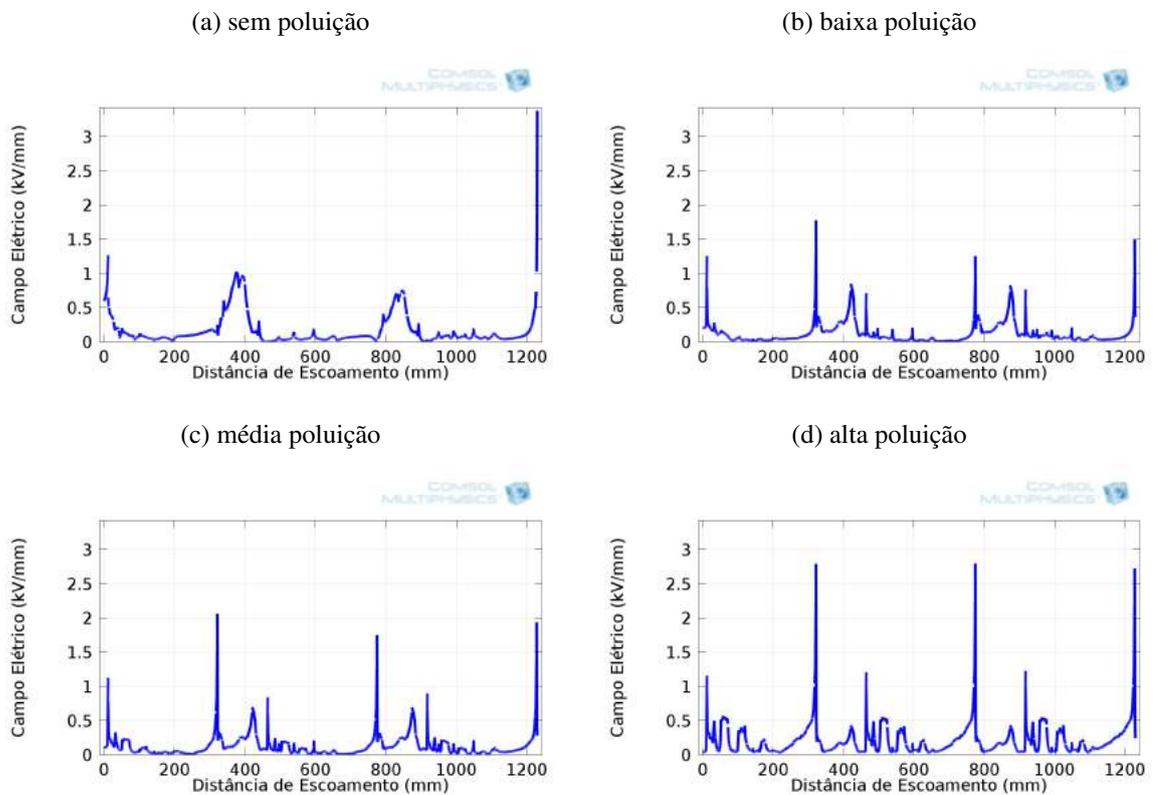
### 4.2.2 Cadeia de Isolador de Vidro Padrão com três unidades

Figura 59 – Distribuição de potencial variando-se a poluição em cadeia com três unidades.



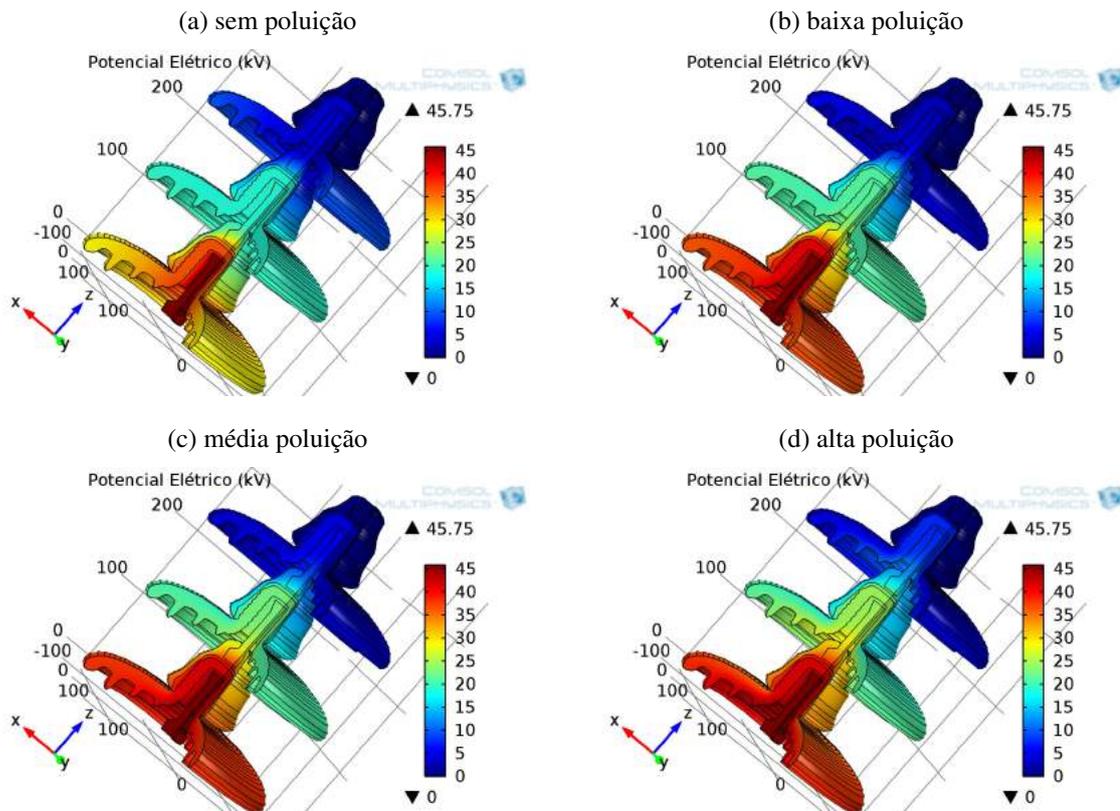
Fonte: próprio Autor.

Figura 60 – Distribuição de campo elétrico variando-se a poluição em cadeia com três unidades.



Fonte: próprio autor.

Figura 61 – Potencial elétrico variando-se a poluição em cadeia de três unidades (em 3D).



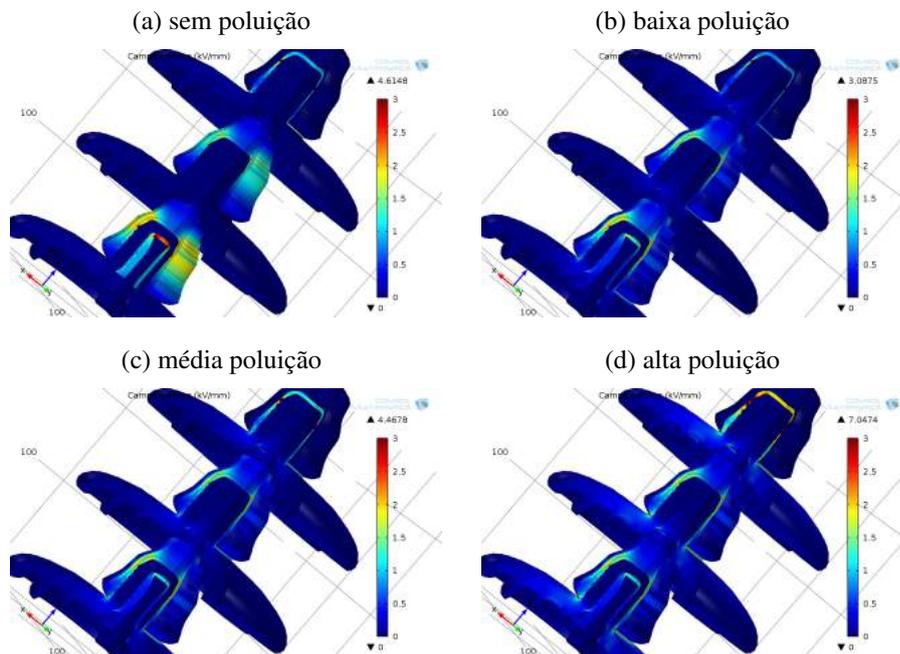
Fonte: próprio autor.

O comportamento da distribuição de potencial e do campo elétrico são análogos aqueles encontrados para as simulações realizadas com apenas uma unidade do isolador padrão. Além disso, percebe-se um aumento no valor do campo elétrico nas regiões de conexão entre duas unidades isolantes, isto ocorre devido a presença da interface entre objetos diferentes compostos de materiais diferentes. Nota-se que com o aumento dos níveis de poluição maiores se tornam os valores de campo elétrico nessas regiões, podendo ocasionar o aparecimento de descargas superficiais.

Analisando-se o comportamento da distribuição de potencial é possível notar que o valor de tensão sobe bruscamente em  $305\text{mm}$ , este comportamento não é esperado e ocorre devido a uma aproximação realizada no modelo. Trata-se da aproximação de colocar a condição de contorno, referente a tensão à qual o isolador está submetida, diretamente no pino e de não considerar um condutor e as ferragens de conexão que estariam presentes no sistema real.

A Figura 62 apresenta a visualização da distribuição de campo elétrico em três dimensões com um corte para mostrar como essa distribuição se comporta internamente na peça. Para efeito de comparação a escala de cores varia entre o azul escuro referente a  $0\text{kV}/\text{mm}$ , que seria o menor valor de campo elétrico, e satura no vermelho representando o valor de  $3\text{kV}/\text{mm}$ .

Figura 62 – Campo elétrico variando-se a poluição em cadeia de três unidades (em 3D).



Fonte: próprio autor.

Tabela 8 – Valores máximos de campo elétrico internos para a cadeia de três isoladores em cada nível de poluição.

Nível de Poluição	Valor máximo de campo elétrico
Sem Poluição	4,61 kV/mm
Baixo Nível de Poluição	3,09 kV/mm
Nível Intermediário de Poluição	4,47 kV/mm
Nível Elevado de Poluição	7,05 kV/mm

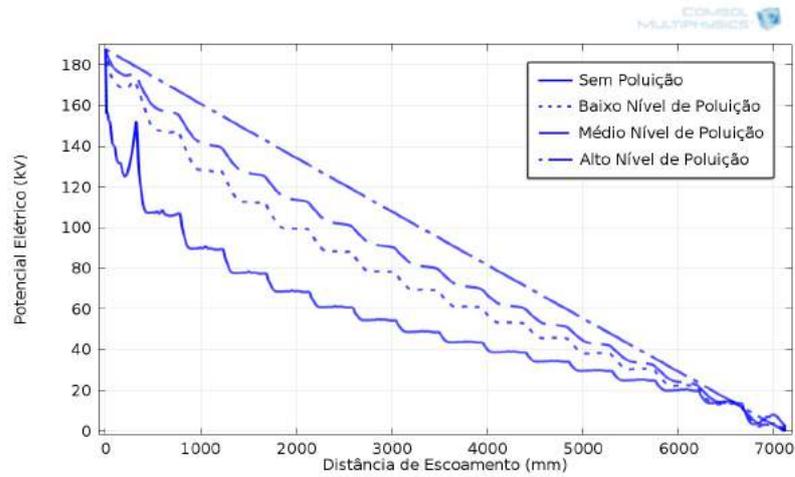
Fonte: próprio autor.

Analisando-se a Tabela 8 percebe-se que os maiores valores de campo elétrico internos na cadeia de isoladores são observados para o nível mais severo de poluição. É possível notar na Figura 62 que no caso onde não há poluição os maiores valores de campo elétrico aparecem nas campânulas dos isoladores mais próximos ao pino onde é aplicado a tensão, e na argamassa do primeiro isolador.

Devido o aumento do nível de poluição a região que se tornam mais crítica, ou seja, com a presença dos maiores níveis de campo elétrico é a argamassa do isolador mais próximo ao lado terra. Nota-se também que o número de regiões com algum nível considerável de campo elétrico aumenta com o aumento da poluição, fragilizando o isolante de tal forma a facilitar o surgimento de descargas que venham a contorná-lo.

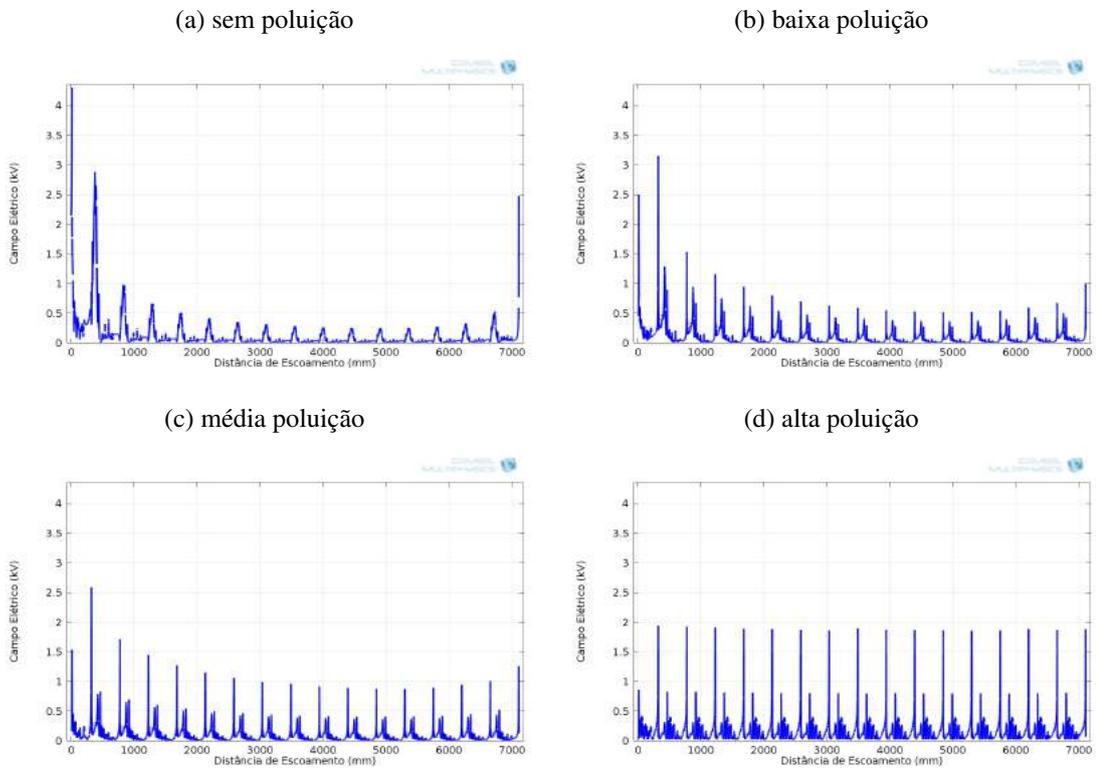
### 4.2.3 Cadeia de Isolador de Vidro Padrão com Dezesesseis Unidades

Figura 63 – Distribuição de potencial, variando-se a poluição em cadeia com dezesseis unidades.



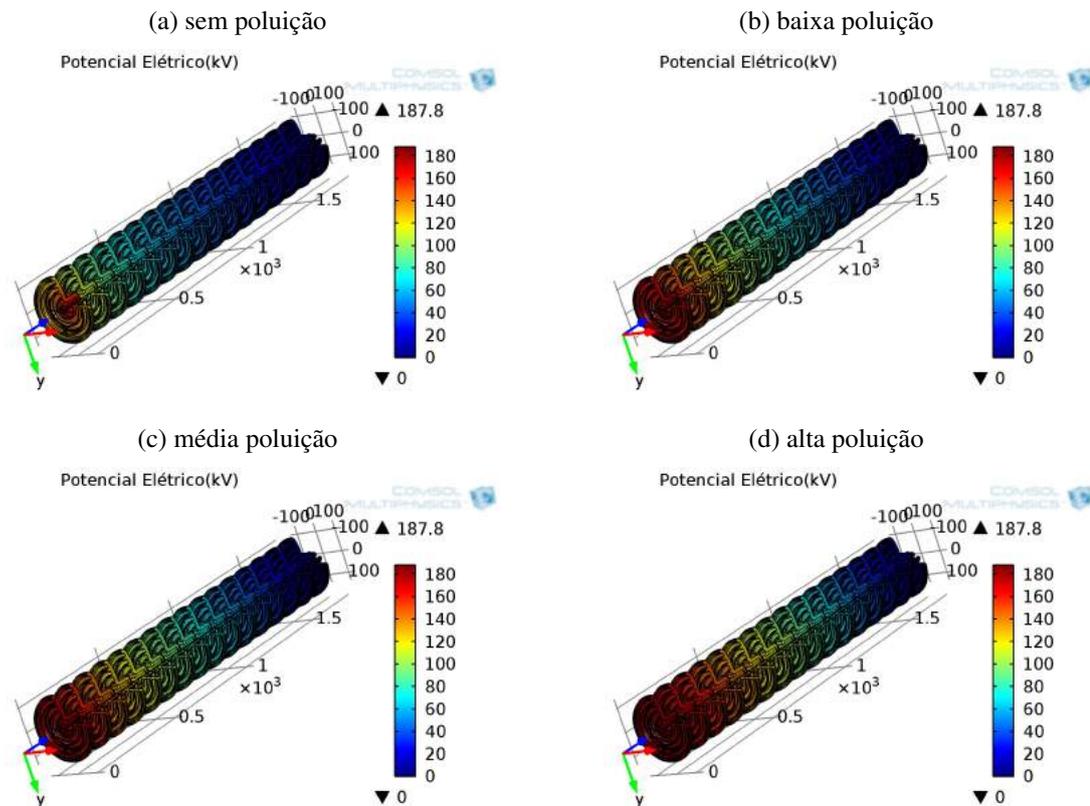
Fonte: próprio Autor.

Figura 64 – Campo elétrico variando-se a poluição em cadeia com dezesseis unidades.



Fonte: próprio autor.

Figura 65 – Potencial elétrico variando-se a poluição em cadeia de dezesseis unidades (em 3D).



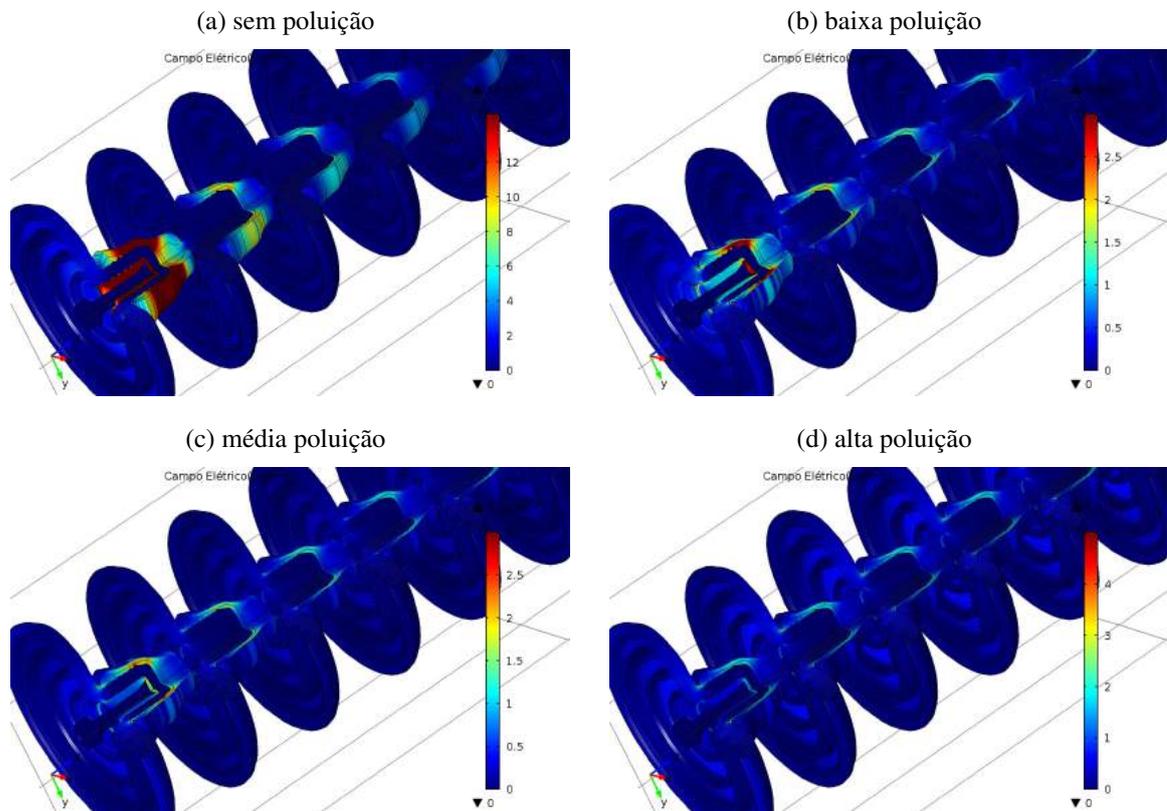
Fonte: próprio autor.

Novamente com o aumento do nível de poluição percebe-se uma uniformização da distribuição de potencial ao longo da superfície da cadeia de dezesseis isoladores como já observado nos casos anteriores. É possível notar o mesmo comportamento encontrado na Figura 59 em que ocorre uma elevação brusca no potencial em  $305\text{mm}$  da distância de escoamento. Este é o ponto onde termina a região de vidro do isolador mais próximo ao pino onde está submetido a tensão.

Observando a distribuição de campo elétrico é possível ver que os níveis mais baixos de poluição apresentam os maiores valores de campo elétrico obtidos, presentes junto ao lado da fase e ao lado da terra. Porém ao longo da cadeia, com exceção do surto provocado em  $305\text{mm}$  devido a aproximação adotada, os valores de campo elétrico são menores para os níveis mais baixos de poluição e vão aumentando com o aumento da severidade da poluição.

Apesar dos valores de campo elétrico máximo encontrados nos níveis de poluição mais severa serem menores, do que os encontrados nos níveis de poluição mais branda, eles estão distribuídos por toda a cadeia aumentando assim a probabilidade de propagação de um arco superficial levando ao contornamento caracterizando um mau funcionamento do isolante.

Figura 66 – Campo elétrico cadeia com dezesseis unidades próximo ao pino (em 3D).



Fonte: próprio autor.

Tabela 9 – Valores máximos de campo elétrico internos para a cadeia de dezesseis isoladores em cada nível de poluição.

Nível de Poluição	Valor máximo de campo elétrico
Sem Poluição	$14,77kV/mm$
Baixo Nível de Poluição	$5,98kV/mm$
Nível Intermediário de Poluição	$3,50kV/mm$
Nível Elevado de Poluição	$5,01kV/mm$

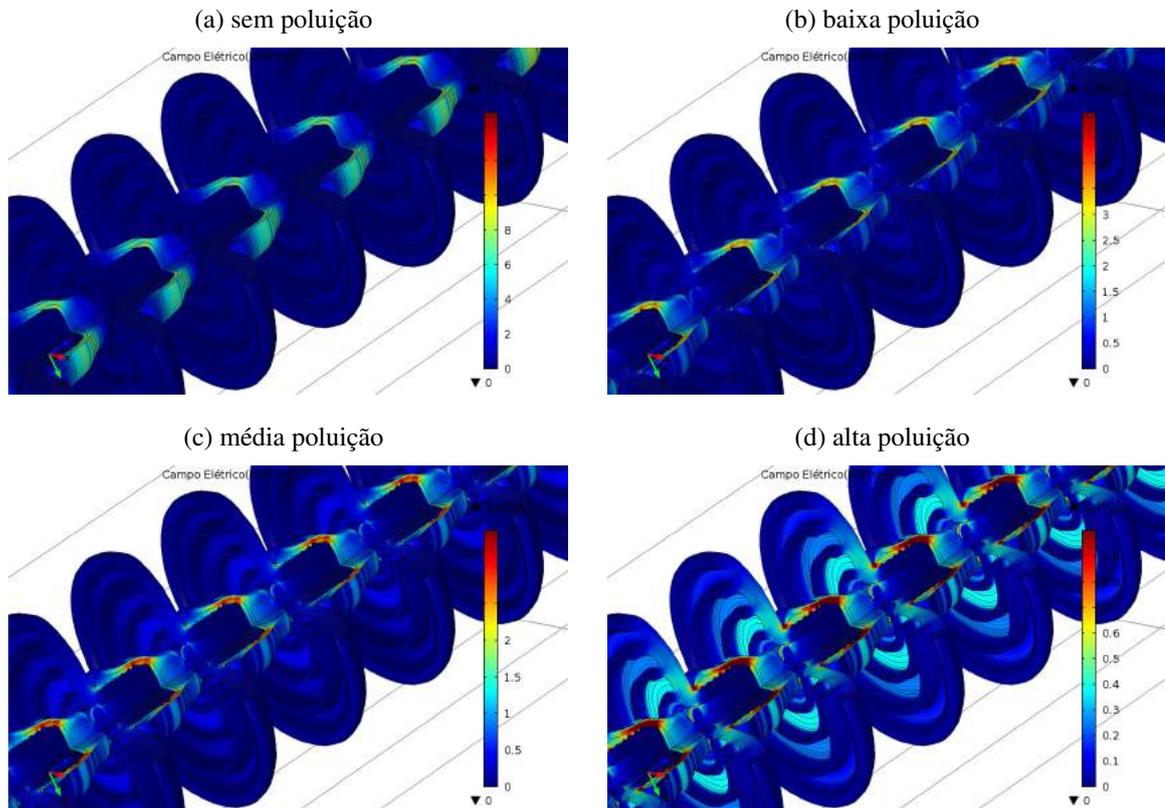
Fonte: próprio autor.

Para obtenção da Figura 66 considerou-se a escala de  $0kV/mm$ , sendo o azul mais escuro, e saturou-se no valor de  $3kV/mm$  sendo o vermelho escuro. Escolheu-se essa faixa de valores para dar uma melhor noção da diferença do comportamento do campo elétrico dentro da peça para os diferentes níveis de poluição.

Assim como observado na Figura 64 nota-se que para os valores mais baixos de poluição a presença de campos mais intensos ocorre junto ao pino, enquanto para valores mais severos de

poluição os valores de campo elétrico são menos intensos junto ao pino porém mais intensos ao longo da cadeia quando comparado aos encontrados para poluições mais baixas como mostrado na Figura 67.

Figura 67 – Campo elétrico cadeia com dezesseis unidades em torno da sexta unidade considerando o sentido terra para potencial (em 3D).



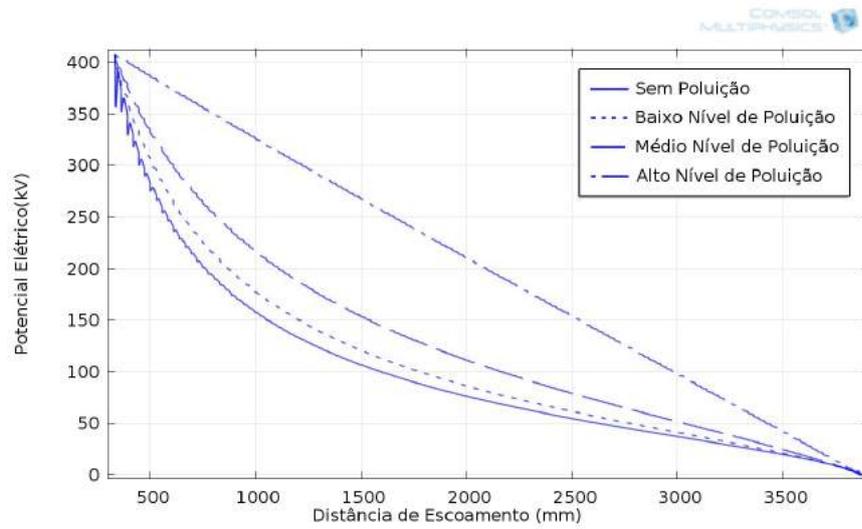
Fonte: próprio autor.

Para obtenção da Figura 67 considerou-se a escala de  $0kV/mm$ , sendo o azul mais escuro, e saturou-se no valor de  $1kV/mm$  sendo o vermelho escuro. Escolheu-se essa faixa de valores para dar uma melhor noção da diferença do comportamento do campo elétrico dentro da peça para os diferentes níveis de poluição.

#### 4.2.4 Cadeia de Isolador Polimérico de Alta Tensão

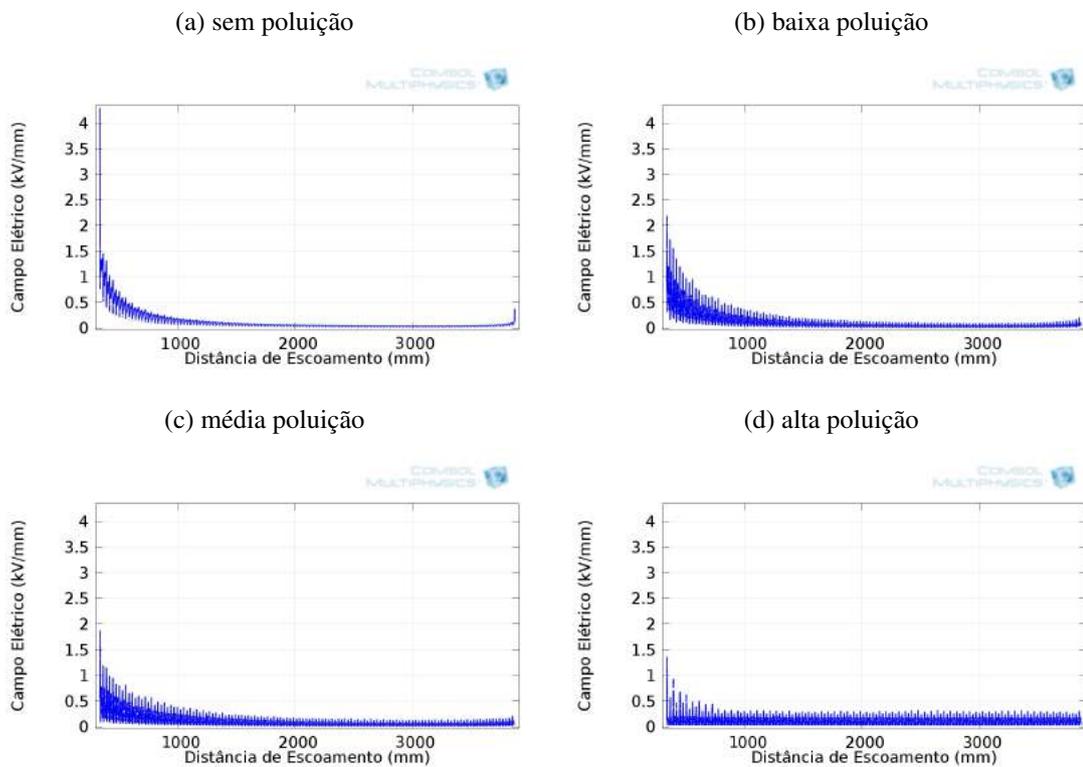
Devido ao fato do isolador polimérico estudado possuir dimensões geométricas elevadas e estar submetido a um alto nível de tensão o comportamento da distribuição de potencial e campo elétrico obtidos assemelham-se aos da cadeia de isoladores de vidro com dezesseis unidades, como pode ser visto nas Figuras 68, 69, 70, 71 e 72. Os valores de campo elétrico encontrados para o isolador polimérico são mais uniformes por se tratar de uma única peça e basicamente sua superfície ser composto apenas por um único material.

Figura 68 – Distribuição de potencial em isolador polimérico.



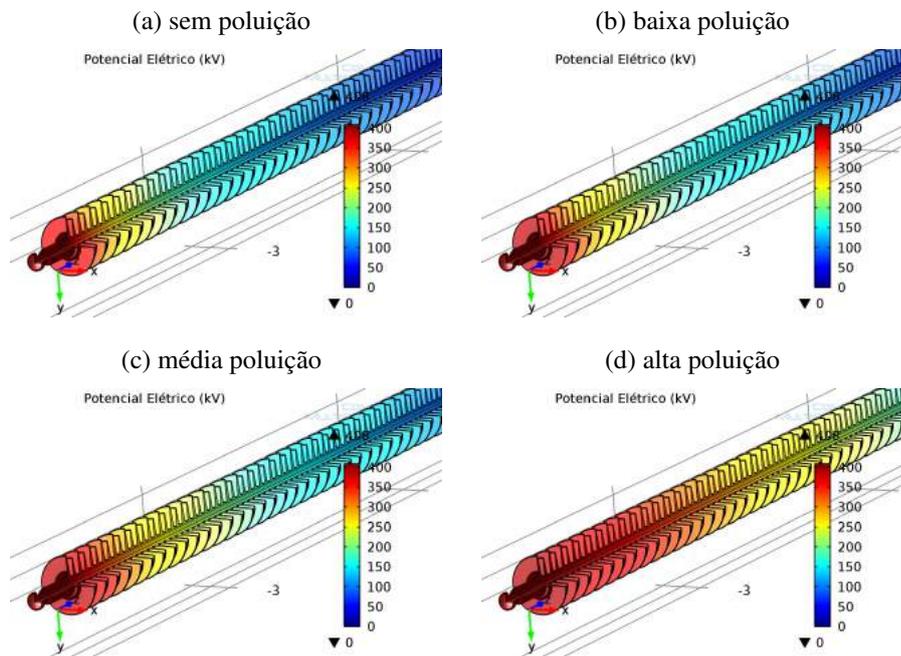
Fonte: próprio Autor.

Figura 69 – Campo elétrico variando-se a poluição em isolador polimérico.



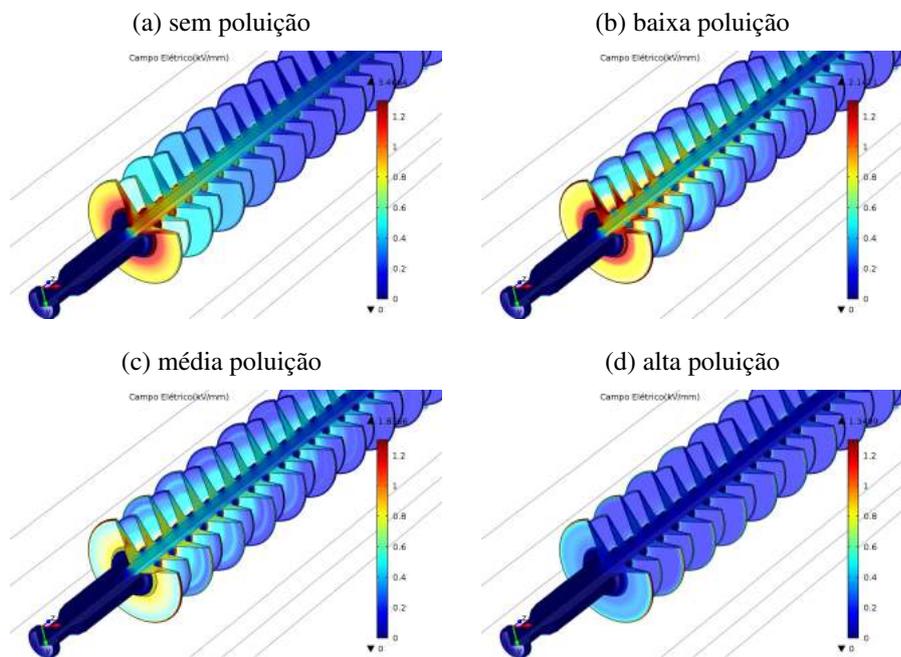
Fonte: próprio autor.

Figura 70 – Potencial elétrico variando-se a poluição em isolador polimérico (em 3D).



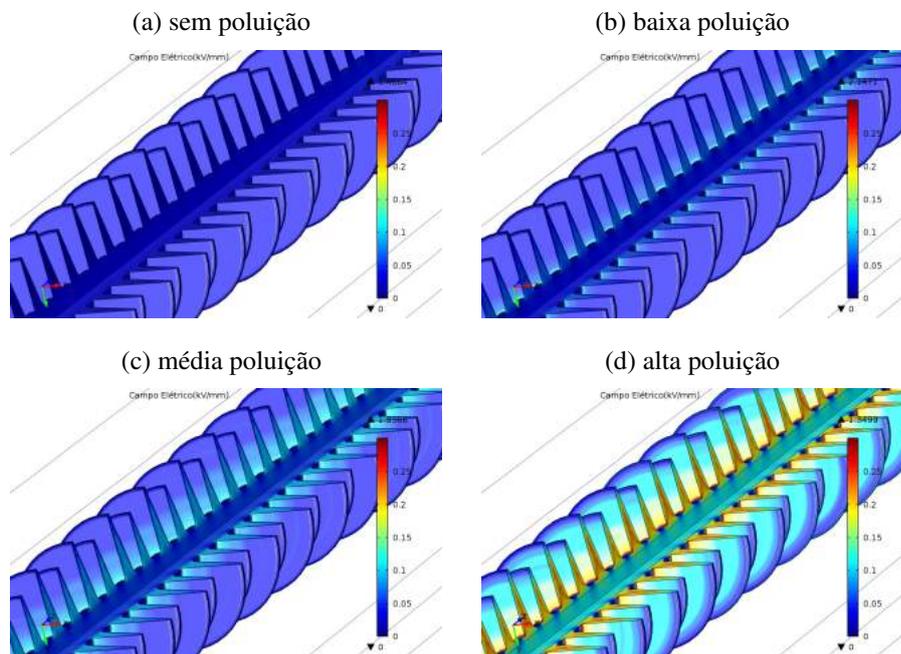
Fonte: próprio autor.

Figura 71 – Campo elétrico variando a poluição em isolador polimérico junto ao pino (em 3D).



Fonte: próprio autor.

Figura 72 – Campo elétrico variando a poluição em isolador polimérico do meio para o lado terra (em 3D).



Fonte: próprio autor.

Tabela 10 – Valores máximos de campo elétrico internos para isolador polimérico em cada nível de poluição.

Nível de Poluição	Valor máximo de campo elétrico
Sem Poluição	$3,46kV/mm$
Baixo Nível de Poluição	$2,15kV/mm$
Nível Intermediário de Poluição	$1,83kV/mm$
Nível Elevado de Poluição	$1,43kV/mm$

Fonte: próprio autor.

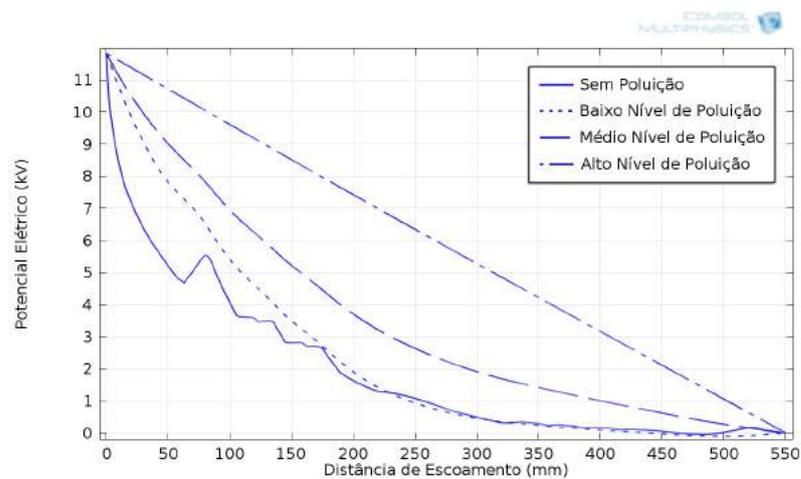
Para obtenção da Figura 71 considerou-se a escala de  $0kV/mm$ , sendo o azul mais escuro, e saturou-se no valor de  $1.3kV/mm$  sendo o vermelho escuro, já para a Figura 72 a escala considerada foi de  $0kV/mm$ , sendo o azul mais escuro, e saturou-se no valor de  $0.3kV/mm$  sendo o vermelho escuro. Escolheu-se essa faixa de valores para dar uma melhor noção da diferença do comportamento do campo elétrico dentro da peça para os diferentes níveis de poluição.

### 4.2.5 Espaçador de Rede de Distribuição

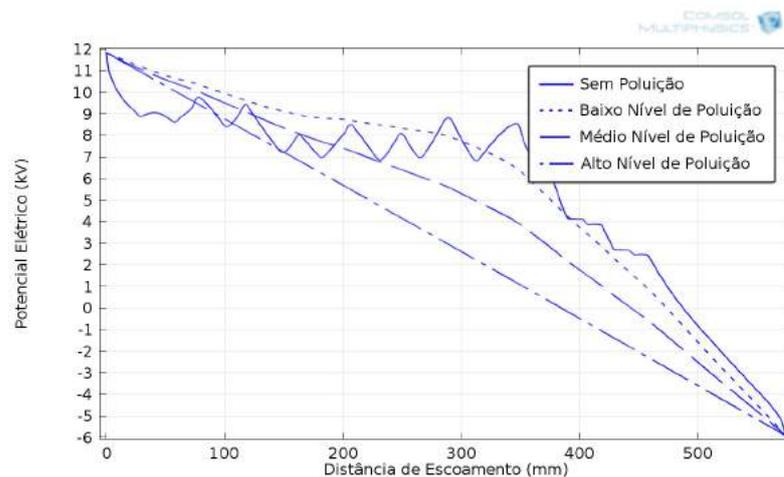
Por questões de praticidade e facilidade de visualização, apenas os gráficos que exibem os resultados em superfície são exibidos. Os estudos são apresentados nos instantes em que cada uma das fases atinge o valor de pico, ou seja, seu valor máximo da fase com relação a terra que é de  $11.26kV$ , lembrando-se que as fases apresentam-se defasadas de 120 graus entre si.

Figura 73 – Exemplos de distribuição de potencial em setores do espaçador no instante em que a fase A apresenta-se no valor de pico.

(a) Fase A-Terra



(b) Fase A - Fase B

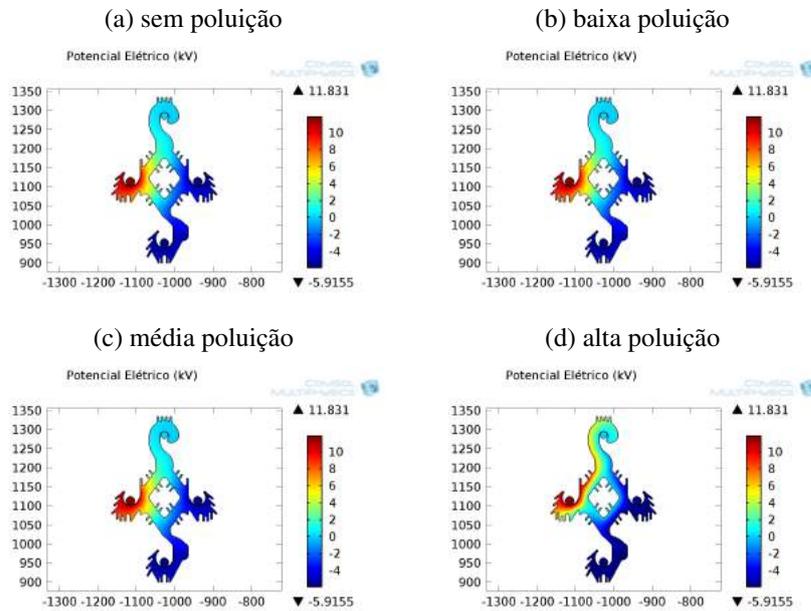


Fonte: próprio autor.

Para os outros setores, Fase C para a Fase B e Fase C para o Terra, os resultados são semelhantes e estão de acordo com o comportamento esperado. Assim como mostrado na Figura 73 onde ocorre a uniformização da distribuição de potencial à medida que a poluição aumenta.

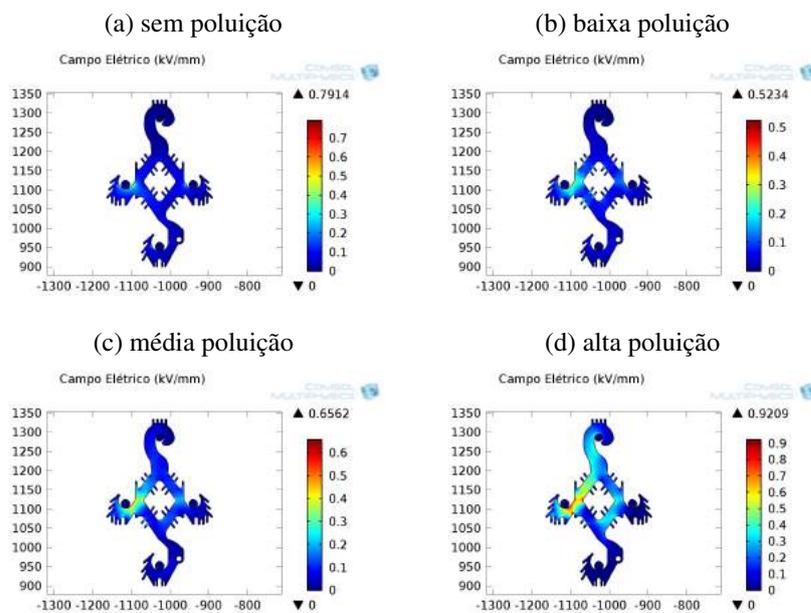
4.2.5.1 Instante em que a Fase A apresenta o valor de pico

Figura 74 – Distribuição de potencial no espaçador. (Pico da fase A)



Fonte: próprio autor.

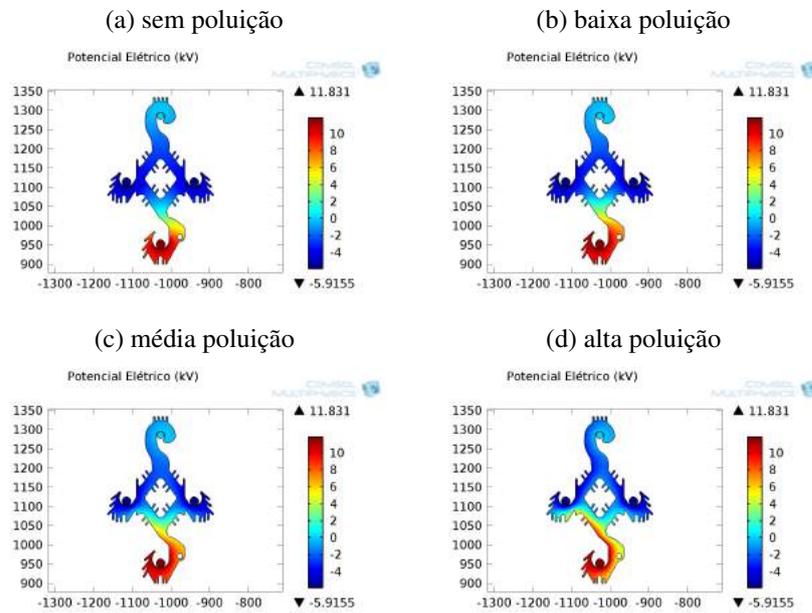
Figura 75 – Distribuição de campo elétrico no espaçador (Pico da fase A).



Fonte: próprio autor.

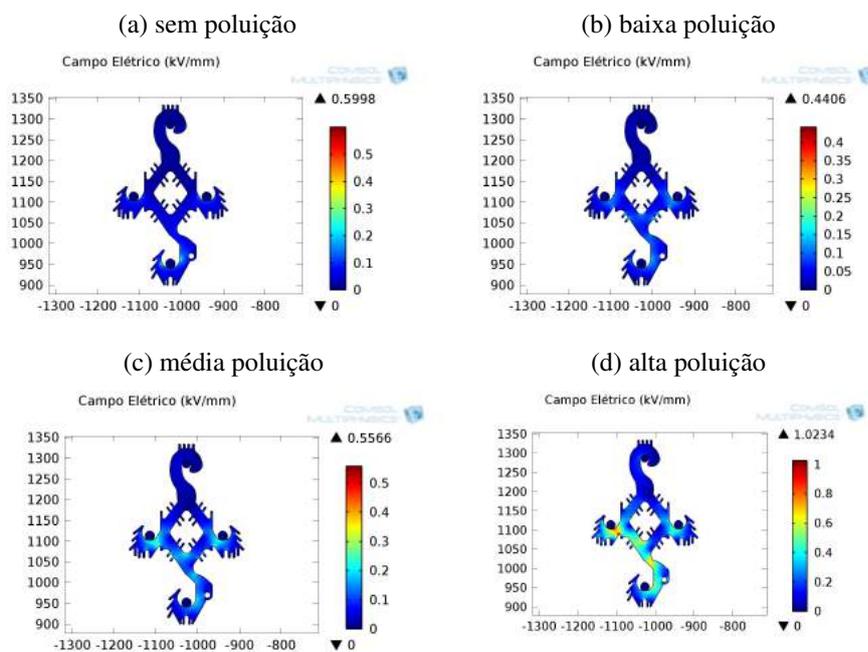
4.2.5.2 Instante em que a Fase B apresenta o valor de pico

Figura 76 – Distribuição de potencial no espaçador (Pico da fase B).



Fonte: próprio autor.

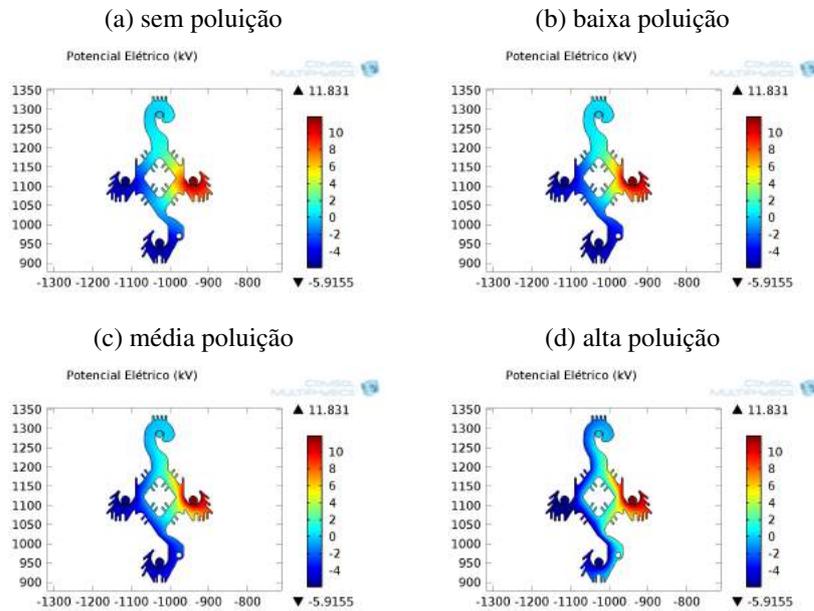
Figura 77 – Distribuição de campo elétrico no espaçador (Pico da fase B).



Fonte: próprio autor.

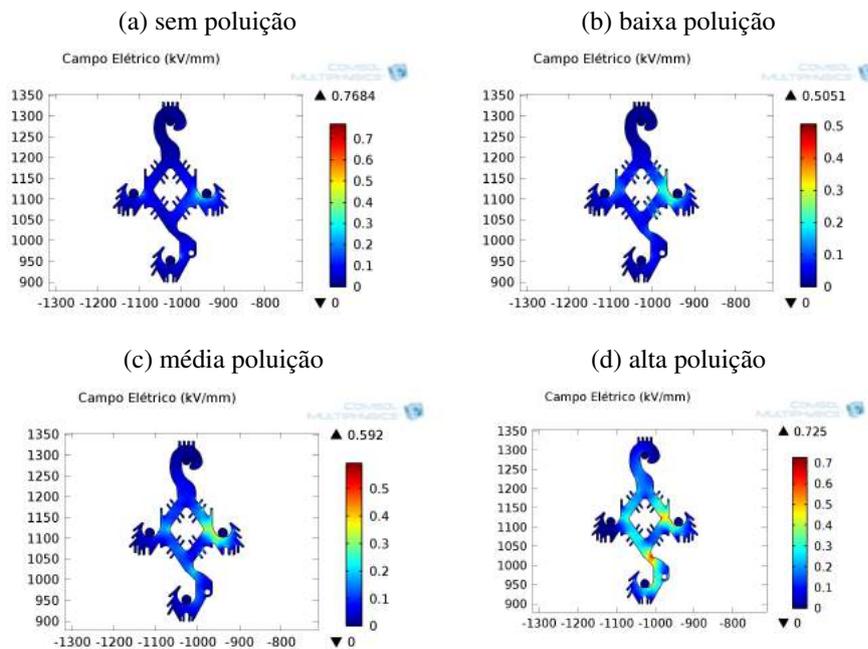
4.2.5.3 Instante em que a Fase C apresenta o valor de pico

Figura 78 – Distribuição de potencial elétrico no espaçador (Pico da fase C).



Fonte: próprio autor.

Figura 79 – Distribuição de campo elétrico no espaçador (Pico da fase C).



Fonte: próprio autor.

Nas Figuras 74, 76 e 78 verifica-se o comportamento esperado para a distribuição de potencial, independente da fase que está no valor de pico a distribuição de potencial tende a se uniformizar com o aumento do nível de poluição.

Para obtenção das Figuras 75, 77 e 79 considerou-se a escala de  $0kV/mm$ , sendo o azul mais escuro, e saturou-se no valor de  $0.6kV/mm$ , que é o valor máximo encontrado quando a fase B esta no pico, sendo o vermelho escuro. Escolheu-se essa faixa de valores para dar uma melhor noção da diferença do comportamento do campo elétrico dentro da peça para os diferentes níveis de poluição.

Analisando as Figuras 75, 77 e 79 percebe-se que o espaçador sofre mais com o aumento do nível de poluição do que os outros objetos estudados. Isso ocorre devido as dimensões da sua geometria e ao fato de na mesma peça estarem presentes quatro níveis diferentes de potencial. Este comportamento leva a crer que a poluição, mesmo que apenas na superfície do acessório, pode levar a estresses internos e degradação dos mesmos.

### 4.3 Conclusões dos Resultados e das Análises

É possível perceber, em todos os casos, que quanto maior o nível da condutividade da camada, ou seja, quanto maior o nível da poluição depositada, maior a uniformidade da distribuição de potencial apresentada na superfície do isolante. Este fenômeno pode ser constatado pelo comportamento que a curva de distribuição de potencial adquire, com o aumento da poluição, chegando a ser linear no nível mais elevado. Trata-se de um comportamento esperado, visto que com o aumento do nível de poluição, a característica resistiva da camada condutiva se torna preponderante em relação a característica capacitiva natural do acessório isolante.

Com relação a distribuição de campo elétrico, é possível notar que quanto maior o nível da poluição depositada, maior será a quantidade de picos ao longo da superfície dos acessórios isolantes em todos os casos. Porém, é importante salientar que os picos com maiores valores normalmente ocorrem no estado em que os isolantes não se encontram poluídos, como exibido na Tabela 11, mesmo que a quantidade de picos seja bem reduzida. A explicação para isso se baseia no fato das maiores variações de potencial estarem presentes justamente com o acessório limpo, e presentes nos terminais onde estão as condições de contorno que modelam as tensões aplicadas, além das interfaces entre materiais diferentes. Normalmente, são estas as regiões onde apresentam estes valores de pico elevados, é conhecido que o campo elétrico pode ser obtido pelo negativo da variação de potencial, como mostrado na Expressão 3 da Seção 2.3.

Isto explica o aumento da quantidade de picos, visto que, com o acessório limpo, as maiores variações de potencial se encontram nos terminais enquanto ao longo da peça a variação de potencial é menor do que nos acessórios poluídos, as variações associadas a geometria e aos encontros de materiais diferentes, vidro e argamassa por exemplo, provocam o surgimento desses

Tabela 11 – Valores máximos de campo elétrico na superfície de cada acessório variando-se o nível de poluição.

<b>Acessório</b>	<b>Sem</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>
Isolador Padrão	5,53kV/mm	4,34kV/mm	5,21kV/mm	5,71kV/mm
Cadeia com 3 Unidades	3,38kV/mm	1,78kV/mm	2,06kV/mm	2,79kV/mm
Cadeia com 16 Unidades	4,30kV/mm	3,15kV/mm	2,59kV/mm	1,94kV/mm
Isolador Polimérico	4,37kV/mm	2,42kV/mm	2,06kV/mm	1,50kV/mm
Espaçador (Fase A no pico)	0,79kV/mm	0,52kV/mm	0,65kV/mm	0,92kV/mm
Espaçador (Fase B no pico)	0,60kV/mm	0,44kV/mm	0,56kV/mm	1,02kV/mm
Espaçador (Fase C no pico)	0,77kV/mm	0,50kV/mm	0,59kV/mm	0,72kV/mm

Fonte: próprio autor.

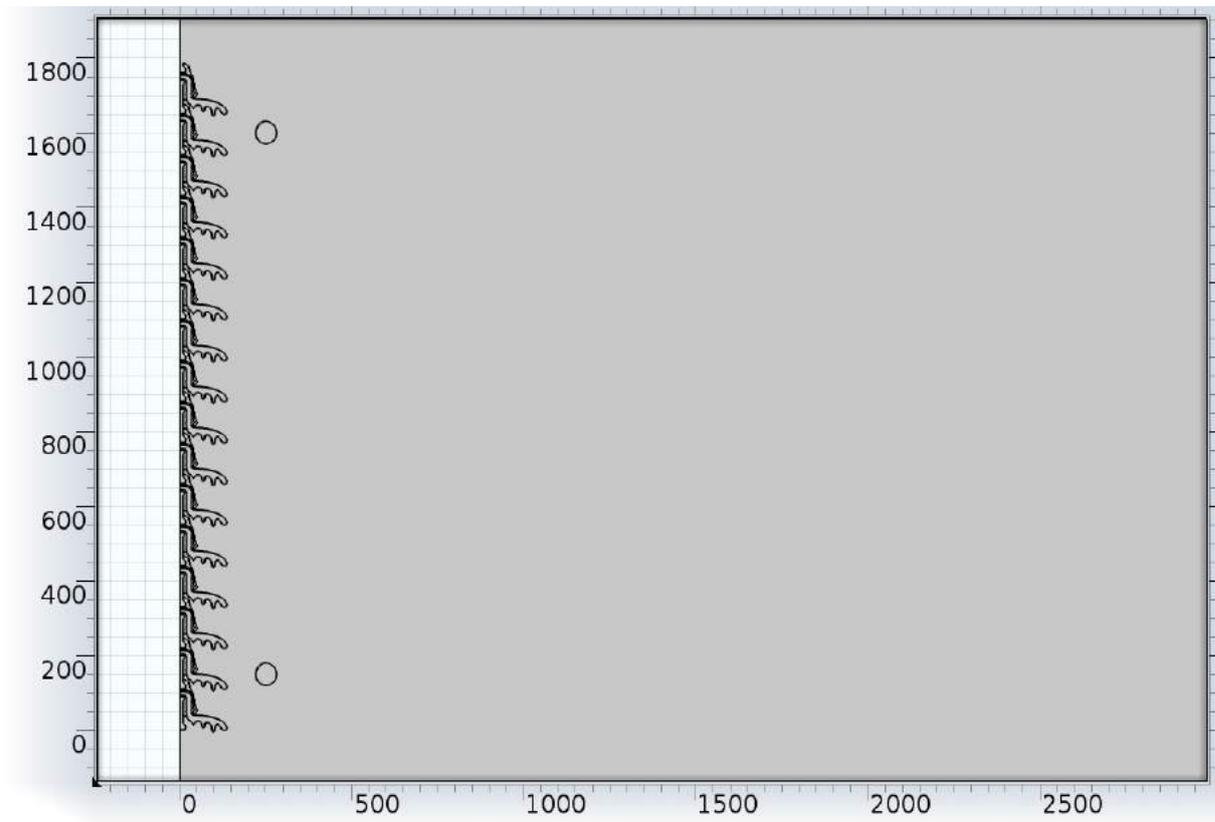
picos. Pode-se constatar, comparando os perfis de campo elétrico apresentados para os diferentes níveis de poluição, que os picos basicamente são sempre nos mesmos pontos da distância de escoamento, porém esses picos se intensificam à medida em que se eleva o nível de poluição. Os pontos onde se presenciam picos de campo elétrico são fortes candidatos a ocorrência de descargas superficiais a partir do momento em que esses picos venham a superar a resistência dielétrica do ar.

O aspecto de que a distribuição de potencial vai se tornando uniforme à medida em que o nível da poluição aumenta pode ser erroneamente visto como algo bom. De fato, a distribuição uniforme do potencial é interessante e buscada através dos chamados anéis equalizadores, porém existem outros fatores que devem ser analisados quando se configura o surgimento de uma camada condutiva sobre a superfície do isolante.

O primeiro deles que pode ser considerado é o aumento na corrente de fuga causador de possíveis degradações ao dielétrico e do aumento de perdas no sistema. Outro aspecto a ser analisado é que a presença dos anéis equalizadores provoca o surgimento de picos de campo elétrico na superfície do isolador, porém de intensidades inferiores, em sua maioria, a aquelas encontradas na presença de poluição, e quando de maior intensidade, pouco maior como é exibido nas Figuras 64 e 82. O comparativo da distribuição de potencial com e sem os anéis equalizadores para a cadeia limpa são exibidos nas Figuras 82.

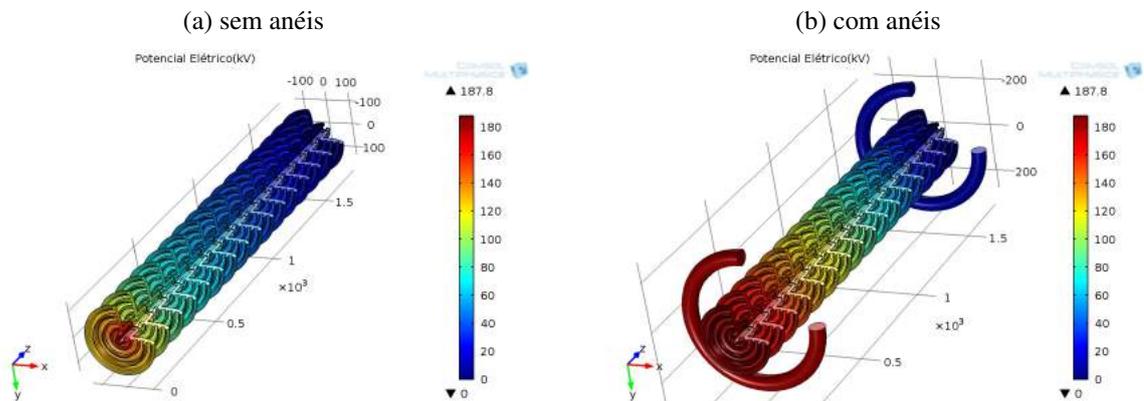
Lembrando que os anéis equalizadores utilizados foram simples, sem nenhum estudo de melhor posicionamento nem de geometria otimizada para utilização dos mesmos. Apenas ferragens modeladas como circunferências em duas dimensões colocadas para verificar como se comporta o campo elétrico utilizando outra maneira de uniformização da distribuição de potencial e realizar a comparação. Essas circunferências possuem 30mm de raio e estão posicionadas como mostrado na Figura 80. Lembrando que na Figura 81 a visualização é uma rotação em 270 graus da geometria em 2D.

Figura 80 – Geometria da cadeia de dezesseis unidades com anéis equalizadores.



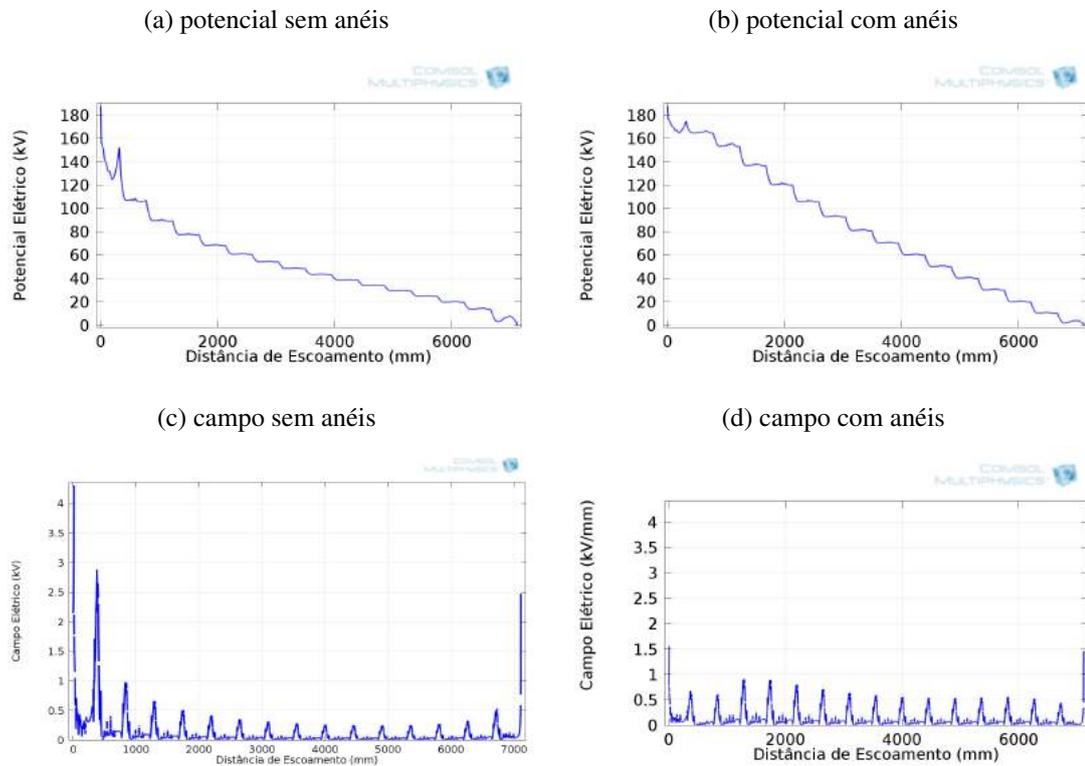
Fonte: próprio autor.

Figura 81 – Distribuição de potencial e campo elétrico na cadeia de isolador de vidro com dezesseis unidades, com e sem anel equalizador para a cadeia sem poluição (em 3D).



Fonte: próprio autor.

Figura 82 – Distribuição de potencial e campo elétrico na cadeia de isolador de vidro com dezesseis unidades, com e sem anel equalizador para a cadeia sem poluição.



Fonte: próprio autor.

Neste capítulo foram apresentados os resultados e análises referentes aos dispositivos na presença de poluição. No capítulo seguinte apresentar-se-ão as conclusões do trabalho e as sugestões de possíveis trabalhos oriundos desta dissertação.

## 5 Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho tem como objetivo a aplicação da consagrada técnica de elementos finitos para obtenção do comportamento da distribuição de potencial e campo elétrico em acessórios isolantes variando-se os níveis de poluição. Foram estudados isoladores do tipo suspensão, compostos de vidro e material polimérico com cadeias de diferentes níveis de tensão de operação, bem como espaçadores de redes de distribuição.

Pode-se concluir que a técnica aplicada funciona como esperado e com resultados satisfatórios para diferentes tipos de isolantes de diversos materiais e de geometrias variadas, sendo necessária apenas a definição das permissividades dos materiais envolvidos e dos parâmetros referentes a camada condutiva que modela a presença de poluição em conjunto com a umidade. O modelo pode ser facilmente aplicado em outros tipos de isoladores, o tipo pino e o tipo pilar por exemplo, assim como isoladores de porcelana, bastando criar a geometria necessária para cada caso com as respectivas permissividades. A camada condutiva pode ser modelada da mesma maneira que foi realizada neste estudo.

A vantagem de não ser necessária a representação gráfica da camada de poluição depositada é de fundamental importância pois poupa recursos computacionais, visto que o número de elementos necessários para representar esta fina camada de maneira fiel seria demasiadamente elevado e isto se agravaria ainda mais em geometrias grandes tais como as cadeias de isoladores de alta tensão, levando a um tempo de simulação e custos computacionais maiores. Outro aspecto positivo é que o tempo necessário para criação da geometria utilizada na simulação é reduzido, já que não se investiria tempo desenhando a camada condutiva para cada geometria estudada, e sim apenas definindo-a como uma condição de contorno. Além de que se, durante o estudo, for necessário verificar a influência da espessura da camada de poluição no modelo para diferentes valores de espessura, seria demasiadamente trabalhoso, pois precisaria desenhar diferentes camadas com variadas espessuras, e no modo como foi apresentado nesta dissertação basta alterar um dos parâmetros que modela a camada.

Apesar dos resultados obtidos, é necessário a construção de um modelo mais preciso com uma geometria mais próxima do que ocorre quando o isolante esta em operação. Uma das maneiras possíveis é a confecção de um cenário em três dimensões dentro do *COMSOL Multiphysics* que leve em conta o condutor utilizado, a quantidade de gemações, caso seja geminado, as ferragens de conexão da cadeia aos condutores e a estrutura, e a torre propriamente dita; Assim os resultados que fossem obtidos seriam mais precisos e estudos como a influência da distância da torre, ou a contribuição do arranjo dos condutores na distribuição de potencial e campo elétrico em cadeias de isoladores contaminados, seria mais preciso e condizente com o que acontece na natureza.

O estudo da influência da poluição em dielétricos reveste-se de fundamental importância no contexto de sistemas elétricos, visto que esse fenômeno causa perdas operacionais e transtornos. Através de estudos e pesquisas pode-se minimizá-los trazendo maior confiabilidade aos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, bem como a redução de perdas.

## 5.1 Trabalhos Futuros

Em seguida, são enumeradas algumas sugestões de trabalhos futuros relacionadas com o tema desta dissertação:

1. Realização das simulações em um ambiente tridimensional, levando em conta outros elementos como as ferragens de conexão, condutores e a própria torre sob influência da poluição;
2. investigação do comportamento das grandezas elétricas, através de simulações considerando a poluição de maneira não-uniforme, variando os valores de  $d$  e  $\sigma_v$  em determinados trechos dos acessórios isolantes;
3. estudo através de simulações com outros pacotes físicos presentes no COMSOL, para determinação de pontos quentes (pacote de transferência de calor) e de determinação de dados como a corrente que surge no isolante;
4. tentar elaborar um modelo semelhante mas não para poluição depositada e sim com a presença de névoa salina;
5. aumentar o modelo de tal forma que seja possível simular o comportamento de uma estrutura por completo contrapeso de aterramento, todas as fases e um maior detalhe da torre;
6. desenvolvimento de modelo que represente o comportamento dinâmico da distribuição de tensão, quando da existência de descargas superficiais em trecho da cadeia de isoladores.

## Referências

- ANDERSON, Q. W. Finite element solution of complex potential electric fields. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, v. 96, p. 156–1160, 1977. Citado na página 63.
- 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 25 e 64.
- AVILA, J. A. J. *Introdução ao Método dos Elementos Finitos*. São João Del-Rei MG, Brasil.: Departamento de Matemática e Estatística - DEMAT, UFSJ, 2010. Citado na página 30.
- 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 25.
- 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 24.
- BASTOS, J. P.; SADOWSKI, N. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. New York, USA.: Marcel Dekker, Inc, 2003. Citado na página 31.
- 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 5 vezes nas páginas 29, 33, 38, 40 e 44.
- BEZERRA, J. M. B. *Prática 1: Análise da Distribuição da Tensão ao Longo da Superfície do Isolador – Aplicação de Técnicas de Elementos Finitos*. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 44.
- 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 25 e 26.
- COMSOL. *COMSOL Multiphysics User's Guide*. Boston, Estados Unidos, 2012. Citado na página 37.
- 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 3 vezes nas páginas 27, 28 e 30.
- FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*. 1. ed. Itajubá: LTC/EFEI, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- GERMER. *Catálogo Técnico de Isoladores Germer*. 2014. Disponível em: <[http://www.germerisoladores.com.br/Imgs/Germer\\_Catalogo\\_2014.pdf](http://www.germerisoladores.com.br/Imgs/Germer_Catalogo_2014.pdf)>. Acesso em: 1 maio 2016. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. Outdoor insulators. *Phoenix, Arizona: Ravi S. Gorur, Inc.*, 1999. Citado na página 20.

GUEDES, C. P. G. *Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Julho 2015. Citado na página 21.

IEC. *Guide for the Selection of Insulators in Respects of Polluted Conditions*. Genebra, Suíça, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

PLP. *Catálogo de Espaçadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.plp.com.br/site/catalogos/item/566-espacador-losangular-com-garras-15-kv-15-kv-e-35-kv>>. Acesso em: 1 junho 2016. Citado na página 24.

PROJECT-EHV. *EHV Transmission Line Reference Book*. Nova Iorque, NY, EUA.: [s.n.], 1968. Citado 6 vezes nas páginas 24, 26, 27, 28, 30 e 44.

PUC-MINAS. *Apostila de Métodos Numéricos*. 20–. 109 p. Disponível em: <<http://www.matematica.pucminas.br/lcn/apostilas/ApostiladeElementosFinitos.pdf>>. Acesso em: 1 maio 2016. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

RASOLONJANAHARY, J. L.; KRAENBUHL, L.; NICOLAS, A. Computation of electric fields and potential on polluted insulators using a boundary element method. *IEEE Trans. on Magnetics*, v. 28, p. 1473–1476, 1992. Citado na página 63.

RIBEIRO, F. L. B. *Introdução ao Método dos Elementos Finitos*. 2004. Notas de Aula do Professor. Citado na página 30.

RODURFLEX. *The History of RODURFLEX – Quite a Long Story Covering More Than 3 Decades*. 2006. Disponível em: <[https://www.lappinsulators.com/fileadmin/user\\_upload/RodurflexCatalog.pdf](https://www.lappinsulators.com/fileadmin/user_upload/RodurflexCatalog.pdf)>. Acesso em: 1 junho 2016. Citado na página 21.

ROJAS, J. W. J. *Apostila Básica de AutoCAD*. 2014. Disponível em: <[https://moodle.unipampa.edu.br/pluginfile.php/145320/mod\\_resource/content/1/01-ApostilaBÁSICAdeCADparaGEOLOGIA.pdf](https://moodle.unipampa.edu.br/pluginfile.php/145320/mod_resource/content/1/01-ApostilaBÁSICAdeCADparaGEOLOGIA.pdf)>. Acesso em: 1 junho 2016. Citado na página 36.

SGD. *Catálogo Técnico de SGD Insulators*. 2015. Disponível em: <[http://www.elos.com.br/downloads/28.SGD\\_insulators.pdf](http://www.elos.com.br/downloads/28.SGD_insulators.pdf)>. Acesso em: 1 maio 2016. Citado na página 23.

SILVA, G. C. *Comportamento elétrico e dielétrico de cabos de potência extrudados utilizados em redes de distribuição de energia elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — UFPR, Universidade Federal do Paraná, 2000. Citado na página 28.

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 2 vezes nas páginas 30 e 31.

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 25.

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 4 vezes nas páginas 25, 63, 64 e 66.

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 7 vezes nas páginas 34, 35, 39, 40, 57, 58 e 60.

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 2 vezes nas páginas 26 e 53.