



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

DIEGO SOARES LOPES

**MODELAGEM PARA AFERIÇÃO DINÂMICA DA DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL  
AO LONGO DE CADEIAS DE ISOLADORES POLIMÉRICAS**

Recife

2021

DIEGO SOARES LOPES

**MODELAGEM PARA AFERIÇÃO DINÂMICA DA DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL  
AO LONGO DE CADEIAS DE ISOLADORES POLIMÉRICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Engenharia Elétrica.

**Área de concentração:** Processamento de Energia.

**Orientador:** Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.

Recife

2021



DIEGO SOARES LOPES

**MODELAGEM PARA AFERIÇÃO DINÂMICA DA DISTRIBUIÇÃO DE  
POTENCIAL AO LONGO DE CADEIAS DE ISOLADORES POLIMÉRICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Processamento de Energia.

Aprovada em: 26/07/2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Sergipe

---

Prof. Dr. Edson Guedes da Costa (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Campina Grande

---

Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes (Examinador Externo)  
Universidade Federal de Minas Gerais

Dedico este trabalho a todos os meus professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar minha mais profunda gratidão a Deus, não o associando com nenhuma religião específica, que me deu o dom da vida, bem como me concedeu a capacidade de errar, perseverar, aprender, corrigir e evoluir ao longo de toda jornada acadêmica até o momento.

Agradeço à minha mãe, Maria Arlene Lopes, que sempre esteve ao meu lado desde, literalmente, os primeiros passos da vida até o dia de hoje, que me incentivou a estudar e sempre me apoiou, creio que sem ela nada do que conquistei seria possível. Ao meu pai, Inacio Soares da Silva, que, apesar da distância, sempre fez o possível para ser um pai presente em minha vida e me auxiliar quando precisei. Aos meus irmãos Danilo Carvalho, Idayane Gonçalves Soares e em especial ao meu irmão Thiago Soares Lopes, por estarem presentes nos momentos bons e ruins ao longo da vida. À minha namorada Juliana Karol de Oliveira Falcão, por ser essa pessoa sensacional, que me acolheu em sua vida e fez da minha seu lar, com suas poesias e seu sorriso deixa minha vida mais leve e feliz.

Gostaria de agradecer a todos os professores que passaram pela minha vida, por me guiarem através do conhecimento necessário para chegar ao nível acadêmico em que me encontro hoje, com destaque aos professores da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande), instituição na qual me graduei em engenharia elétrica, e aos professores da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), os quais me receberam como aluno de mestrado e por fim de doutorado. Em especial agradeço ao meu orientador, José Maurício de Barros Bezerra, por todas as discussões pertinentes, todo o auxílio prestado e correções realizadas, sua contribuição para este trabalho é inegável.

A todos os meus amigos, em especial aqueles que fiz no GPTD (Grupo de Pesquisa de Transmissão e Distribuição) da UFPE, e que estiveram em contato direto com o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço a Alexandro Xavier, Alexsandro Aleixo, João Marcus, Márcio Silva, Suelen Holder e ao professor Zanoni Dueire pela companhia e pelos conselhos apresentados no desenvolvimento do trabalho. Em especial agradeço ao Ayrlw Maynyson, ao Victor Andrade, ao Samuel Honorato e ao técnico de laboratório Marcos Almeida, por me ajudarem na realização de experimentos e manuseio dos equipamentos.

Por fim agradeço ao PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Elétrica) e a CAPES ( Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo subsídio a esta pesquisa através do fornecimento de bolsa pelo período de dois anos. Ao IFPE (Instituto Federal de Pernambuco), instituição em que trabalho atualmente, pela compreensão ao permitir a realização concomitante entre a atividade de ensino e da pesquisa de doutorado.

A todos vocês os meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Esta pesquisa propicia as bases para o desenvolvimento de uma nova técnica de monitoração em isoladores poliméricos através do comportamento da distribuição de potencial durante a ocorrência de descargas superficiais. Para este fim, é desenvolvido um estudo para determinar quais dois pontos na superfície do isolador indicam a ocorrência de um arco superficial de um comprimento crítico, através da diferença de potencial elétrico entre esses dois pontos. O modo de determinação dos pontos pode ser aplicado para qualquer isolador polimérico, desde que sejam conhecidas a tensão aplicada ao isolador e sua distância de escoamento. Sucessivas simulações foram realizadas com o objetivo de testar os pontos escolhidos e verificar se a diferença de potencial entre eles pode ser utilizado como indicativo da ocorrência de descargas superficiais. Tais simulações foram desenvolvidas aplicando o método dos elementos finitos, em que foi considerado um isolador em três dimensões, na presença de apenas um caminho condutivo em sua superfície e com condutividade não-uniforme. Os valores das condutividades utilizadas possuem correspondência com níveis encontrados na natureza, bem como estão relacionados a um nível de depósito de sal equivalente. Os resultados são promissores, considerando que o método apresenta uma alta taxa de sucesso para a maioria dos cenários estudados.

**Palavras-chave:** estudo computacional; distribuição de potencial; isoladores poliméricos; monitoração; descargas superficiais; poluição.

## ABSTRACT

This research provides the basis for the development of a new monitoring technique in polymeric insulators through the behavior of the potential distribution during the occurrence of surface discharges. For this purpose, a study is developed to determine which two points on the insulator surface indicate the occurrence of a surface arc of a critical length, through the difference in electrical potential between these two points. The method applied to obtain the points can be utilized for any non-ceramic insulator since the voltage applied and leakage distance are known. Successive simulations were carried out to test the chosen points and verify whether the potential difference between them can be used as an indicator for surface discharge occurrence. Such simulations were carried out using the finite element method, where a three-dimension insulator was modeled in the presence of a narrow conductive path on its surface and non-uniform conductivity. The considered conductivities have a direct correspondence with pollution levels found in the environment, as well as they are related to an equivalent salt deposit density. The results are promising, considering that the method has a high success rate for the majority of studied scenarios.

**Keywords:** computational study; voltage distribution; polymeric insulators; monitoring; surface discharges; pollution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estimativa da quantidade de isoladores poliméricos em operação. . . . .	28
Figura 2 – Isolador polimérico e suas partes constituintes. . . . .	29
Figura 3 – Apresentação de fontes típicas de poluição em isoladores: (a)pássaros, (b)veículos automotores, (c)colheita de culturas agrícolas, (d)indústrias, (e)estradas de terra, (f)salinidade do mar, (g)queimadas, (h)aplicação de agrotóxico através de veículo aéreo, (i) neve. . . . .	34
Figura 4 – Definição do ângulo de contato. . . . .	35
Figura 5 – Diferentes níveis de hidrofobicidade. . . . .	37
Figura 6 – Processo de perda e recuperação da hidrofobicidade no silicone. . . . .	38
Figura 7 – Ângulo de contato ao longo da superfície do isolador. . . . .	38
Figura 8 – Velocidade da transferência de hidrofobicidade. . . . .	39
Figura 9 – Gotas de 120 $\mu\text{L}$ com condutividade de 0,012 mS/cm submetidos a diferentes intensidade de campo elétrico uniforme. . . . .	40
Figura 10 – Processo de formação de arco em superfície polimérica hidrofóbica poluída. . . . .	43
Figura 11 – Visão geral com relação aos estágios do processo de degradação. . . . .	45
Figura 12 – Processos importantes associados com as descargas nas superfícies poliméricas. . . . .	46
Figura 13 – Ilustrações de defeitos encontrados em isoladores poliméricos. . . . .	48
Figura 14 – Modelo a parâmetros concentrados do isolador na presença de uma camada resistiva composta por poluição e umidade. . . . .	50
Figura 15 – Circuito equivalente de uma cadeia de $z$ isoladores no regime capacitivo. . . . .	52
Figura 16 – Distribuição de potencial ao longo de uma cadeia de isoladores ao variar $c$ e $k$ . . . . .	53
Figura 17 – Distribuição de potencial ao longo de um isolador polimérico. . . . .	54
Figura 18 – Circuito equivalente de uma cadeia de $z$ isoladores no regime resistivo. . . . .	55
Figura 19 – Distribuição de potencial em isolador polimérico usando a aproximação volumétrica. . . . .	58
Figura 20 – Comparação da distribuição de potencial nos diferentes regimes. . . . .	59
Figura 21 – Exemplo de objeto em três dimensões subdividido em elementos finitos. . . . .	61

Figura 22 – Ilustração explicativa sobre SQE e SQT. . . . .	63
Figura 23 – Ilustração da técnica proposta a ser viabilizada com o método. . . . .	74
Figura 24 – Processo de <i>flashover</i> em cadeia de isoladores de vidro. . . . .	76
Figura 25 – Evolução de descarga superficial em isolador polimérico de 11 kV. . . . .	76
Figura 26 – Duração e correntes dos fenômenos de interesse. . . . .	79
Figura 27 – Aproximação da distribuição de potencial por uma reta. . . . .	80
Figura 28 – Aproximação da distribuição de potencial no caso de poluição com arco do lado fase. . . . .	81
Figura 29 – Aproximação da distribuição de potencial no caso de poluição com arco do lado terra. . . . .	82
Figura 30 – Exemplo de região de monitoração em um isolador polimérico. . . . .	84
Figura 31 – Potencial elétrico em cada aleta de um isolador polimérico. . . . .	85
Figura 32 – Fotografia do isolador utilizado. . . . .	88
Figura 33 – Localização de P1 e P2 na superfície do isolador. . . . .	89
Figura 34 – Ilustração da geometria do problema em 2D. . . . .	91
Figura 35 – Condições de contorno de tensão aplicadas (em azul). . . . .	91
Figura 36 – Locais de inserção da condição de contorno de potencial flutuante para modelagem das descargas superficiais. . . . .	93
Figura 37 – Geometria do problema na presença de uma camada com 1 mm de espessura cobrindo o isolador. . . . .	94
Figura 38 – Representação do caminho condutivo com destaque nos domínios. . . . .	95
Figura 39 – Definição da geometria do problema. . . . .	96
Figura 40 – Ilustrações sobre a malha gerada. . . . .	97
Figura 41 – Fluxograma da rotina utilizada para testar o método desenvolvido. . . . .	98
Figura 42 – Fluxograma da rotina de comparação entre distribuição de potencial e a reta de referência para um caminho condutivo com poluição não-uniforme. . . . .	101
Figura 43 – Resultados para o isolador limpo sem descargas superficiais. . . . .	103
Figura 44 – Diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 em relação a tensão monitorada em cada um dos casos considerados para o isolador limpo. . . . .	105
Figura 45 – Resultados para o isolador coberto por uma camada condutiva e sem descargas superficiais. . . . .	106

Figura 46 – Diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 em relação a tensão monitorada em cada um dos casos considerados na presença de uma camada condutiva que cobre todo o isolador. . . . .	108
Figura 47 – Exemplos de perfis de distribuição de potencial e campo elétrico gerados pela rotina apresentada na Figura 41 para as faixas de condutividade leve, moderada e pesada. . . . .	109
Figura 48 – Gabarito dos testes do método. . . . .	110
Figura 49 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa leve. . . . .	111
Figura 50 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa moderada. . . . .	112
Figura 51 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa pesada. . . . .	113
Figura 52 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa muito pesada. . . . .	114
Figura 53 – Diagrama do kit de alta-tensão utilizado nas montagens. . . . .	129
Figura 54 – Laboratório de alta-tensão da UFPE. . . . .	130
Figura 55 – Ferragens metálicas utilizadas nos experimentos. . . . .	131
Figura 56 – Isolador coberto com a camada condutiva. . . . .	132
Figura 57 – Regiões de medição para o caso do isolador limpo. . . . .	134
Figura 58 – Regiões de medição para o caso do isolador com camada condutiva. . . . .	134
Figura 59 – Diagrama da montagem para obtenção da curva de distribuição de potencial. . . . .	135
Figura 60 – Ilustração das conexões para o teste do método com arco via conexão metálica. . . . .	137
Figura 61 – Montagem para o teste do método com arco via conexão metálica. . . . .	138
Figura 62 – Ilustração das conexões para o teste do método com arco via centelhador. . . . .	139
Figura 63 – Montagem para o teste do método com arco via ferragem metálica. . . . .	140
Figura 64 – Formas de onda de corrente de fuga (onda 1) e tensão aplicada (onda 2) para o caso no qual o isolador não possui camada condutiva. . . . .	142
Figura 65 – Formas de onda de corrente de fuga (onda 1) e tensão aplicada (onda 2) para o caso no qual o isolador possui camada condutiva. . . . .	143
Figura 66 – Distribuições de potencial obtida nos experimentos. . . . .	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – DDSE em relação ao grau de severidade da poluição. . . . .	34
Tabela 2 – Condutividade da camada de poluição em relação ao grau de severidade. . . . .	34
Tabela 3 – Critério para determinação da classe de hidrofobicidade (HC). . . .	36
Tabela 4 – Níveis de prioridade de manutenção de isoladores poliméricos. . . .	46
Tabela 5 – Síntese comparativa das principais pesquisas e suas características pertinentes a este trabalho. . . . .	72
Tabela 6 – Detalhes construtivos do isolador polimérico utilizado. . . . .	89
Tabela 7 – Permissividade e condutividade dos materiais. . . . .	90
Tabela 8 – Quantidade de elementos e qualidade da malha gerada com as diferentes representações geométricas utilizadas. . . . .	97
Tabela 9 – Valor de $R^2$ para cada faixa de condutividade. . . . .	115
Tabela 10 – Tensão de disrupção do espinterômetro medida no experimento em que o isolador não possui camada condutiva. . . . .	141
Tabela 11 – Tensão de disrupção do espinterômetro medida no experimento em que o isolador possui camada condutiva. . . . .	142
Tabela 12 – Testes com toda camada presente e arco como conexão metálica. .	145
Tabela 13 – Teste do método sem 25% da camada do lado fase e arco representado como centelhador. . . . .	146
Tabela 14 – Teste do método sem 25% da camada do lado terra e arco representado como centelhador. . . . .	146

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões (representação geométrica bidimensional)
3D	Três dimensões (representação geométrica tridimensional)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Projeto Auxiliado por Computador
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
CNI	Confederação Nacional da Indústria
d.d.p.	diferença de potencial
DDSE	Densidade de Depósito de Sal Equivalente
DDNS	Densidade de Depósito Não-Solúvel
DRUV	Detector de Radiação Ultra Violeta
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPDM	<i>Ethylene Propylene Diene Monome</i> - Monômero de etileno-propileno-dieno
EPR	<i>Ethylene Propylene Rubber</i> - Borracha de Etilenopropileno
HC	<i>Hydrophobicity Class</i> - Classe de Hidrofobicidade
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i> - Especificação Inicial da Troca de Gráficos
LMW	<i>Low Molecular Weight</i> - Baixo Peso Molecular
LT	Linhas de Transmissão
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RAM	<i>Random Access Memory</i> - Memória de Acesso Aleatório
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
SIR	<i>Silicone Rubber</i> - Borracha de Silicone
SQE	Soma dos Quadrados dos Erros
SQT	Soma dos Quadrados Total
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UV	Ultra-violeta

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma_{GL}$	Tensão superficial gás-líquido na interface
$\theta_s$	Ângulo estático formado pela borda da gotícula com a superfície
$\gamma_{GS}$	Tensão superficial gás-sólido na interface
$\gamma_{SL}$	Tensão superficial sólido-líquido na interface
$E_{arco}$	Campo elétrico no arco
$E_{filamento}$	Campo elétrico no filamento
$V_{AB}$	Diferença de potencial entre os pontos A e B
$W$	Trabalho realizado
$Q$	Quantidade de carga
$\vec{E}$	Campo elétrico
$d\vec{l}$	Componente diferencial de distância
$V_B$	Potencial elétrico no ponto B
$V_A$	Potencial elétrico no ponto A
$p$	Distância do ponto a carga que gera o campo elétrico
$V$	Potencial elétrico
$\rho_v$	Densidade volumétrica de carga
$\epsilon$	Permissividade absoluta do material
$\vec{A}$	Vetor de potencial magnético
$t$	Tempo
$I_t$	Corrente total no dielétrico
$I_a$	Componente resistiva da corrente total
$I_c$	Componente capacitiva da corrente total
$R$	Resistência
$C$	Capacitância
$\delta$	Ângulo de perdas
$\phi$	Ângulo de fase
$V_n$	Tensão elétrico no n-ésimo isolador
$V_g$	Tensão total aplicada na cadeia de isolador
$\beta$	Expoente da solução das equações diferenciais
$c$	Capacitância de uma unidade com relação ao solo
$k$	Capacitância de uma unidade com relação ao condutor
$R_p$	Resistência da poluição

$\sigma_s$	Condutividade superficial
$dl_m$	Distância de escoamento incremental
$d$	Espessura da camada de poluição
$\sigma_v$	Condutividade volumétrica
$\omega$	Frequência angular da tensão aplicada
$\epsilon$	Permissividade absoluta da camada condutiva
$\vec{J}_v$	Densidade de corrente volumétrica
$\vec{D}$	Densidade de fluxo elétrico
$S$	Volume de um elemento
$R^2$	Coefficiente de determinação
$y_i$	Dados coletados
$\hat{y}_i$	Valor do modelo analisado
$\bar{y}$	Média dos dados coletados
$L_{esco}$	Distância de escoamento do isolador
$L_{arco}$	Distância de escoamento contornada pelo arco
$P_1$	Primeiro ponto da região de monitoração
$P_2$	Segundo ponto da região de monitoração
$V_{moni}$	Limiar de tensão elétrica entre os dois pontos da região de monitoração

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO DE ISOLADORES	20
<b>1.1.1</b>	<b>Inspeção Visual</b>	<b>20</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Classificação dos Métodos de Monitoração</b>	<b>21</b>
1.1.2.1	Classificação Quanto ao Contato com o Objeto de Estudo	21
1.1.2.2	Classificação Quanto a Periodicidade da Monitoração	22
<b>1.1.3</b>	<b>Exemplos de Métodos de Monitoração e Suas Classificações</b>	<b>23</b>
1.2	OBJETIVOS	24
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>24</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>24</b>
1.3	CONTRIBUIÇÕES	25
1.4	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	25
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>27</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS	27
<b>2.1.1</b>	<b>Aspectos Construtivos dos Isoladores Poliméricos</b>	<b>28</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Vantagens e Desvantagens dos Isoladores Poliméricos</b>	<b>30</b>
2.1.2.1	Vantagens	30
2.1.2.2	Desvantagens	31
2.2	DESEMPENHO DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS	32
<b>2.2.1</b>	<b>Considerações sobre Poluição e Ambientes Poluídos</b>	<b>32</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Considerações sobre as Características Hidrofóbicas</b>	<b>35</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Considerações sobre o Processo de Flashover em Isoladores Poliméricos</b>	<b>40</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Considerações sobre Envelhecimento e Degradação em Isoladores Poliméricos</b>	<b>44</b>
2.3	DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL EM ISOLADORES POLIMÉRICOS	49
<b>2.3.1</b>	<b>Considerações Referentes ao Potencial Elétrico</b>	<b>49</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Distribuição de Potencial em Isoladores</b>	<b>50</b>
2.3.2.1	Distribuição de Potencial em Isoladores no Regime Capacitivo	51
2.3.2.2	Distribuição de Potencial em Isoladores no Regime Resistivo	55
2.3.2.3	Distribuição de Potencial em Isoladores no Regime Capacitivo-Resistivo	58
2.4	FERRAMENTAS MATEMÁTICAS	60

2.4.1	<b>Método dos Elementos Finitos</b>	60
2.4.2	<b>Coeficiente de Determinação</b>	61
2.5	SÍNTESE DO CAPÍTULO	62
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>65</b>
3.1	PRINCIPAIS PESQUISAS	65
3.1.1	<b>Distribuição de Potencial como Parâmetro de Monitoração em Isoladores</b>	65
3.1.2	<b>Modelos para Cálculo da Distribuição de Potencial em Isoladores</b>	69
3.2	SÍNTESE DO CAPÍTULO	71
<b>4</b>	<b>MÉTODO DESENVOLVIDO</b>	<b>74</b>
4.1	CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO	77
4.1.1	<b>Aproximações</b>	77
4.1.1.1	Representação da distribuição de potencial de maneira linear	77
4.1.1.2	Resistência de arco nula	78
4.1.1.3	Duração do arco maior que um ciclo da tensão aplicada	79
4.1.2	<b>Definição do Método</b>	79
4.1.2.1	Aumento de Tensão ao Longo da Região do Isolador não Submetida aos Arcos	80
4.1.2.2	Determinação do Comprimento de Arco a Ser Utilizado	83
4.1.2.3	Determinação da Região de Monitoração	84
4.2	SÍNTESE DO CAPÍTULO	87
<b>5</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>88</b>
5.1	MATERIAL	88
5.2	MÉTODOS	88
5.2.1	<b>Simulações com o Isolador Limpo</b>	90
5.2.2	<b>Simulações em que o Isolador possui 100% da Superfície Submetida a Camada Condutiva</b>	92
5.2.3	<b>Simulações em que o Isolador possui 1% da Superfície Submetida a Camada Condutiva</b>	94
5.2.3.1	Rotina Automática para Teste do Método	97
5.2.3.2	Rotina de Comparação da Distribuição de Potencial com um Perfil Linear	100
5.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO	102
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b>	<b>103</b>
6.1	SIMULAÇÕES COM O ISOLADOR LIMPO	103

6.2	SIMULAÇÕES COM O ISOLADOR COBERTO POR UMA CAMADA CONDUCTIVA . . . . .	105
6.3	SIMULAÇÕES EM QUE O ISOLADOR POSSUI 1% DA SUPERFÍCIE SUBMETIDA A CAMADA CONDUCTIVA . . . . .	107
6.4	SÍNTESE DO CAPÍTULO . . . . .	116
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>117</b>
7.1	CONCLUSÕES . . . . .	117
7.2	TRABALHOS FUTUROS . . . . .	119
7.3	TRABALHOS PUBLICADOS/SUBMETIDOS . . . . .	119
<b>7.3.1</b>	<b>Publicação em Periódico . . . . .</b>	<b>119</b>
<b>7.3.2</b>	<b>Publicações em Congressos . . . . .</b>	<b>120</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>121</b>
	<b>APÊNDICE A - EXPERIMENTOS PRELIMINARES . . . . .</b>	<b>129</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira sofre prejuízos em razão de falhas no fornecimento de energia elétrica. A realização de uma pesquisa organizada pela Confederação Nacional da Indústria (CNI) aponta que 67% das empresas, que utilizam eletricidade como principal insumo em seu processo produtivo, sofrem impactos significativos devido às interrupções no fornecimento de energia elétrica. Também foi relatado, por boa parte das empresas, que as mesmas são afetadas frequentemente, 16% ou, eventualmente, 34%, por faltas no fornecimento. Cerca de 44% raramente se deparam com quedas de energia e apenas 4% relataram a não ocorrência de falhas. Segundo os entrevistados, o maior problema vem da paralisação que ocorre na produção pro causa da falha no fornecimento. A depender da indústria a mesma possui perdas de produtos, matéria-prima e horas de trabalho (ABREU, 2016).

Uma parcela considerável das falhas no fornecimento de energia elétrica pode ser atribuída a desligamentos não programados das linhas de transmissão (LT), boa parte de tais desligamentos ocorrem graças a problemas nos isoladores, dispositivos primordiais para o funcionamento adequado da LT. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), entre os anos de 2016 e 2017, cerca de 11% das ocorrências são causadas por equipamentos e acessórios, dentre eles os isoladores, bem como 18% dos casos não foi possível determinar uma causa exata para o desligamento podendo ter origem também em falhas nos isoladores (ANEEL, 2018).

Em regiões costeiras, industriais, ou de alto nível de poluição biológica, a incidência de desligamentos, devido à problemas ocorridos em isoladores, pode ser ainda maior. Isto ocorre pois, um dos principais motivos para perda na capacidade de isolação é o depósito de poluição na superfície do isolador, que quando na presença de umidade elevada, pode levar a um arco superficial curto-circuitando o isolador (ALBUQUERQUE, 2014).

Em termos financeiros, tais interrupções levam a grandes prejuízos, tanto para consumidores residenciais quanto industriais. Segundo Sinapsis (2016), empresa contratada pela ANEEL para realização de um relatório referente à avaliação dos custos relacionados às interrupções de energia elétrica e suas implicações, o custo médio das interrupções de uma hora é R\$63,94/kWh para consumidores não-residenciais e R\$45,78/kWh para consumidores residenciais. Este relatório ainda cita um exemplo de uma distribuidora que, no ano de 2012, precisou arcar com R\$3.308.912,50 em

compensações de continuidade.

No mercado norte-americano, de acordo com pesquisa realizada pela *S&C Electric Company*, na qual participaram 255 empresas de diversos segmentos, é perceptível a insatisfação dos participantes com relação à continuidade no fornecimento de energia. Apenas em 2020, 2 em cada 5 empresas ficaram sem fornecimento de energia por, pelo menos, uma hora ou mais, 21% das empresas enfrentam falta de energia pelo menos mensalmente e 55% das empresas esperam uma melhora na continuidade do fornecimento de energia. Para 20% das empresas que responderam a pesquisa, uma interrupção no fornecimento típica, custa em média \$100.000,00 (S&C, 2020). Além dos prejuízos financeiros existem também as perdas intangíveis, como questões de bem-estar social e até o risco de morte ao qual alguns indivíduos possam ter sido submetidos.

Nota-se a importância desse tema para o desenvolvimento dos sistemas elétricos, através dos vários estudos que visam desenvolver dispositivos ou técnicas de monitoração referentes ao nível de poluição ou degradação em isoladores de linhas de transmissão, tais como os apresentados nos trabalhos de Ferreira (2011), Capelini (2015), Rocha (2019), Dias (2021), dentre outras diversas pesquisas na área. Os tipos de monitoração existentes se diferem, em sua essência, pela grandeza física a ser monitorada, por exemplo: corrente de fuga, temperatura ao longo do isolador, radiação ultravioleta (UV), dentre outros.

## 1.1 TÉCNICAS DE MONITORAÇÃO DE ISOLADORES

Nesta seção são apresentadas e classificadas as técnicas de monitoração aplicadas em isoladores.

### 1.1.1 Inspeção Visual

Apesar da existência de diversas técnicas de monitoração, uma das mais empregadas ainda é a técnica de inspeção visual. Durante a realização da inspeção visual se busca diagnosticar o estado dos isoladores, se os mesmos possuem trilhamentos, aletas com perfurações, oxidação nas ferragens, exposição do núcleo, no caso do isolador polimérico, dentre outras avarias e realizar uma substituição do dispositivo caso necessário. O problema com esse tipo de técnica é que a mesma

é suscetível a necessidade de visualização em diversos ângulos do isolador para uma completa inspeção e a subjetividade do inspetor, sendo assim condicionada a experiência dos técnicos que a realizam (DINIZ, 2019).

Existe também a inspeção visual noturna, cujo objetivo é encontrar problemas relacionados a descargas superficiais e efeito corona, bastante associadas à presença de poluição e umidade. Estas inspeções devem ser realizadas com o mínimo de claridade possível para que os efeitos possam ser constatados, sendo recomendável a realização em época de lua nova com umidade do ar acima de 90% (CHESF, 2016). Dentre as desvantagens desse tipo de inspeção estão: a necessidade da equipe realizar esta técnica em situação insalubre, durante a noite, podendo até pôr em risco a vida dos técnicos a depender do local em que será realizada a inspeção; a subjetividade relacionada ao técnico, de maneira semelhante a inspeção visual diurna; a ocorrência de falsos negativos devido à natureza intermitente do processo, podendo não ocorrer nenhuma anormalidade no momento em que a inspeção é realizada e, pouco tempo após a passagem da equipe técnica por uma determinada cadeia de isoladores, a mesma apresentar os fenômenos que indicam a necessidade de uma intervenção no isolador (ALBUQUERQUE, 2014).

### **1.1.2 Classificação dos Métodos de Monitoração**

Podem-se analisar as técnicas de monitoração em isoladores segundo dois aspectos: quanto ao fato de existir ou não contato físico com o objeto de estudo, para obtenção da grandeza medida, sendo classificados como invasivo ou não-invasivo; e quanto a periodicidade de sua realização, podendo ser em tempo real ou em inspeções periódicas. Então as técnicas presentes atualmente podem ser divididas em quatro grupos: Invasivo em tempo real, invasivo periódico, não-invasivo em tempo real e não-invasivo periódico.

#### **1.1.2.1 Classificação Quanto ao Contato com o Objeto de Estudo**

1. Técnicas invasivas: são definidas como aquelas em que existe a necessidade de contato com o objeto a ser monitorado, no caso o isolador. Possui a desvantagem de levar a problemas como uma maior influência do sistema de medição na grandeza medida. Esse tipo de técnica tem como vantagens a maior exatidão e

menor influência externa no resultado, visto que a mesma é obtida de maneira direta.

2. Técnicas não-invasivas: são aquelas em que não existe a necessidade de contato direto com o objeto a ser estudado. A principal desvantagem é a maior influência do meio na grandeza a ser medida, quando comparadas com as técnicas invasivas, dificultando o diagnóstico em algumas situações. Estas técnicas têm como vantagem o fato do dispositivo de medição não influenciar na grandeza a ser medida, bem como a maior facilidade de sua inserção na rotina de manutenção da LT.

#### 1.1.2.2 Classificação Quanto a Periodicidade da Monitoração

1. Técnicas com medição em tempo real: consistem naquelas em que ocorre a monitoração do objeto de estudo a todo momento. Dentre as principais desvantagens podem ser citados os altos custos, visto que, para cada cadeia ou para cada pequeno grupo de cadeias de isoladores, será necessário a instalação de um dispositivo, bem como um sistema de comunicação para informar continuamente o estado operacional do objeto de estudo. Porém, caso ocorra qualquer anomalia operacional, esta será observada e sinalizada no momento de sua ocorrência, em tempo real, facilitando o trabalho dos técnicos responsáveis pela manutenção.
2. Técnicas periódicas: são aquelas executadas ocasionalmente a depender do agendamento realizado pela equipe de manutenção da linha. Dentre as vantagens está o fato dos técnicos de inspeção estarem habituados a este tipo de técnica, sendo fácil a incorporação na rotina da manutenção. Dentre as desvantagens, tem-se que este tipo de técnica avalia o estado do equipamento apenas no momento da inspeção. Não sendo adequado para monitoração de eventos intermitentes e aleatórios, como as descargas superficiais. Caso o intervalo entre as inspeções seja maior que o necessário, podem resultar em problemas operacionais na LT devido a isoladores apresentarem falhas, enquanto que caso sejam realizadas inspeções com tempo menor que o necessário podem implicar em uma alocação ineficiente dos recursos.

### 1.1.3 Exemplos de Métodos de Monitoração e Suas Classificações

Dentre as técnicas invasivas em tempo real pode ser citada a medição de corrente de fuga, na qual a corrente estabelecida ao longo do isolador é monitorada. Caso esta corrente apresente níveis elevados, ou distorções em sua forma de onda, é caracterizado que este isolador precisa ser substituído. Dentre os diversos trabalhos, utilizando este tipo de técnica, podem ser citados e Mendonça et al. (2010), Govindaraju, Saranya e Muniraj (2016) e Ahmadi-Joneidi, Shayegani-Akmal e Mohseni (2017).

Atualmente, podem ser consideradas técnicas invasivas periódicas aquelas que utilizam a distribuição de potencial e o campo elétrico para monitoração, principalmente em isoladores de porcelana, visto que existe a necessidade de contato com o objeto de estudo e este contato é realizado de tempos em tempos. Dentre os trabalhos com utilização desse tipo de grandeza podem ser citados: Cheng e Li (2006), Lee et al. (2012) e Park et al. (2012).

Uma das técnicas não-invasivas em tempo real é aquela em que é utilizado o sistema *carrier*, sistema de comunicação presente em subestações que utiliza a própria linha de transmissão como meio para troca de informações, e analisa os sinais desse sistema de tal forma a determinar quais isoladores apresentam defeitos em uma LT. Dentre os trabalhos nessa linha de pesquisa podem ser citados Adami (2008) e Capelini (2015).

A maior parte das técnicas empregadas atualmente são as não-invasivas e periódicas. Dentre os tipos que se enquadram nessa definição estão: medição de temperatura com o termovisor (SOUZA, 2016), medição de ultravioleta com o detector de radiação UV (DRUV) (GUEDES, 2015), medição de rádiofrequência com antenas próprias para esta aplicação (ROCHA, 2019), medição de ruído ultrassônico (FERREIRA, 2011), inspeção visual diurna e noturna (DINIZ, 2019).

É possível a utilização de mais de uma técnica de monitoração em paralelo para uma maior exatidão no diagnóstico do dispositivo, pois a inspeção utilizando apenas uma única técnica pode levar a erros nos diagnósticos, conforme apresentados nos trabalhos de Diniz (2019) e Dias (2021). Utilizar outras informações, provenientes de outras técnicas de monitoração, aumenta a confiabilidade do resultado (RIBEIRO, 2017).

Baseado nas informações apresentadas é justificável a realização de pesquisas para o desenvolvimento ou aprimoramento de técnicas para a monitoração de

isoladores. Tem-se, então, que modos de monitorar o surgimento de descargas superficiais podem ser considerados um método de monitoração dos isoladores poliméricos, visto que este fenômeno está diretamente atrelado ao nível de poluição depositada e de degradação da superfície polimérica. Uma descarga de comprimento considerável pode levar ao curto-circuito do isolador, sendo necessário uma intervenção antes de que isso aconteça. Vislumbra-se, no futuro, o desenvolvimento de sistema de monitoração baseado nessa tecnologia.

## 1.2 OBJETIVOS

Nesta seção é apresentado o objetivos geral desta pesquisa, assim como os objetivos específicos a serem atingidos visando o objetivo geral.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é demonstrar, através de modelos computacionais, a viabilidade de se monitorar o estado operacional de isoladores poliméricos a partir de avaliações do comportamento dinâmico da diferença de potencial em trechos críticos da cadeia.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral foram atingidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar o comportamento dinâmico da distribuição de tensão ao longo da cadeia de isoladores poliméricos, quando submetida a descargas superficiais;
- Formular um método matemático que permita explicitar quais pontos devem ser monitorados para qualquer tipo de cadeia de isoladores poliméricos, em função da distância de escoamento da cadeia e do nível de tensão aplicada;
- Aferir trechos críticos da cadeia de isoladores poliméricos candidatos a monitorações direcionadas a viabilizar alertas específicos quanto ao estado da cadeia.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições atingidas ao longo da pesquisa foram:

- Explicitar a utilização do comportamento dinâmico da distribuição de potencial como parâmetro de monitoração em isoladores poliméricos;
- Embasar o desenvolvimento de uma nova técnica de monitoração de isoladores poliméricos em tempo real, baseada nas variações da distribuição de potencial;
- Desenvolver uma expressão para definir quais pontos devem ser monitorados para qualquer tipo de cadeia de isoladores poliméricos, em função da distância de escoamento da cadeia e do nível de tensão aplicada.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 2** - apresenta a fundamentação teórica necessária para o embasamento do presente trabalho. São expostos conceitos gerais sobre isoladores poliméricos como: aspectos construtivos, desempenho dos isoladores em diferentes cenários e o mecanismo de formação das descargas superficiais em superfícies poliméricas. É apresentado o comportamento da distribuição de potencial em isoladores poliméricos para diversas situações. Por fim, são apresentadas as ferramentas matemáticas utilizadas neste trabalho.
- **Capítulo 3** - apresenta a revisão das pesquisas que mais influenciaram este trabalho e estão relacionadas ao tema, bem como suas respectivas contribuições. É dada maior atenção as pesquisas nas quais foram utilizados a distribuição de potencial elétrico como parâmetro de diagnóstico em isoladores, bem como trabalhos nos quais modelos são utilizados para determinação da distribuição de potencial elétrico ao longo de isoladores em diferentes condições.
- **Capítulo 4** - apresenta o método para a determinação da região do isolador polimérico a ser monitorada.

- **Capítulo 5** - é descrito o material e métodos utilizados no presente trabalho. Apresenta-se o isolador empregado nas simulações, bem como as técnicas computacionais utilizadas para teste do método desenvolvido.
- **Capítulo 6** - São exibidos os resultados dos testes efetuados para verificação da taxa de acerto do método. Em seguida são realizadas análises com base nos resultados apresentados.
- **Capítulo 7** - São apresentadas as conclusões obtidas ao término deste trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.
- **Apêndice A** - Documento que apresenta o desenvolvimento de experimentos preliminares para verificação do método proposto neste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é desenvolvida a fundamentação teórica necessária para o embasamento do presente trabalho. Primeiramente, são apresentadas as principais características com relação aos isoladores poliméricos como os aspectos construtivos, as vantagens e desvantagens desse tipo de isolador. Em seguida, são feitas considerações sobre o desempenho dos isoladores poliméricos submetidos a poluição e umidade, bem como a relação entre as condições ambientais e o processo de degradação dos isoladores. Posteriormente, é apresentada uma revisão sobre a distribuição de potencial elétrico em isoladores poliméricos em diversos regimes de operação. Por fim, são apresentadas algumas das principais ferramentas matemáticas utilizadas neste trabalho.

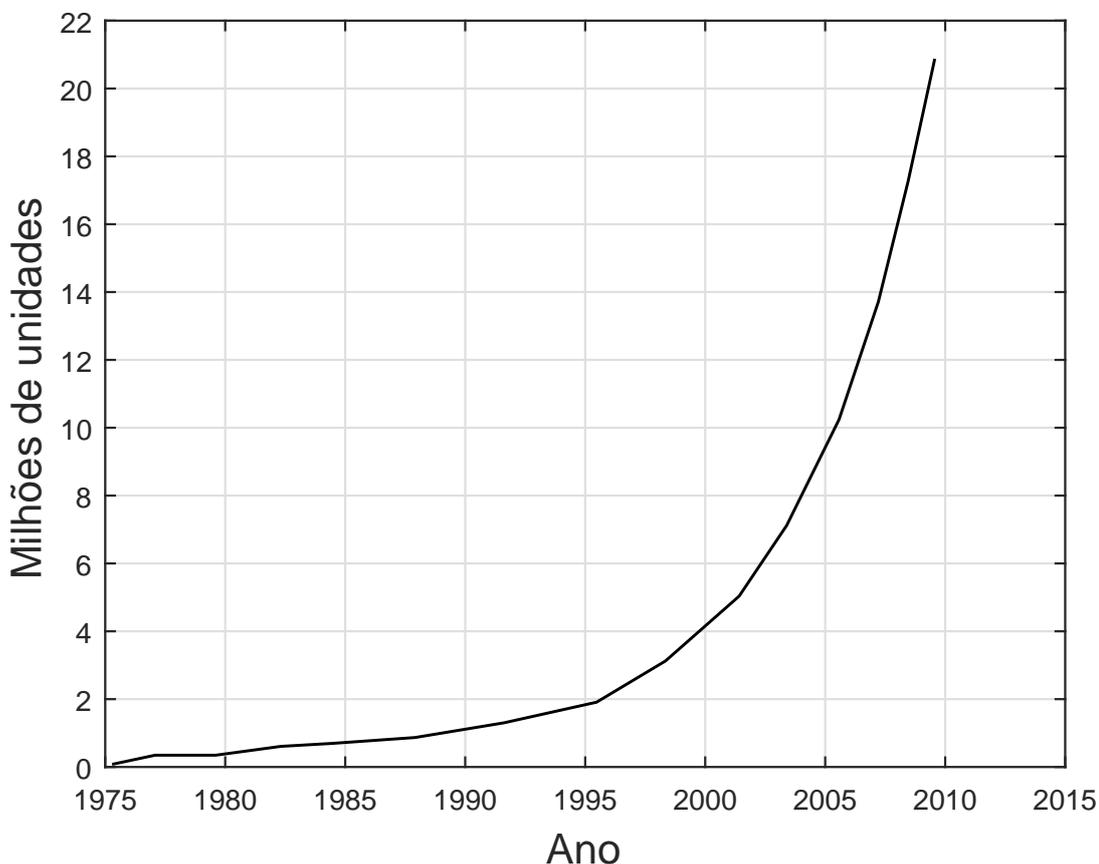
### 2.1 CARACTERÍSTICAS DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS

O surgimento dos primeiros isoladores poliméricos data da década de 40, em que esses equipamentos eram utilizados somente em ambientes abrigados e eram constituídos de resina epóxi. Com o passar do tempo, o desenvolvimento de vários materiais e técnicas de produção levaram à elaboração de equipamentos mais confiáveis e com maior vida útil, superando assim os problemas inicialmente apresentados (QUEIRÓZ, 2013).

Apenas nas décadas de 60 e 70, com o desenvolvimento da tecnologia de fabricação de isoladores para exteriores, é que foram desenvolvidos os primeiros isoladores poliméricos utilizados em linhas de transmissão. Entretanto, apenas nos anos 80, é que de fato surgiram versões comerciais destes equipamentos (HALL, 1993). Devido às suas diversas vantagens, quando comparados aos isoladores cerâmicos, os isoladores poliméricos estão gradativamente ganhando espaço em aplicações de transmissão de energia, adquirindo importância nos sistemas de média e alta tensão.

No ano de 2017, o valor de mercado dos isoladores poliméricos está avaliado em 1,5 bilhões de dólares. É esperado que o número de isoladores poliméricos, considerando uma taxa de crescimento anual composta de 7,8% ao ano, chegue a 100 milhões de unidades em 2024 (GUPTA; BAIS, 2018). Na Figura 1, é apresentada uma estimativa referente aos isoladores poliméricos instalados no período de 1975 até 2010.

Figura 1 – Estimativa da quantidade de isoladores poliméricos em operação.



Fonte: adaptado de Schmuck et al. (2012).

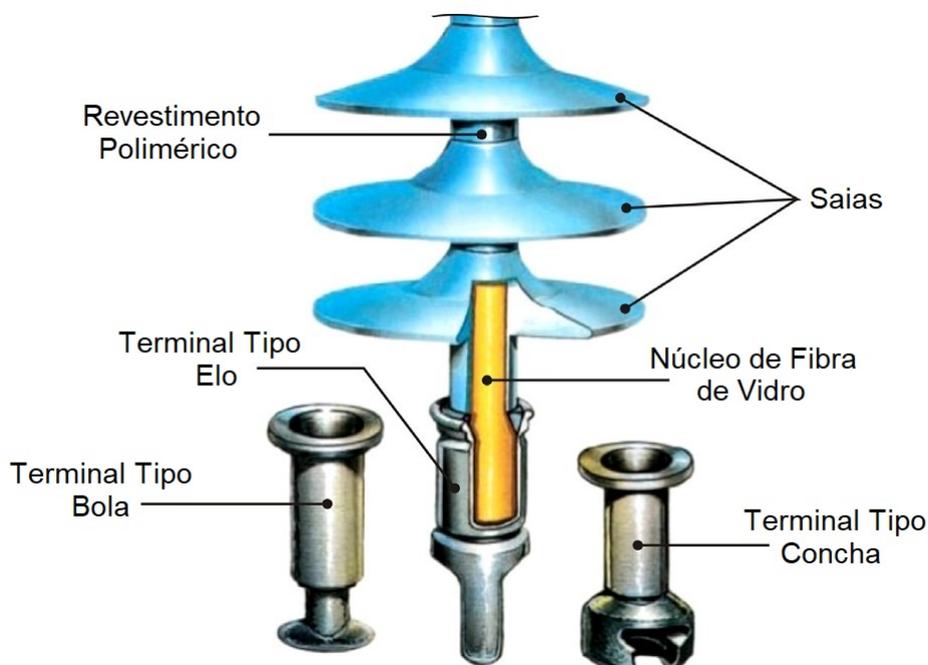
Constata-se, através da análise da Figura 1, o caráter exponencial no crescimento do uso de isoladores poliméricos, logo a aplicação de técnicas que resultem em uma maior confiabilidade ao sistema elétrico, especialmente quando se trata de isoladores poliméricos, é de fundamental importância.

### 2.1.1 Aspectos Construtivos dos Isoladores Poliméricos

Um isolador polimérico, tipo suspensão, pode ser dividido em três partes constituintes: o núcleo de resina epóxi reforçada, o revestimento polimérico o qual protege o núcleo e é onde estão presentes as aletas, ou saias, distribuídas ao longo de todo corpo do isolador, e os terminais de conexão que são as ferragens metálicas que conectam o isolador à torre e ao condutor. Na Figura 2, é possível observar as partes

que constituem um isolador polimérico.

Figura 2 – Isolador polimérico e suas partes constituintes.



Fonte: adaptado de LAPP (2004).

O núcleo é basicamente uma haste de resina epóxi reforçada e possui as funções de isolamento elétrico e suporte de esforços mecânicos, tais como: peso do condutor, vibrações ocasionadas por massas de ar, esforços gerados por curto-circuitos e dilatação do condutor devido à temperatura (GORUR; CHERNEY; BURNHAM., 1999). O núcleo é de fundamental importância, sua exposição ao ambiente externo pode comprometê-lo e caso isso ocorra é necessário que o isolador seja substituído (GORUR, 2003).

O revestimento polimérico é, normalmente, fabricado com borracha de silicone (SIR), etilenopropileno (EPR) ou etileno-propileno-dieno (EPDM). O revestimento tem a função de proteger o núcleo contra as intempéries durante o regime de operação, sejam elas: umidade, poluição, radiação ultravioleta, vandalismo, dentre outros, além de auxiliar na isolação elétrica (ZHAO; BERNSTORF, 1998). As aletas, também conhecidas como saias, são constituídas do mesmo material do revestimento. Possuem como função primordial o aumento da distância de escoamento entre as regiões segregadas eletricamente, evitando a formação de caminhos condutivos superficiais. Define-se como distância de escoamento a menor distância, contornando a superfície do isolador, que conecte as ferragens terminais. A geometria das aletas, bem como o

material que compõe o revestimento, variam a depender do fabricante, do tipo e das condições de serviço ambientais para as quais aquele isolador foi projetado.

Por fim, as ferragens metálicas, ou terminais de conexão, são elementos metálicos responsáveis pela realização da conexão entre o isolador e a torre, e entre o isolador e o condutor. A geometria desses terminais de conexão influenciam no campo elétrico presente em seu entorno e podem ser projetadas de forma a reduzi-lo, minimizando possíveis estresses elétricos. É necessária a utilização dos chamados anéis equalizadores, que são um conjunto de ferragens com objetivo de tornar a distribuição de campo elétrico mais uniforme, essas ferragens são utilizadas principalmente em linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 69 kV (MENDONÇA, 2016).

### **2.1.2 Vantagens e Desvantagens dos Isoladores Poliméricos**

Dentre as vantagens e desvantagens apresentadas na utilização de isoladores poliméricos, podem ser citadas:

#### **2.1.2.1 Vantagens**

Pode-se dizer que os isoladores poliméricos apresentam diversas vantagens quando comparados aos isoladores cerâmicos, vidro e porcelana. Essas vantagens são responsáveis pelo aumento da adoção dos isoladores poliméricos aos sistemas de potência ao longo do tempo, como já apresentado pela Figura 1.

Uma das principais vantagens, inerente aos isoladores poliméricos, é a maior facilidade de manuseio e instalação dos mesmos. Isto ocorre devido as dimensões compactas e ao menor peso quando comparados aos isoladores cerâmicos, um isolador polimérico pode apresentar um peso em até 90% menor do que uma cadeia cerâmica (GORUR; CHERNEY; BURNHAM., 1999).

A característica de menor peso do isolador polimérico influencia diretamente nos custos relacionados as torres de sustentação da LT, visto que essas estruturas precisarão sustentar um peso menor, podendo assim serem construídas com menos material, reduzindo assim os custos de montagem da linha de transmissão.

O tempo necessário para a fabricação de isoladores poliméricos é considerado curto, devido a facilidade de usinagem, fundição e cura a baixas temperaturas, ainda

existe a possibilidade da inserção das ferragens metálicas durante o processo de fabricação, o que evita o uso de peças coladas que podem se tornar causa geradora de possíveis defeitos (GORUR; CHERNEY; BURNHAM., 1999).

Os isoladores poliméricos são escolhas mais adequadas quando levado em consideração seu desempenho em caso de vandalismo. Em caso de disparos por arma de fogo, contra isoladores cerâmicos eles estilhaçam provocando um efeito visual atrativo aos vândalos. Já no isolador polimérico, por se tratar de um polímero, esse efeito não ocorre, retirando a atratividade dessa prática (FERREIRA, 2007).

Por fim, os isoladores de compósitos ou poliméricos possuem um desempenho melhor em ambientes nos quais estão submetidos a poluição e umidade. Esta característica vem do fato que a superfície polimérica possui um comportamento hidrofóbico, ou seja, em uma superfície polimérica, caso suas propriedades não estejam deterioradas, ocorre a formação de gotículas de água deparadas, impedindo a formação de uma camada condutiva, reduzindo assim a corrente de fuga e a probabilidade de descargas superficiais (ALVES, 2018).

#### 2.1.2.2 Desvantagens

Mesmo com todos os benefícios citados, o emprego de isoladores poliméricos em sistemas de potência apresentam algumas desvantagens. Dentre elas estão: o difícil diagnóstico de defeitos internos, a maior deterioração enquanto está em funcionamento e o comportamento em operação a longo prazo ainda não previsível.

O diagnóstico de defeitos internos em isoladores poliméricos torna-se complexo, pois, diferentemente dos isoladores cerâmicos que estilhaçam quando apresentam fissuras ou bolhas internas, os isoladores poliméricos podem não apresentar sinais de que houve, ou está ocorrendo, defeitos internos no isolador, devido ao revestimento polimérico externo. Uma inspeção visual pode não detectar problemas presentes no isolador e, dessa forma, esses equipamentos necessitam de uma maior atenção quanto à manutenção (GUEDES, 2015).

Durante o período de operação dos isoladores poliméricos, os mesmos estarão submetidos a diferentes agentes ambientais, esses agentes podem ser responsáveis pela degradação do material polimérico levando a mudanças em suas propriedades dielétricas. Um dos principais agentes de degradação são os raios ultravioletas, oriundos da luz solar ou da ocorrência de descargas corona. A absorção da radiação

UV pelos isoladores resulta em quebras das cadeias poliméricas do material, levando à degradação química e mecânica (QUEIRÓZ, 2013).

Devido ao processo de degradação, que o revestimento polimérico pode sofrer ao longo de sua operação ser resultante de diversas variáveis aleatórias, estimar a expectativa de vida útil do isolador polimérico não é uma tarefa simples. Essa característica torna o comportamento de longo prazo deste tipo de isolador de difícil previsibilidade (ERBETTA, 2015).

## 2.2 DESEMPENHO DOS ISOLADORES POLIMÉRICOS

Nesta seção são apresentadas as considerações referentes ao desempenho de isoladores poliméricos em diversos cenários de operação.

### 2.2.1 Considerações sobre Poluição e Ambientes Poluídos

Segundo Farzaneh e Chisholm (2009) define-se poluição como a introdução de substâncias ou energia no ambiente que possa por em perigo a saúde humana, agredir recursos vivos e ecossistemas, ou prejudicar ativos. As fontes de poluição podem ser geradas por agentes naturais, tais como: salinidade marina, fuligem de plantas, contaminação biológica ou serem agentes provenientes de atividades humanas, tais como: contaminantes vindos de fábricas, fuligem gerada por veículos, compostos químicos, dentre outros.

Os isoladores utilizados em subestações de energia elétrica, bem como nas linhas de transmissão e distribuição de energia, devem suportar a tensão nominal para a qual foram projetados, sem a ocorrência de falhas disruptivas também conhecido como *flashover*. Esses isoladores devem suportar algumas condições transitórias. As características operacionais dos isoladores podem ser alteradas, momentaneamente ou permanentemente, a depender das características ambientais, levando a problemas como perda de hidrofobicidade, descargas superficiais e consequente degradação do isolador.

De acordo com a norma IEC TS 60815 (2008) existem dois tipos de poluição que podem levar os isoladores a disrupção. São elas a poluição do tipo A, em que poluição sólida com componentes não solúveis é depositada na superfície do isolador. Esses depósitos se tornam condutivos quando entram em contato com água; e a poluição do

tipo B, em que líquidos eletrólitos são depositados no isolador com poucos, ou até sem, componentes não solúveis.

A poluição do tipo A pode ser classificada em dois tipos de categorias, denominadas de poluição ativa, que efetivamente forma uma camada condutiva, e a poluição inerte, que forma camadas de conexão para a poluição condutiva. A poluição ativa pode ser subdividida em: poluição condutiva, sais altamente solúveis e sais de baixa solubilidade. A poluição ativa é medida em termos de densidade de depósito de sal equivalente (DDSE) em  $mg/cm^2$ . A poluição inerte é composta de partículas sólidas inertes, como poeira, areia, argila, óleos, dentre outros. A poluição inerte é medida em termos de densidade de depósito não-solúvel (DDNS) em  $mg/cm^2$ .

A poluição tipo B é composta fundamentalmente por eletrólitos líquidos, sais associados a áreas costeiras, com a presença de névoa condutiva e maresia, e em regiões sujeitas a névoa química, pulverização de culturas e chuva ácida. Na Figura 3 são ilustrados alguns tipos de fonte de poluição que incidem em isoladores.

O grau de severidade da poluição, em um determinado local de estudo, pode ser obtido através da deposição superficial, que é dado diretamente pela medição de DDSE. A relação entre a classe de severidade da poluição e o índice de DDSE, preferencialmente medido no período de pelo menos um ano, é exposto na Tabela 1.

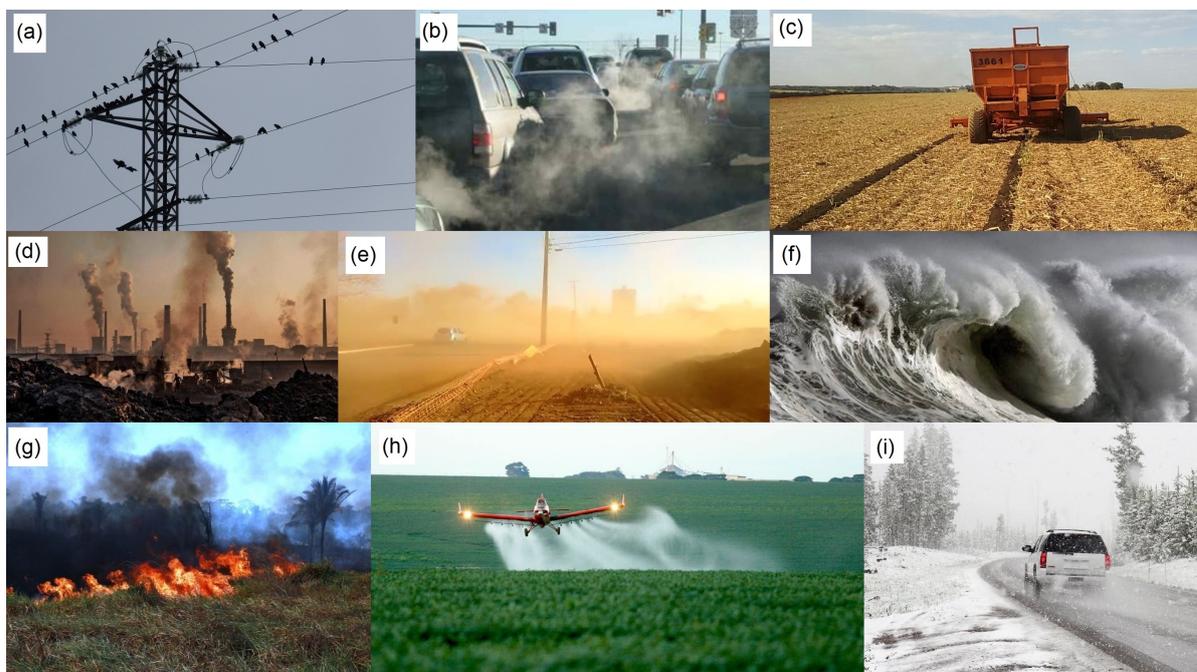
É possível levar em consideração a influência de contaminantes não-solúveis. Para que isso seja feito, como regra de bolso, o grau de severidade da poluição no local deve ser acrescido em um nível, ou seja, se for constatado leve aumenta-se o grau para moderada, se for considerado moderada para pesado e assim por diante. Essa consideração só deve ser realizada caso a medição do valor de DDNS seja maior que  $2 mg/cm^2$  (MACEY; VOSLOO; TOURREIL, 2004).

É necessário levar-se em consideração a condutividade como um parâmetro da camada de poluição, essa visão é particularmente útil na utilização de parâmetros de simulação computacionais. Em termos de condutividade da camada de poluição, a relação entre o grau de severidade do local e a camada de poluição depositada, em  $\mu S/cm$ , é apresentada na Tabela 2.

Entretanto, no desempenho de isoladores em operação, os contaminantes mais usualmente encontrados possuem pouca influência no desempenho e degradação do isolador, quando considerado que a superfície do isolador esteja seca. A umidade normalmente cria condições que possibilitam a formação de um filme condutivo na superfície suja do isolador. Isto ocorre, em alguns casos, visto que a umidade pode

não ser suficiente para realizar a lavagem das impurezas (DOMINGUES, 2012).

Figura 3 – Apresentação de fontes típicas de poluição em isoladores: (a) pássaros, (b) veículos automotores, (c) colheita de culturas agrícolas, (d) indústrias, (e) estradas de terra, (f) salinidade do mar, (g) queimadas, (h) aplicação de agrotóxico através de veículo aéreo, (i) neve.



Fonte: adaptado de Macey, Vosloo e Tourreil (2004).

Tabela 1 – DDSE em relação ao grau de severidade da poluição.

DDSE [ $mg/cm^2$ ]	Grau de severidade da poluição	
<0,06	I	Leve
0,06 - 0,12	II	Moderada
0,12 - 0,24	III	Pesada
>0,24	IV	Muito Pesada

Fonte: adaptado de Macey, Vosloo e Tourreil (2004).

Tabela 2 – Condutividade da camada de poluição em relação ao grau de severidade.

Condutividade da camada de poluição [ $\mu S/cm$ ]		Grau de Severidade da Poluição	
(média mensal)	(máximo mensal)		
0 à 75	0 à 175	I	Leve
76 à 200	176 à 500	II	Moderada
201 à 350	501 à 850	III	Pesada
>350	>850	IV	Muito Pesada

Fonte: adaptado de Macey, Vosloo e Tourreil (2004).

## 2.2.2 Considerações sobre as Características Hidrofóbicas

Nos isoladores poliméricos o modo de distribuição da umidade sobre a superfície é influenciado pela hidrofobicidade do material. Essa é a característica, que alguns materiais possuem, de repelir a água. Alguns polímeros detêm essa propriedade, sendo este o motivo do melhor desempenho de isoladores poliméricos em ambientes poluídos, visto que superfícies hidrofóbicas dificultam a formação de um filme condutivo na superfície do isolador.

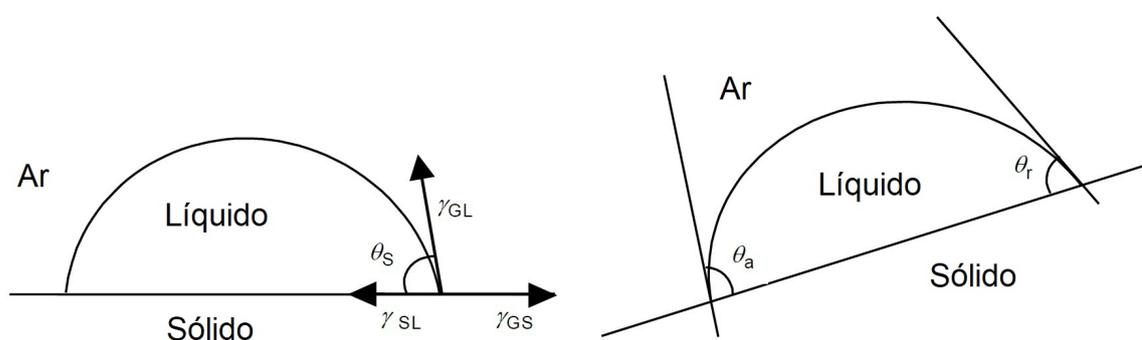
Porém a exposição destes isoladores em serviço às intempéries, diminuem a hidrofobicidade ao longo do tempo devido aos estresses elétricos e ambientais, levando o isolador a uma pior performance no que se refere ao desempenho em ambientes poluídos (YANG et al., 2014), até mesmo longos períodos de exposição a água podem levar a perda de hidrofobicidade (CHAKRABORTY; REDDY, 2017).

A determinação do nível de hidrofobicidade é feita com base no ângulo interno formado pela gotícula de água e a superfície, este ângulo é chamado de  $\theta_s$  e é conhecido como ângulo de contato estático, caso ambos os ângulos internos formados sejam iguais. Caso sejam diferentes são ângulos de contato dinâmicos, surgindo assim o conceito de ângulo de contato de avanço  $\theta_a$  e de recuo  $\theta_r$ , conforme apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Definição do ângulo de contato.

(a) ângulo de contato estático.

(b) ângulo de contato dinâmico.



Fonte: adaptado de IEC TS 62073 (2016).

As forças presentes na Figura 4a estão em equilíbrio estático, ou seja, o somatório dos vetores presentes é igual a zero e, então, respeitam a expressão 2.1:

$$\gamma_{GL}\cos(\theta_s) = \gamma_{GS} - \gamma_{SL} \quad (2.1)$$

Em que:  $\theta_s$  representa o ângulo estático formado pela borda da gotícula com a superfície [°];  $\gamma_{GL}$  é a tensão superficial gás-líquido na interface;  $\gamma_{GS}$  é a tensão superficial gás-sólido na interface e  $\gamma_{SL}$  é a tensão superficial sólido-líquido na interface.

Os critérios de determinação da classe de hidrofobicidade são definidos através do valor do ângulo de recuo  $\theta_r$  e são classificados segundo a classe de hidrofobicidade (HC), que variam de HC-1 até HC-7. Os valores que correspondem a cada nível de hidrofobicidade são apresentados na Tabela 3, enquanto na Figura 5 são apresentados, superfícies com diferentes classes de hidrofobicidade indo do HC-1 ao HC-6.

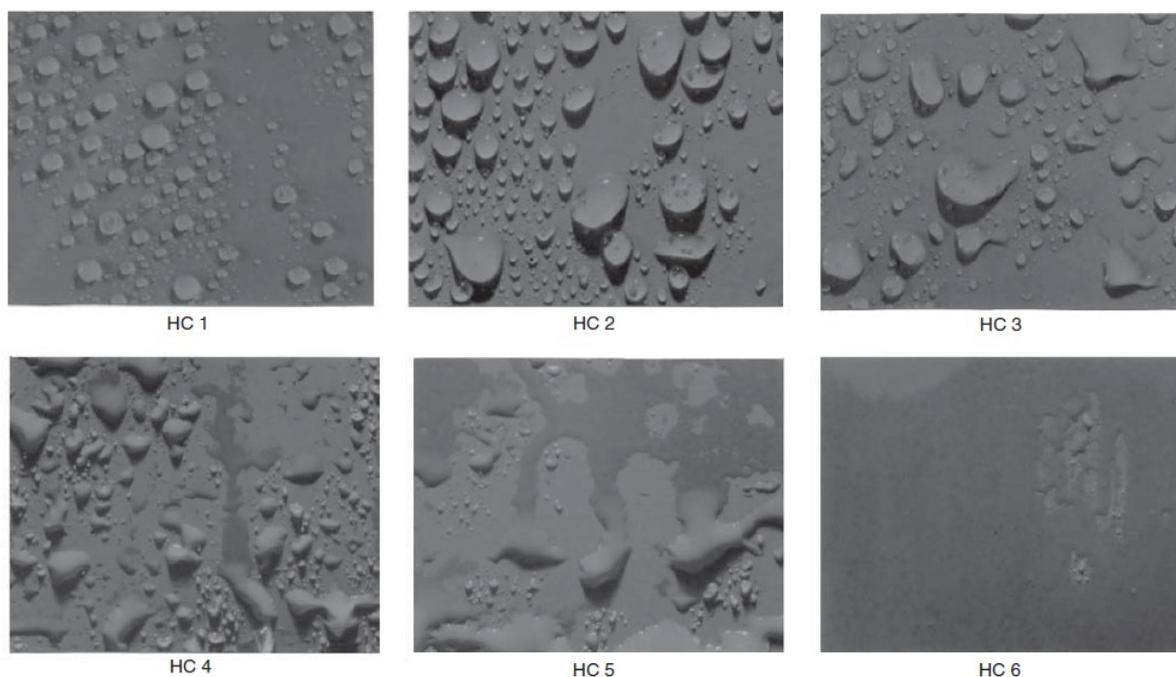
Tabela 3 – Critério para determinação da classe de hidrofobicidade (HC).

HC	Descrição	Ângulo de recuo aproximado $\theta_r$ [°]
1	Apenas discretas gotículas se formam com formatos praticamente circulares.	>60
2	Apenas discretas gotículas se formam, a maior parte da superfície é coberta com gotas de formato regular, porém derivadas de círculos.	40 à 60
3	Apenas discretas gotículas se formam sendo a maior parte com formatos irregulares.	10 à 40
4	Menos de 10% da superfície está coberta por filmes ou canais de água.	0 à 10
5	Mais de 10% e menos que 90% da superfície está coberta por filmes ou canais de água.	0 à 10
6	Mais de 90% e menos que 100% da superfície está coberta por filmes ou canais de água.	0 à 5
7	Forma-se um filme condutivo sobre a superfície.	0

Fonte: adaptado de IEC TS 62073 (2016).

As características hidrofóbicas podem ser perdidas de maneira definitiva, devido a uma degradação das cadeias poliméricas em caráter definitivo, de forma que não ocorre a recuperação dessas características por parte do material. Entretanto pode ocorrer de maneira temporária, causada por agentes poluentes, abrasão ou devido à presença de descargas elétricas. A hidrofobicidade é recuperada devido à migração das moléculas de baixo peso de silicone (LMW - *Low Molecular Weight*), que migram para superfície do material conforme apresentado na Figura 6 (FARZANEH; CHISHOLM, 2009).

Figura 5 – Diferentes níveis de hidrofobicidade.



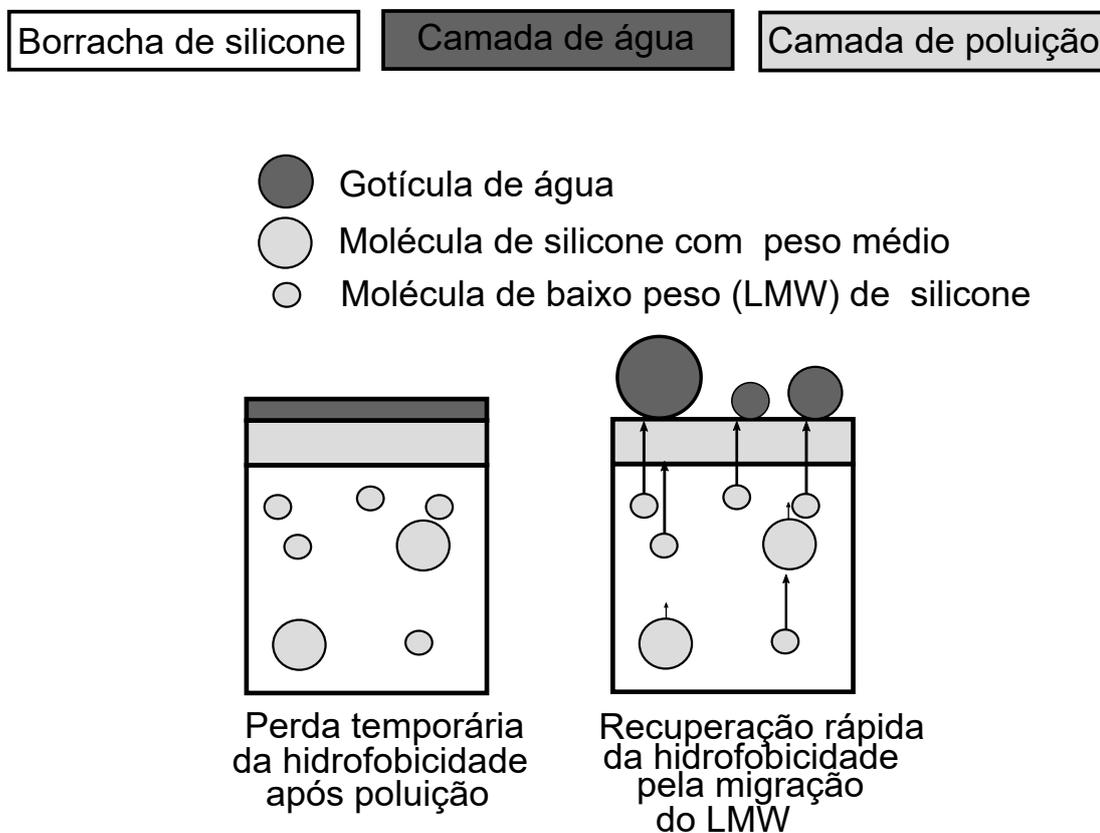
Fonte: adaptado de STRI (1992).

Em boa parte dos casos a perda de hidrofobicidade não ocorre uniformemente ao longo de todo o isolador, é natural que a maior perda esteja presente nas extremidades, próximo ao condutor e perto da estrutura, especialmente próximo ao condutor, pois são pontos de maior estresse elétrico e conseqüentemente de descargas elétricas que geram raios ultravioletas e calor levando à deterioração do material (YANG et al., 2014).

Entretanto dizer que são maiores não implicam necessariamente, na prática, em diferenças elevadas de hidrofobicidade. Alguns dos estudos, com o objetivo de mapear a hidrofobicidade ao longo de toda superfície de um isolador retirado de operação, realizaram experimentos utilizando isoladores em boas condições, HC-1 ou HC-2, como apresentados nas Figuras 7a e 7b, que mostram a existência de alteração do ângulo de contato, porém não é suficiente para mudar a classe de hidrofobicidade ao longo dos isoladores testados.

Porém, conforme apresentado por Tzimas e Rowland (2010), podem existir diferenças consideráveis entre os níveis de hidrofobicidade ao longo da superfície de isoladores com bastante tempo de operação. Nos casos destes isoladores, o processo de formação de um caminho condutivo pode ocorrer com maior facilidade.

Figura 6 – Processo de perda e recuperação da hidrofobicidade no silicone.

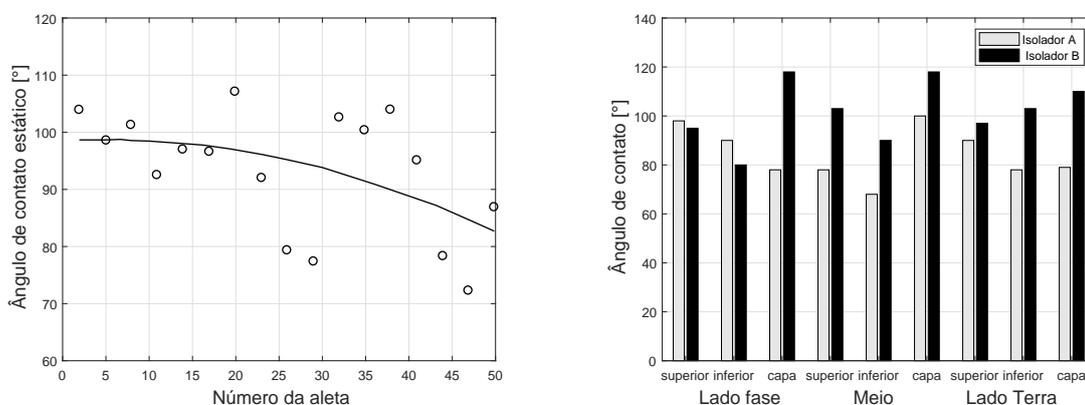


Fonte: adaptado de Farzaneh e Chisholm (2009).

Figura 7 – Ângulo de contato ao longo da superfície do isolador.

(a) Primeiro Estudo.

(b) Segundo Estudo.



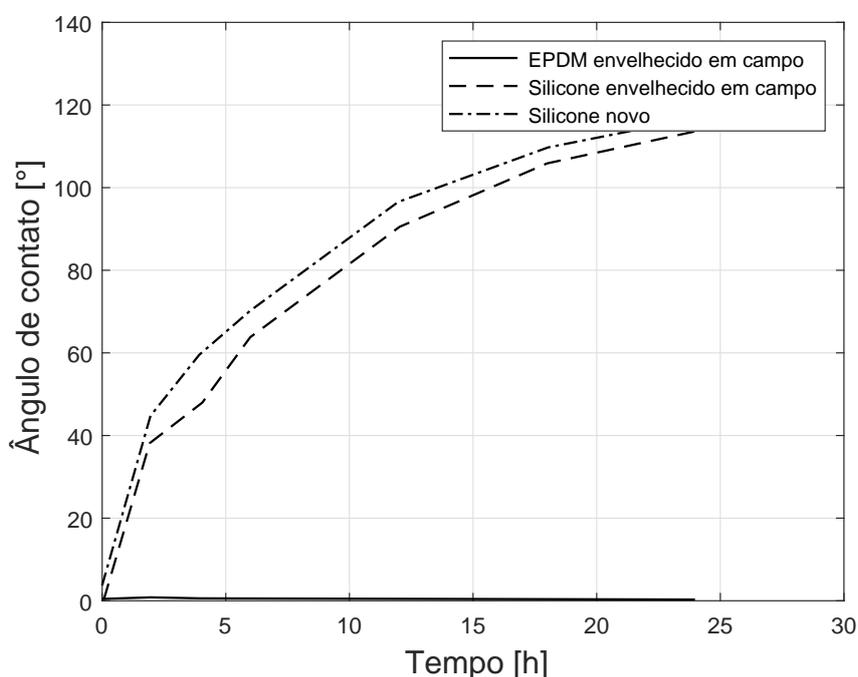
Fonte: (a) adaptado de Yang et al. (2014) e (b) adaptado de Mavrikakis, Siderakis e Mikropoulos (2014).

A formação da camada condutiva não é apenas responsabilidade do estado

de degradação do material polimérico, mas também da poluição depositada sobre a superfície do isolador. Diversos dos poluentes presentes no processo de depósito de poluição em isoladores de linhas de transmissão absorvem água prontamente, ou seja, são considerados higroscópicos. Dentre eles estão: o hidróxido de sódio, ácido sulfúrico, cloreto de sódio, cloreto de cálcio e cloreto de magnésio (FARZANEH; CHISHOLM, 2009).

Na Figura 8 são apresentados gráficos da evolução do ângulo de contato em relação ao tempo para três isoladores: um de EPDM retirado de serviço, um de borracha de silicone retirado de serviço e um de borracha de silicone novo. O estudo referente a Figura 8 submete os três isoladores à saturação por água através de imersão de forma a perder, temporariamente, suas propriedades hidrofóbicas para o caso do silicone. O objetivo é verificar a velocidade de recuperação da hidrofobicidade em cada um dos isoladores.

Figura 8 – Velocidade da transferência de hidrofobicidade.



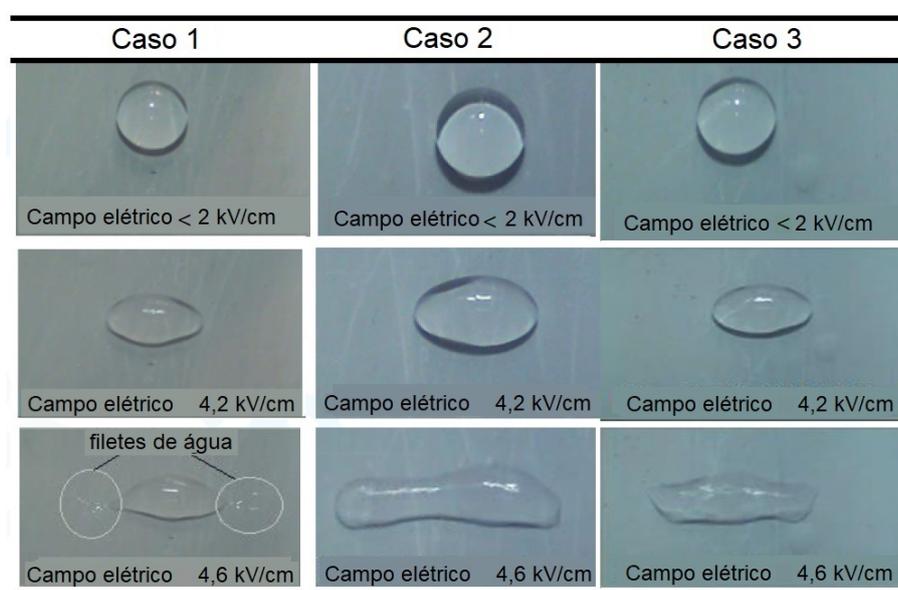
Fonte: adaptado de Mavrikakis et al. (2015).

Os isoladores, apresentados em Mavrikakis et al. (2015), levaram cerca de cinco horas para retornarem para a classe HC-1 novamente e cerca de uma hora apresentando características de classe HC-5 à HC-7, aumentando a probabilidade da formação de um caminho condutivo enquanto as propriedades hidrofóbicas não são

restauradas.

Outro aspecto que facilita a formação de um caminho condutivo sobre a superfície do isolador é a presença do campo elétrico, visto que ele provoca o alongamento das gotículas de água aumentando a área de superfície ocupada, assim diminuindo a distância entre as gotículas. É apresentado na Figura 9 uma ilustração do efeito do campo elétrico no alongamento das gotículas.

Figura 9 – Gotas de 120  $\mu\text{L}$  com condutividade de 0,012 mS/cm submetidos a diferentes intensidade de campo elétrico uniforme.



Fonte: adaptado de Reis, Lopes e Silva (2017).

De acordo com Gorur (2003) e EPRI (2006), a perda de hidrofobicidade não é um indicativo suficiente para retirada do isolador de operação. Porém, a perda de hidrofobicidade aumenta a probabilidade de criação dos caminhos condutivos sobre a superfície do isolador, elevando a corrente de fuga e, conseqüentemente, a ocorrência de descargas superficiais de maior intensidade. Esse processo provoca degradação do polímero e possibilita a ocorrência de uma disrupção elétrica do isolador.

### 2.2.3 Considerações sobre o Processo de Flashover em Isoladores Poliméricos

O processo da formação de arcos de contorno em isoladores poliméricos é explicado em dois artigos (SHAH; KARADY; BROWN, 1995a; SHAH; KARADY; BROWN, 1995b) que propõem um mecanismo para formação do *Flashover* em superfícies poliméricas, conforme apresentado a seguir.

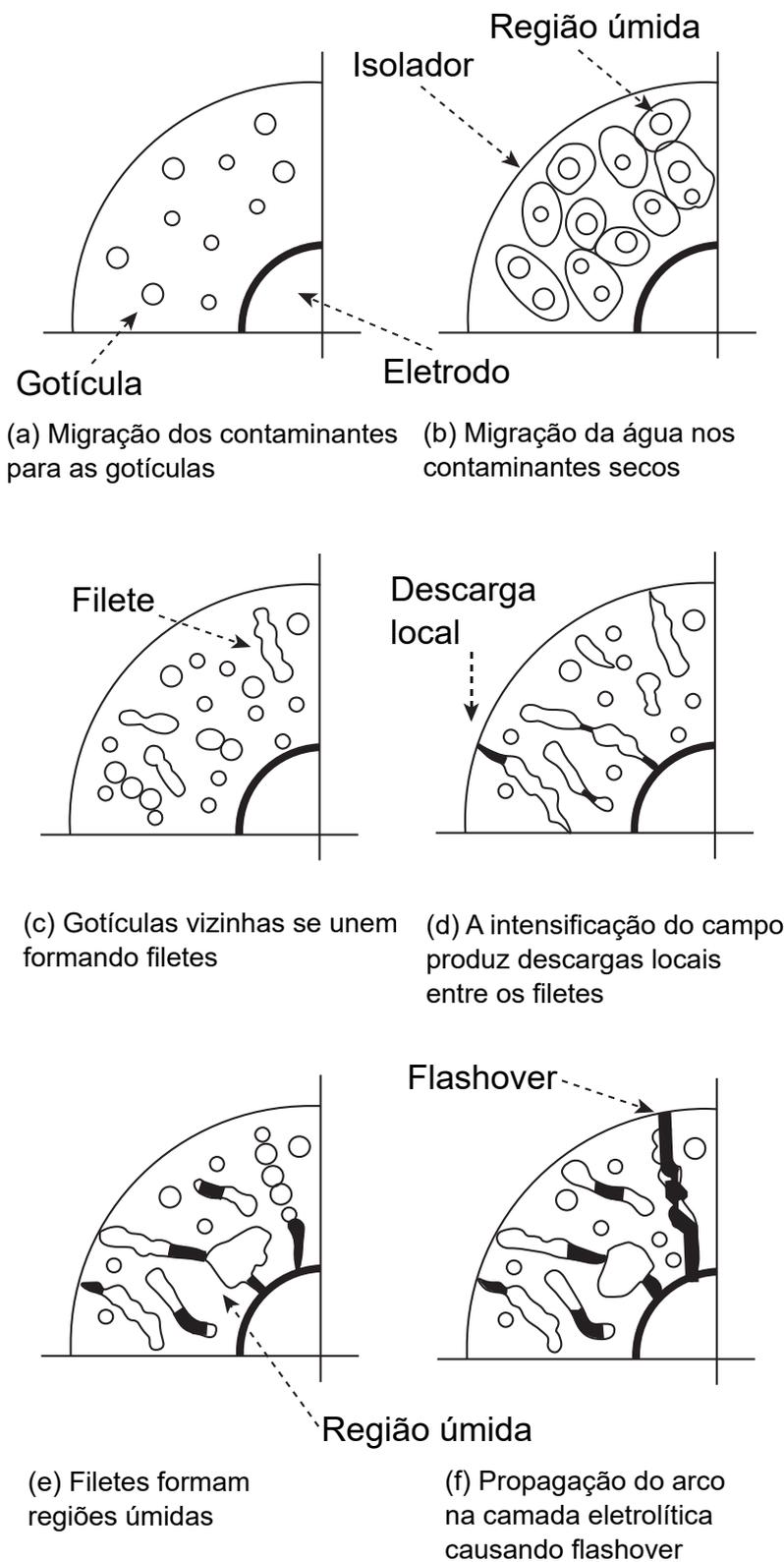
1. Processo de contaminação: a primeira fase consiste na acumulação de poluentes na superfície do isolador polimérico. Essa fase pode ocorrer de duas maneiras a depender do local:
  - a) *Regiões próximas a mares e oceanos*: o vento transporta gotículas de água com sais dissolvidos. A superfície hidrofóbica será coberta por essas gotículas. Após o processo de evaporação das gotículas, a superfície do isolador estará coberta com pontos de contaminação.
  - b) *Regiões distantes de mares e oceanos*: o vento transporta poeira ou poluição industrial, essas partículas se depositam ao longo da superfície do isolador. Alguns contaminantes possuem substâncias que aderem a superfície do isolador.
2. Difusão das cadeias de LMW: moléculas de baixo peso do polímero migram para a superfície do material, ocorrendo assim a formação de uma camada fina tipo-treliça por cima da camada de poluição. Esse comportamento assegura que a superfície recupere as características hidrofóbicas caso fique de dez a doze horas sem a presença de arcos elétricos.
3. Umidificação da superfície: o processo de umidificação da superfície do isolador polimérico ocorre de duas maneiras:
  - a) *Migração dos contaminantes para as gotículas*: orvalho, névoa, chuva leve ou alta umidade, produzem gotículas de água na superfície hidrofóbica do isolador polimérico. O processo de difusão conduz os contaminantes através das finas cadeias de baixo peso molecular do material polimérico. O sal dos poluentes se dissolve nas gotículas, tornando-as condutivas, conforme apresentado na Figura 10a.
  - b) *Migração da água para os contaminantes secos*: o processo de difusão conduz a água das gotículas através da superfície polimérica até os contaminantes secos. Esse processo provoca a formação de uma camada resistiva ao redor de cada gota, conforme apresentado na Figura 10b.
4. Aquecimento por efeito joule: a tensão elétrica leva a uma corrente de fuga através da camada resistiva. Desde que o eletrólito tenha um coeficiente térmico negativo, a resistência irá decrescer devido ao aquecimento. Simultaneamente,

evaporação e perda da umidade aumentam a resistência da superfície. Os dois fenômenos opostos atingem o equilíbrio em um nível menor de corrente de fuga. Ao final desta etapa, a superfície polimérica do isolador está coberta por uma camada resistiva, a qual é constituída de gotas condutivas.

5. Efeito do campo elétrico nas gotículas de água: a interação entre o campo elétrico e as gotas produzem uma força oscilante, que achata e alonga as gotículas, até que se unem formando filetes. Os filetes são regiões condutivas cercadas de áreas resistivas. A formação de filetes ocorre de maneira aleatória ao longo da superfície.
6. Descargas locais: os filetes reduzem a distância entre os pontos de aplicação de tensão, que levam ao aumento do campo elétrico em filetes adjacentes. Essa intensificação de campo produz descargas locais entre os filetes. As descargas locais ocorrem de maneira aleatória na superfície.
7. Perda da hidrofobicidade: a perda das características hidrofóbicas da superfície polimérica durante o processo pode ocorrer por duas razões:
  - a) *Alongamento dos filetes*: as descargas locais consomem a superfície polimérica ao redor das gotículas e degrada a hidrofobicidade. Redução da hidrofobicidade une os filetes. O alongamento dos filetes resulta numa intensificação do campo elétrico e o surgimento de descargas locais no final dos mesmos.
  - b) *Aumento da superfície coberta por umidade*: campo elétrico intenso ao redor dos locais de aplicação da tensão elétrica produzem corona e descargas superficiais. Essas descargas localizadas degradam as propriedades hidrofóbicas do material, aumentando a superfície coberta pela umidade.
8. Flashover: o aumento do comprimento dos filetes e da superfície coberta pela umidade finalmente forma um caminho eletrolítico condutivo, contornando o isolador. Essa superfície de água condutiva provê um caminho para o arco se desenvolver caso o campo elétrico do arco seja inferior ao do filete. O arco se propaga na superfície da camada eletrolítica, levando ao *flashover*.

Na Figura 10, é ilustrado o processo de formação do *Flashover* em superfícies hidrofóbicas poluídas, conforme apresentado por Karady, Shah e Brown (1995).

Figura 10 – Processo de formação de arco em superfície polimérica hidrofóbica poluída.



Fonte: adaptado de Farzaneh e Chisholm (2009 apud KARADY; SHAH; BROWN, 1995).

#### **2.2.4 Considerações sobre Envelhecimento e Degradação em Isoladores Poliméricos**

Segundo Kloes e Koenig (1996), o processo de envelhecimento possui dois estágios, denominados de estágio inicial de envelhecimento e estágio avançado de envelhecimento. O primeiro estágio introduz condições específicas para o desenvolvimento do processo de envelhecimento, que se agravam no segundo estágio.

O estágio inicial de envelhecimento ocorre com superfícies orgânicas estressadas por um nível relativamente baixo de poluição, porém com um estresse elétrico considerável. Nesse estágio existe pouca corrente de fuga superficial e baixa dissipação de energia. O polímero ainda possui um alto nível de hidrofobicidade, porém com a presença de contaminação, umidade e estresse elétrico, podem ocorrer descargas com baixa energia entre as chamadas micro bandas secas.

O estágio avançado de envelhecimento começa quando bandas secas surgem e estão relacionadas com o valor limite para formação das mesmas devido ao aumento da corrente de fuga. Descargas de alta energia sobre as bandas secas podem produzir trilhamento e erosão. Eventualmente o arco de contorno no isolador irá ocorrer. Na Figura 11, são apresentados os estágios do processo de degradação.

De acordo com Domingues (2012), a degradação influencia o desempenho mecânico e elétrico dos isoladores. Do ponto de vista do processo de descargas superficiais, alguns processos adicionais podem ser responsáveis por sua ocorrência, tais como: descargas corona e variações na temperatura, conforme apresentado na Figura 12.

Vários são os tipos de modificações que podem ocorrer no isolador polimérico, desde as mais brandas, em que não existe a necessidade de tomada de ação, até as mais prejudiciais, que levam à retirada do isolador em operação. Segundo o EPRI (2006), é possível classificar o estado dos isoladores em quatro níveis diferentes, conforme apresentado na Tabela 4.

Segundo Queiróz (2013), dentre as diversas transformações na superfície do isolador, que podem ser ocasionadas pelas descargas superficiais, as que são mais prejudiciais ao seu funcionamento e levam a necessidade de substituição desses equipamentos são:

Figura 11 – Visão geral com relação aos estágios do processo de degradação.

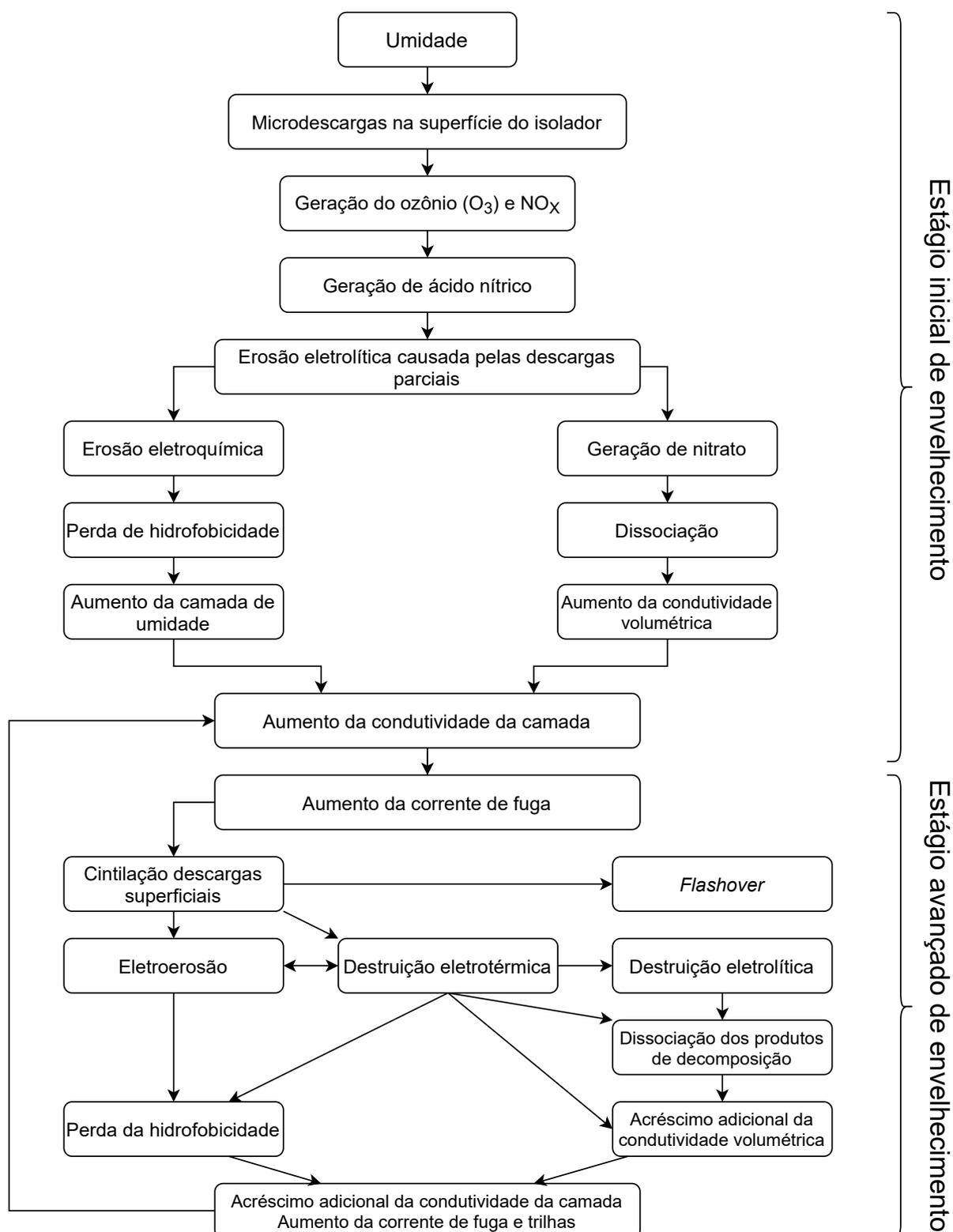
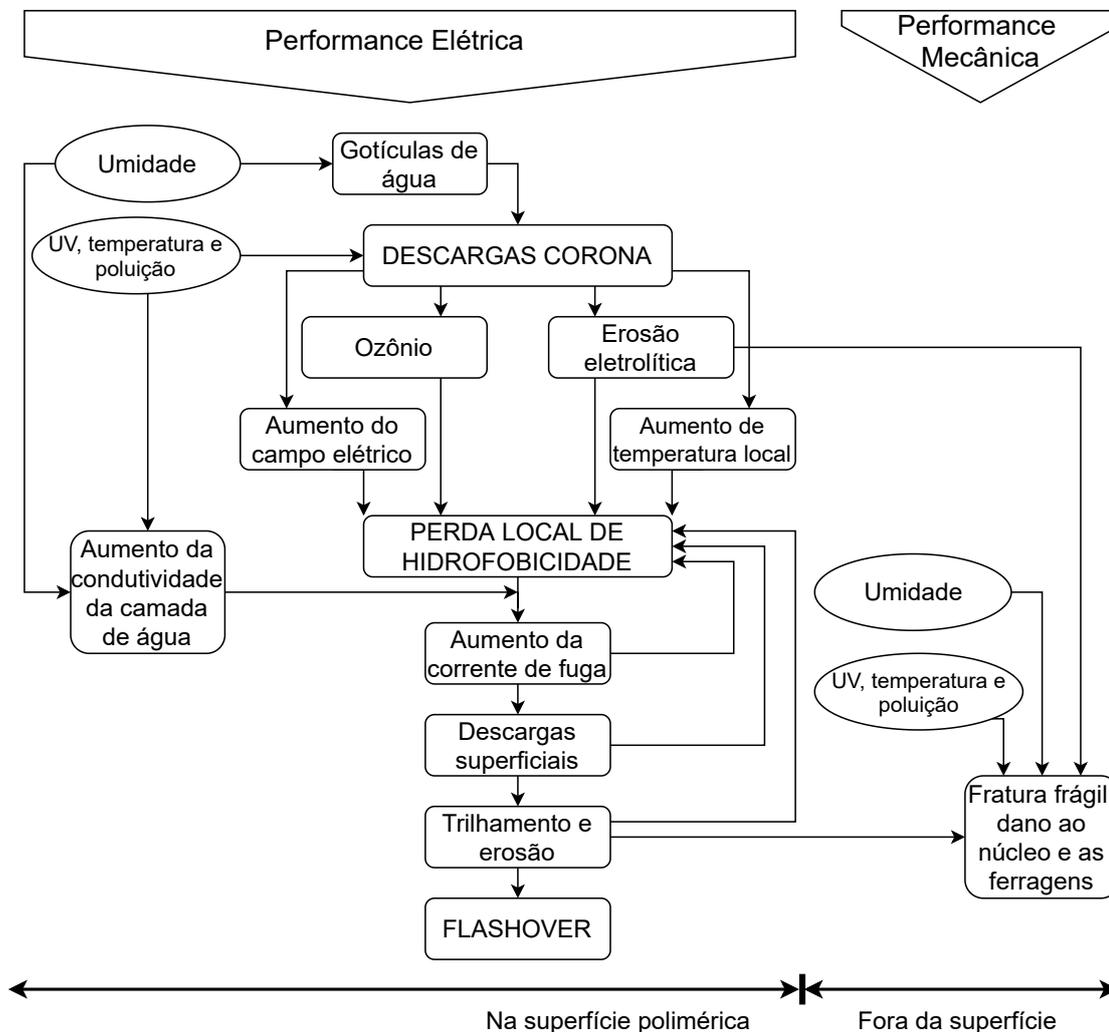


Figura 12 – Processos importantes associados com as descargas nas superfícies poliméricas.



Fonte: adaptado de Domingues (2012).

Tabela 4 – Níveis de prioridade de manutenção de isoladores poliméricos.

Prioridade de Manutenção	Definição
A	Bom ou novo. Sem necessidade de tomada de ação.
B	Baixo grau de dano, desgaste, deterioração. Monitorar evolução da degradação.
C	Grau moderado de dano, desgaste, deterioração. Considerar substituição.
D	Alto grau de dano, desgaste, deterioração. Remover isolador de serviço.

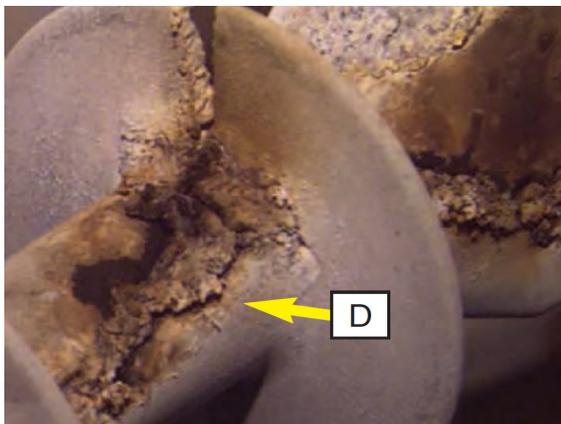
Fonte: adaptado de EPRI (2006).

- Trilhamento e carbonização: degradação irreversível que consiste na formação de um caminho condutor presente na superfície do material polimérico. Possui aparência carbonizada e é de difícil remoção, continuando a conduzir mesmo quando o revestimento está seco. É causado normalmente devido à presença de alta corrente de fuga quando a superfície está contaminada. O caminho condutor formado indica uma fragilidade do revestimento polimérico e facilita a ocorrência do *flashover*.
- Dano por arco de contorno: descargas elétricas são fenômenos temporários caracterizados por correntes elevadas que produzem um aumento de temperatura substancial no isolador. Uma das regiões mais afetadas, na ocorrência deste fenômeno, é a interface de conexão entre os terminais metálicos e o revestimento polimérico, devido a alta presença de campo elétrico. A deterioração deste ponto pode levar a exposição do núcleo, que em contato com água e sob a presença de atividade elétrica levam ao rompimento do mesmo.
- Erosão: são considerados erosões danos cuja profundidade por perda de material polimérico, no revestimento, passar de um milímetro. Nesse cenário, a diminuição na espessura do revestimento leva a fragilização da resistência do material contra as agressões dos entes de degradação, o que pode levar a exposição do núcleo.
- Exposição do núcleo: é definido como a exposição do núcleo de fibra de vidro ao ambiente exterior, ocasionados por fenômenos que deterioram o revestimento polimérico do núcleo tais como: erosão, trilhamento, perfuração, projéteis, desuniões, mal manuseio ou instalação, dentre outros. Ocorre em casos de intensa atividade elétrica na superfície do revestimento, lugares com a presença de poluição severa ou fraca qualidade do material polimérico.
- Fratura frágil: consiste em uma falha mecânica na qual o isolador é rompido transversalmente, podendo levar o condutor ao solo. Inicialmente, condições ambientais levam à ruturas das fibras de vidro, devido a infiltração química no interior do isolador, que evoluem ao ponto de originar fraturas internas que se desenvolvem transversalmente ao eixo axial. Essas fraturas prolongam-se até o momento que a seção não suporta a tensão exigida e quebra.

Na Figura 13 são apresentados ilustrações dos defeitos mencionados. A letra D indica que os defeitos apresentados necessitam da substituição dos isoladores.

Figura 13 – Ilustrações de defeitos encontrados em isoladores poliméricos.

(a) Trilhamento.



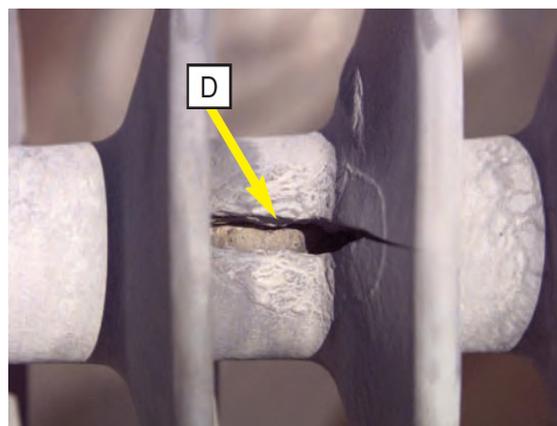
(b) Dano por contornamento.



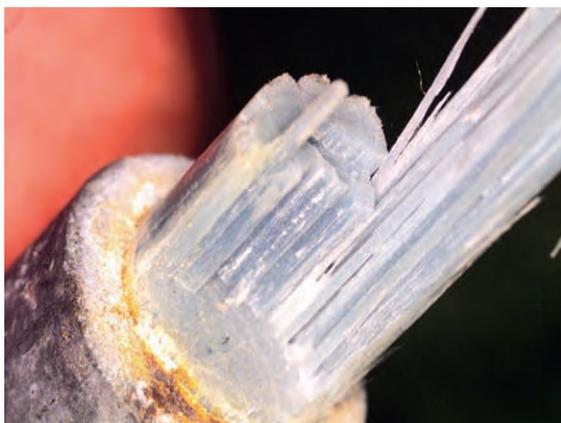
(c) Erosão.



(d) Exposição do núcleo.



(e) Fratura frágil.



(f) Fratura frágil.



Fonte: EPRI (2006).

Vale lembrar que sistemas diagnósticos devem atuar na indicação de problemas antes dos mesmos levarem ao colapso do isolador para uma adequada tomada de decisão, sejam elas: lavagem dos isoladores, aumento da frequência de monitoração

ou substituição do isolador.

## 2.3 DISTRIBUIÇÃO DE POTENCIAL EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

Nesta seção são apresentadas os conhecimentos necessários para o entendimento da principal grandeza elétrica utilizada nesta pesquisa.

### 2.3.1 Considerações Referentes ao Potencial Elétrico

Os conceitos, bem como as equações, apresentados nesta seção foram retirados de Sadiku (2018). Os problemas de eletrostática podem ser modelados através das equações de Poisson, conforme apresenta a expressão 2.2 e Laplace, expressão 2.3, que são utilizadas para a determinação do potencial ao longo de todo o problema: superfície, interior e meio envolvente. Posteriormente podem ser utilizados métodos numéricos para resolução de tais equações em ambientes computacionais.

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.2)$$

em que,  $\rho_v$  é a densidade volumétrica de carga [ $C/m^3$ ];  $\epsilon$  permissividade absoluta do material [ $F/m$ ] e  $V$  é o 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:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.3)$$

também é possível o caminho inverso, ao ter conhecimento da distribuição de potencial obter o campo elétrico relacionado a este potencial, conforme apresentado pela expressão 2.4.

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (2.4)$$

na expressão 2.4 é apresentado que o campo elétrico é o gradiente do potencial elétrico. O sinal negativo indica que a direção do vetor campo elétrico é oposta a direção do crescimento do valor do potencial. A expressão 2.4 é válida para campos eletrostáticos, ou seja, aqueles em que as cargas estão em repouso. Para situações nas quais as cargas estão em movimento a expressão 2.5 deve ser utilizada nas análises.

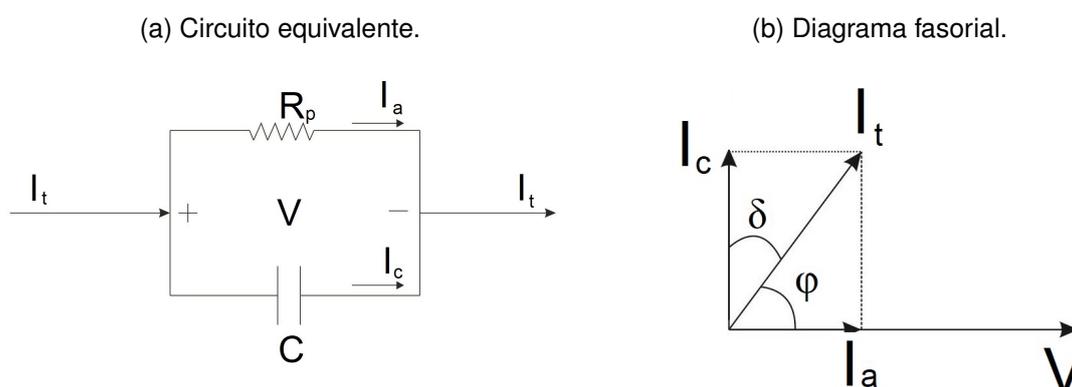
$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.5)$$

em que,  $\vec{A}$  é chamado de vetor de potencial magnético [ $\frac{Wb}{m}$ ] e  $t$  é o tempo [ $s$ ]. O vetor potencial magnético é uma grandeza dependente da densidade de corrente, logo, o campo elétrico para situações em que possui movimento de cargas é dependente da intensidade da corrente elétrica.

### 2.3.2 Distribuição de Potencial em Isoladores

Pode-se modelar o comportamento de um isolador submetido a poluição e umidade através de uma representação a parâmetros concentrados, conforme apresentado na Figura 14. Nesse modelo,  $C$  equivale a capacitância oriunda do dielétrico que compõe o isolador e  $R_p$  a presença de uma camada resistiva composta de poluição e umidade.

Figura 14 – Modelo a parâmetros concentrados do isolador na presença de uma camada resistiva composta por poluição e umidade.



Fonte: adaptado de Bezerra et al. (2003).

Na Figura 14,  $I_t$  é a corrente total no dielétrico.  $I_a$  é a corrente apenas na resistência, ou seja, é a componente resistiva da corrente total.  $I_c$  é a corrente apenas no capacitor, ou seja, é a componente capacitiva da corrente total. O ângulo  $\delta$  também é conhecido como ângulo de perdas do material dielétrico, já o ângulo  $\phi$  é o ângulo de fase.

O isolador em conjunto com a poluição e umidade pode operar em três regimes: capacitivo, capacitivo-resistivo e resistivo. No regime de operação capacitivo a componente capacitiva da corrente total é predominante. Esse é o regime de operação que ocorre quando o isolador está submetido a baixa umidade. O segundo regime de operação é o capacitivo-resistivo, em que as componentes capacitiva e resistiva

possuem o mesmo grau de influência ao compor a corrente total. Caracteriza a transição de um regime capacitivo para o resistivo. Por fim, tem-se o regime resistivo de operação. Nesse regime a componente resistiva da corrente total é predominante. O isolador normalmente opera nesse regime caso a resistência da camada de poluição seja inferior a  $10^8 \Omega$  (CHAKRAVORTI; MUKHERJEE, 1993).

### 2.3.2.1 Distribuição de Potencial em Isoladores no Regime Capacitivo

Para explicar o modo como a distribuição de potencial se comporta ao longo de uma cadeia de isoladores cerâmicos, um modelo elétrico a capacitores foi desenvolvido, no início do século vinte, por Schwaiger (1925). Esse modelo é amplamente difundido e aceito por diversos autores em suas respectivas obras (EPRI, 1975; FUCHS, 1977).

O modelo consiste em uma análise a parâmetros concentrados, representados em um circuito equivalente composto por um conjunto de capacitores em série que representam a capacitância de cada isolador da cadeia, representado por  $C$ . Juntamente com essas capacitâncias próprias de cada isolador, estão presentes capacitores *shunt*, estes podendo estar relacionados com a capacitância de um isolador, ao solo, ou seja o potencial de referência, sendo representado pela letra  $c$ , ou ao condutor, tensão elétrica da rede, sendo representado pela letra  $k$ . Na Figura 15 é apresentado o circuito equivalente de uma cadeia de  $z$  isoladores.

O potencial elétrico presente em cada um dos isoladores da cadeia pode ser obtido através da expressão 2.6, em que é determinado o valor do potencial elétrico na  $n$ -ésima unidade em função de grandezas como tensão aplicada à cadeia e das capacitâncias  $c$ ,  $C$  e  $k$ :

$$V_n = \frac{V_g}{\beta^2 \sinh \beta z} \left( \frac{c}{C} \sinh \beta n + \frac{k}{C} \sinh \beta (n - z) + \frac{k}{C} \sinh \beta z \right) \quad (2.6)$$

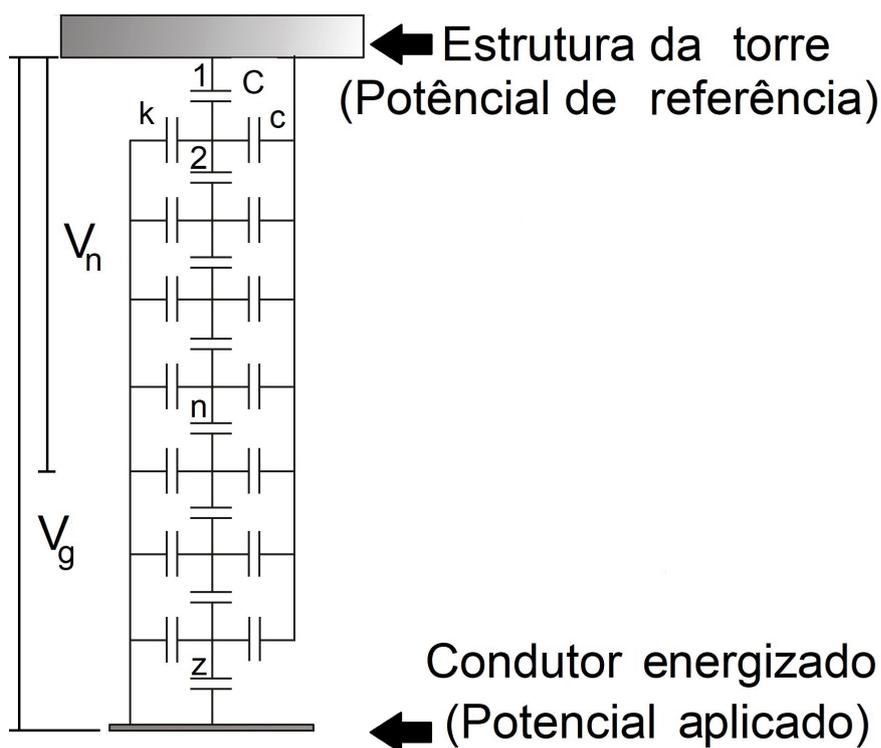
em que,  $V_n$  representa a tensão elétrica em que está submetida a  $n$ -ésima unidade a contar do lado aterrado [V];  $V_g$  é a tensão total a qual a cadeia está submetida [V];  $C$  consiste na capacitância entre a campânula e o pino do isolador, ou seja é a capacitância própria do isolador [F];  $c$  representa a capacitância de uma unidade com relação ao solo [F];  $k$  representa capacitância de uma unidade ao condutor [F];  $n$  é o identificador do capacitor na cadeia capacitiva e  $z$  é a quantidade de isoladores na cadeia. O parâmetro  $\beta$  é resultante do processo de obtenção da expressão 2.6 e

consiste no expoente da solução de equações diferenciais. A expressão 2.7 pode ser utilizada para determinar o valor de  $\beta$  em função de  $c$ ,  $C$  e  $k$ .

$$\beta = \sqrt{\frac{c+k}{C}} \quad (2.7)$$

na Figura 16, são apresentadas algumas curvas da família derivada da expressão 2.6. O eixo das abscissas representa a porcentagem do comprimento da cadeia de isoladores, enquanto o eixo das ordenadas é a relação entre a tensão em cada unidade e a tensão total aplicada  $\frac{V_n}{V_g}$ . Em outras palavras a Figura 16 apresenta a distribuição de potencial elétrico ao longo da cadeia com a variação dos parâmetros.

Figura 15 – Circuito equivalente de uma cadeia de  $z$  isoladores no regime capacitivo.



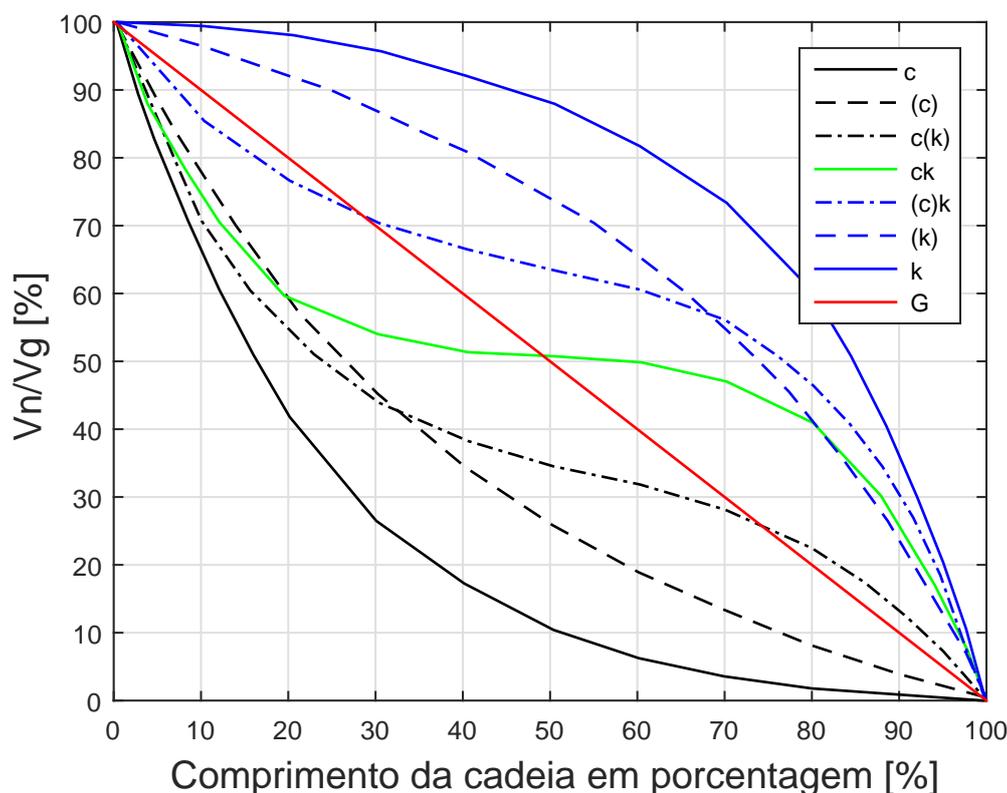
Fonte: adaptado de Fuchs (1977).

As curvas apresentadas na Figura 16 variam em função dos valores das capacitâncias  $k$  e  $c$ . Por exemplo, a curva indexada por  $ck$  é o comportamento da distribuição de potencial quando os valores das capacitâncias  $c$  e  $k$  são iguais, tornando a curva simétrica ao ponto de inflexão da mesma. A curva indexada por  $k$  representa o caso em que as capacitâncias  $c$  são iguais a zero, da mesma forma que a curva indexada por  $c$  representa o caso em que as capacitâncias  $k$  são nulas. A reta  $G$

apresenta o caso em que tanto as capacitâncias  $k$  como as  $c$  são nulas. Esses casos, em que alguma capacitância *shunt* possui valor zero não são encontrados na prática, visto que para que ocorrem seria necessário a inexistência da influência do ambiente, ao redor da cadeia de isoladores, na distribuição de potencial.

O mais comum é a obtenção de distribuição de potencial segundo uma das curvas presentes entre os casos das curvas indexadas por  $(c)$  e  $G$ . Pode-se concluir, então, que essas capacitâncias são influenciadas por diversos fatores tais como: geometria da torre a qual o isolador está instalado, distâncias dos condutores à torre, comprimento da cadeia de isoladores, catenária formada pelo condutor, presença de anéis equalizadores, material que compõe o isolador, dentre outros aspectos, levando a diferentes formas de distribuição de potencial no regime capacitivo.

Figura 16 – Distribuição de potencial ao longo de uma cadeia de isoladores ao variar  $c$  e  $k$ .



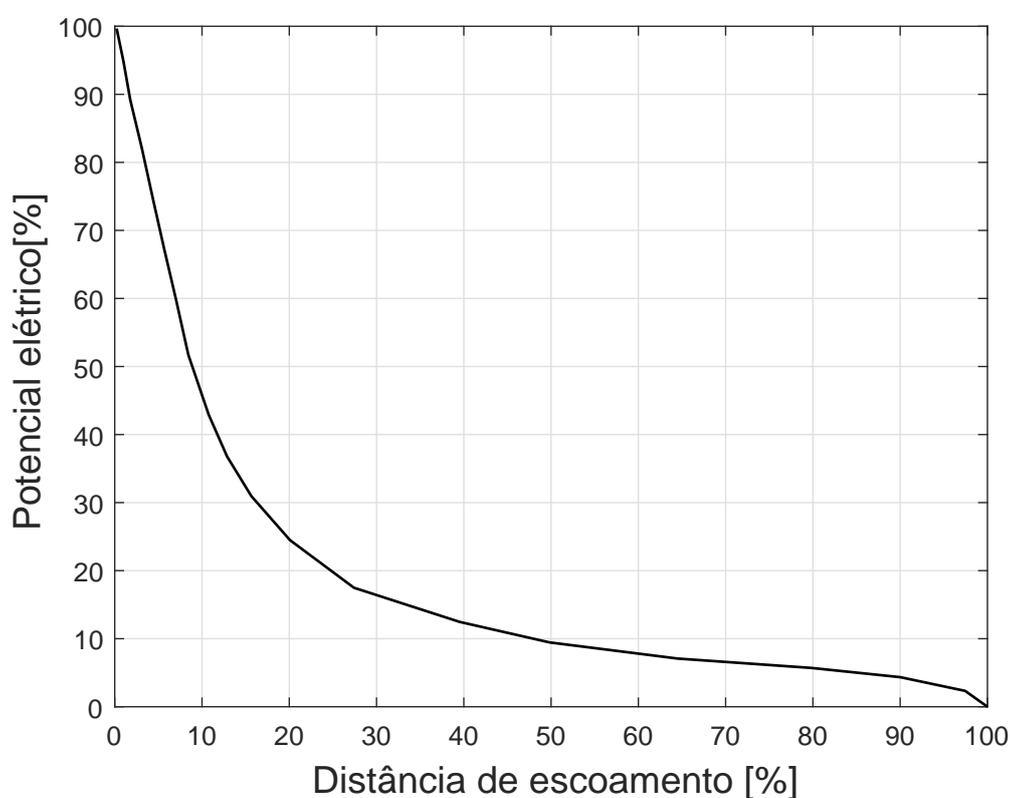
Fonte: adaptado de Schwaiger (1925).

O modelo desenvolvido por Schwaiger (1925) representa bem o comportamento da distribuição de potencial em isoladores cerâmicos, cadeias de suspensão de vidro ou porcelana, devido a característica metal-dielétrico-metal desses equipamentos, em

que cada trecho metal-dielétrico-metal pode ser representado por uma capacitância. No caso de isoladores poliméricos, essa representação pode não ser a ideal, apesar de existir pesquisas fazendo uma correlação com esse modelo e a distribuição de tensão em isoladores poliméricos, apresentando resultados promissores, conforme apresentado por Ferreira, Lopes e Bezerra (2018).

Na Figura 17, é apresentado um exemplo ilustrativo do comportamento da distribuição de potencial elétrico em isoladores poliméricos.

Figura 17 – Distribuição de potencial ao longo de um isolador polimérico.



Fonte: adaptado de Zhao, Xu e Qi (2016).

Para determinação da distribuição de potencial elétrico em isoladores poliméricos, é mais prudente a utilização das expressões 2.2 a 2.5, que podem ser aplicadas em problemas de condição de contorno. Essas expressões também podem ser utilizadas para determinação da distribuição de potencial em isoladores cerâmicos sendo até mais indicados do que o modelo desenvolvido por Schwaiger (1925), tendo em vista que esse modelo é a parâmetros concentrados. No modelo, representado pela Figura 15, todas as características do problema são reduzidas a capacitâncias, não sendo possível uma análise, de maneira contínua, do comportamento da

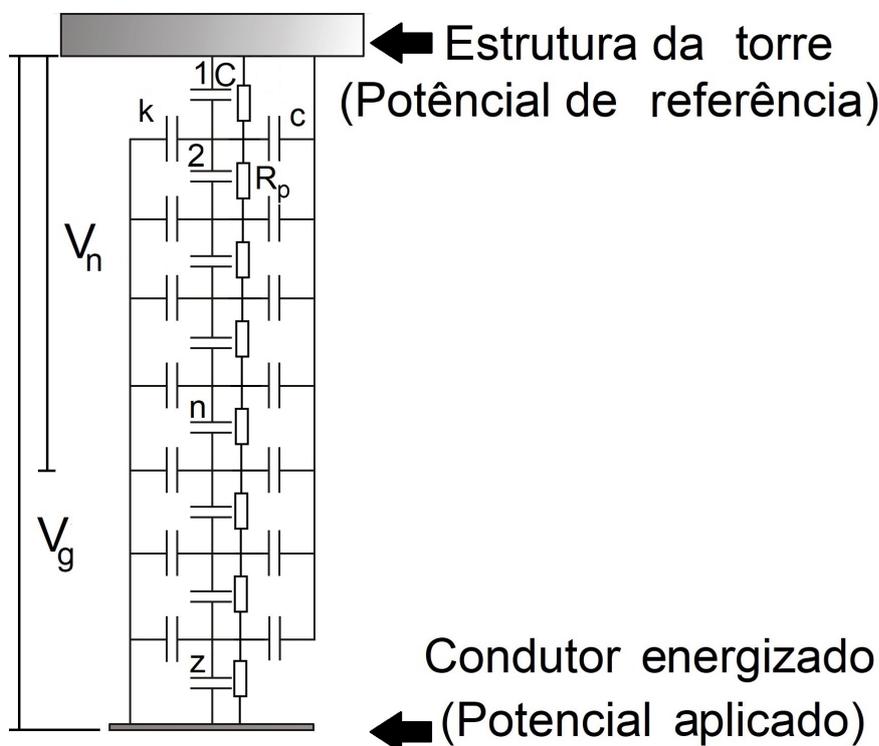
grandeza efetivamente na superfície do isolador, diferentemente de quando aplicado às expressões 2.2 a 2.5.

### 2.3.2.2 Distribuição de Potencial em Isoladores no Regime Resistivo

Na presença da poluição e umidade ocorre a transição de operação do regime capacitivo para o regime resistivo de operação. Essa nova situação operacional pode ser modelada através da incorporação, ao circuito apresentado na Figura 15, de resistores paralelos às capacitâncias série conforme mostrado na Figura 18.

Dentre as características pertinentes a um comportamento predominantemente resistivo tem-se a alteração na amplitude da corrente de fuga, que aumenta nesse regime de funcionamento, bem como na defasagem entre a corrente de fuga e a tensão de alimentação, que entram em fase, e a modificação da distribuição de potencial que começa a se comportar de maneira mais uniforme.

Figura 18 – Circuito equivalente de uma cadeia de  $z$  isoladores no regime resistivo.



Fonte: adaptado de Bezerra et al. (2003).

Os valores das resistências apresentadas na Figura 18 dependem do nível de condutividade da poluição depositada, quanto maior for esse valor, menor será a

resistência, fazendo com que a corrente de fuga através deste ramo do circuito seja maior. A partir de um certo nível de condutividade o valor da corrente resistiva  $I_a$ , apresentada na Figura 14, se torna suficientemente grande de maneira que a corrente  $I_c$  possuirá pouca influência na formação de  $I_t$ , levando o sistema, cadeia de isoladores e camada condutiva, a um comportamento predominantemente resistivo dependente do valor de resistência superficial da camada condutiva.

Visto que cada capacitância  $C$  representa uma unidade de isolador na cadeia,  $R_p$  pode ser visto como a representação da poluição e umidade em cada unidade. Sendo assim, é possível obter o valor da resistência de poluição em função da condutividade por isolador através da expressão 2.8, demonstrada por Rumeli, Hizal e Demir (1981):

$$R_p = \frac{1}{\sigma_s} \sum_{i=1}^n \int_{l_i}^{l_{i+1}} \frac{dl_m}{2\pi r(l_m)} \quad (2.8)$$

em que,  $R_p$  é o valor da resistência de poluição em cada isolador da cadeia [ $\Omega$ ];  $\sigma_s$  representa a condutividade superficial da camada [ $S$ ];  $dl_m$  é a distância de escoamento incremental [ $mm$ ] e  $r$  o raio no comprimento  $dl_m$  [ $mm$ ], constatando assim que o valor da resistência é dependente da condutividade e da geometria do isolador. Vale ressaltar que tanto a Figura 18 como a expressão 2.8 são aplicáveis em isoladores cerâmicos, não tendo sua validade comprovada em isoladores poliméricos.

Nos isoladores poliméricos o levantamento da curva de distribuição de potencial no regime resistivo pode ser realizado através da modelagem por problemas de contorno. O comportamento da camada de poluição e umidade pode ser feito por duas abordagens, a aproximação volumétrica e a aproximação superficial. Lembrando que esta técnica também é válida para isoladores cerâmicos.

A modelagem da camada condutiva por aproximação superficial se baseia em inseri-lá como uma condição de contorno presente na interface entre a superfície do isolador e o ar, bem como com todas as características pertinentes a camada. A expressão que deve ser inserida na condição de contorno é apresentada na expressão 2.9.

$$-d(\sigma_v + j\omega\epsilon)\nabla^2 V = 0 \quad (2.9)$$

em que,  $d$  representa a espessura da camada condutiva [ $m$ ];  $\sigma_v$  é a condutividade volumétrica da camada condutiva [ $\frac{S}{m}$ ];  $\epsilon$  é a permissividade absoluta da camada condutiva [ $\frac{F}{m}$ ] e  $\omega$  é a frequência angular da tensão de alimentação [ $rad/s$ ]. Essa

aproximação é uma boa alternativa para redução do custo computacional do problema, pois reduz a quantidade de elementos a serem calculados. O maior problema em utilizar esta aproximação reside no fato de que a mesma foi desenvolvida para fins de estudos eletrostáticos, ou seja, nos quais não existe o deslocamento de cargas. A inexistência de um meio físico representando a camada condutiva impossibilita estabelecimento de uma corrente. Logo, caso seja necessário uma análise com a influência da corrente elétrica ou campo magnético a mesma não deve ser aplicada.

A modelagem da camada condutiva por aproximação volumétrica consiste em, de fato, modelar uma camada física sobre o isolador. Isso quer dizer que no modelo é necessário a inserção física da camada, como um domínio com todas as características, não sendo mais uma condição de contorno. Dessa forma, a camada será limitada e ocupará espaço de fato no ambiente, em que será necessária a determinação dos potenciais elétricos dentro da camada. Nessa condição, a expressão que governa a camada condutiva, em regime harmônico, pode ser expresso como 2.10, conforme apresentado por Rasolonjanahary, Kraenbuhl e Nicolas (1992).

$$\nabla \cdot \vec{J}_v + j\omega(\nabla \cdot \vec{D}) = 0 \quad (2.10)$$

em que,  $J_v$  é a densidade de corrente volumétrica [ $A/m^2$ ];  $D$  é a densidade de fluxo elétrico [ $C/m^2$ ] e  $\omega$  é a frequência angular de operação [ $rad/s$ ].

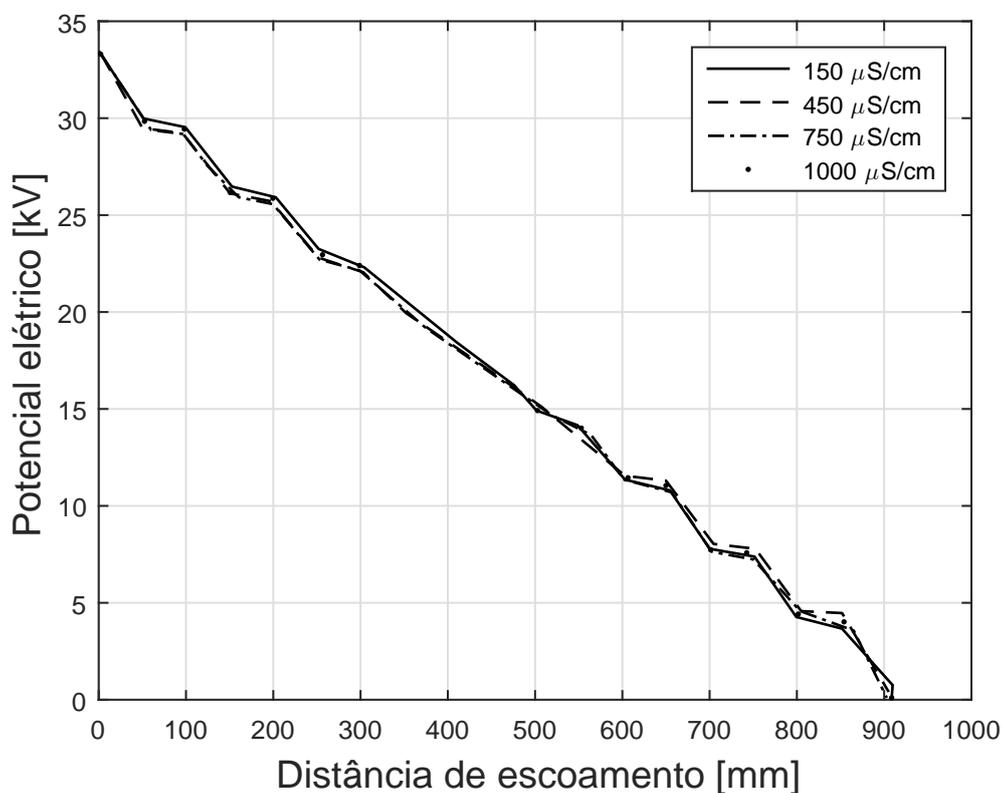
A principal vantagem da aproximação volumétrica é que a mesma possibilita a análise da influência da corrente na distribuição de potencial, podendo assim ser utilizada em problemas de eletrodinâmica e não mais apenas na eletrostática.

Normalmente as dimensões da camada são consideravelmente menores que a dimensão do problema modelado, isso provoca um aumento no número de elementos a serem calculados, levando a um aumento no custo computacional.

Na Figura 19 é possível ver a distribuição de potencial em isolador polimérico usando a aproximação volumétrica, obtido por Arshad et al. (2015).

É possível explicar o comportamento da distribuição de potencial, no regime de operação resistiva, de maneira análoga ao que foi feito no regime capacitivo. Verifica-se na Figura 18 a presença de um caminho composto por resistências no circuito. No regime resistivo é possível considerar que a maior parte das cargas fluem pelas resistências, fazendo com que os componentes *shunts* que drenam a corrente possam ser desconsiderados.

Figura 19 – Distribuição de potencial em isolador polimérico usando a aproximação volumétrica.



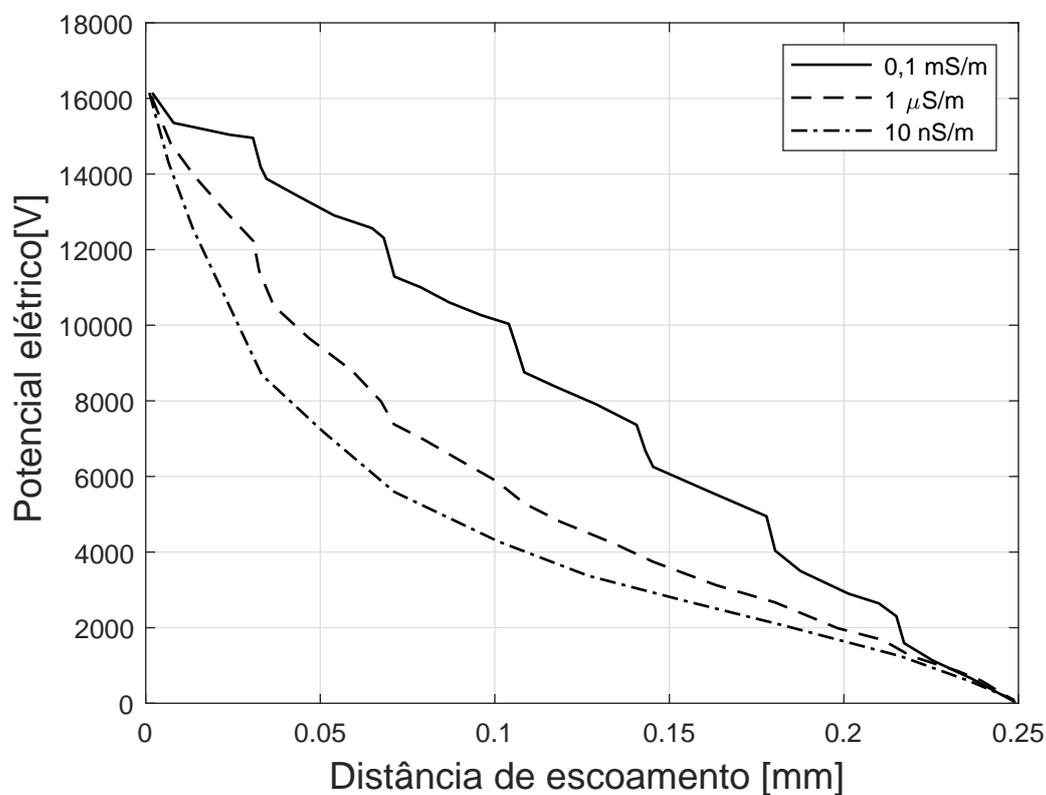
Fonte: adaptado de Arshad et al. (2015).

Desta forma, a corrente resistiva mais próxima ao condutor tem a mesma magnitude daquela presente na resistência mais próxima da estrutura. Se as resistências são iguais, ou aproximadamente iguais, a queda de tensão em cada resistência será a mesma, provocando assim uma distribuição igual de tensão em todas as resistências e, conseqüentemente, uma distribuição que tende a ser linear.

### 2.3.2.3 Distribuição de Potencial em Isoladores no Regime Capacitivo-Resistivo

O regime capacitivo-resistivo consiste em uma região de operação na qual tanto a componente capacitiva, quanto a componente resistiva, possui influência no comportamento da corrente total. Na Figura 20 é apresentado um conjunto de curvas que comparam o comportamento nos diferentes regimes de operação.

Figura 20 – Comparação da distribuição de potencial nos diferentes regimes.



Fonte: adaptado de Volat (2013).

As curvas apresentadas na Figura 20 são resultados da variação da condutividade da poluição. Na curva 0,1 mS/m é representado o comportamento no estado predominantemente resistivo. Todas as outras curvas são resultados do isolador na região de operação capacitivo-resistivo, as vezes mais resistivo, como é o caso das curvas 1  $\mu\text{S}/\text{m}$ , outras vezes mais capacitivos, como nas curvas 10  $\text{nS}/\text{m}$ .

Como o regime de operação capacitivo-resistivo consiste em um regime intermediário entre os dois anteriormente apresentados, capacitivo e resistivo, basta utilizar as técnicas utilizadas nos estudos em regime resistivo, parametrizando de tal forma que a ordem de grandeza das componentes da corrente total sejam suficientes para ambas influenciarem no resultado.

## 2.4 FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

Nesta seção são apresentadas as ferramentas matemáticas utilizadas nesta pesquisa.

### 2.4.1 Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos consiste em uma metodologia para resolução de problemas físicos que podem ser modelados através do uso de equações diferenciais parciais quando, devido à complexidade da geometria do problema, dificilmente seria possível obter uma solução analítica com certo grau de exatidão. Esse método foi desenvolvido no início do século XX, em que, originalmente, fora aplicado para análise de problemas referentes a mecânica e estrutura de meios contínuos (SADIKU, 2018). Atualmente, o MEF é utilizado para resolução de problemas complexos em diversas áreas, através do uso de várias plataformas de simulação que facilitam sua aplicação (AZEVEDO, 2003).

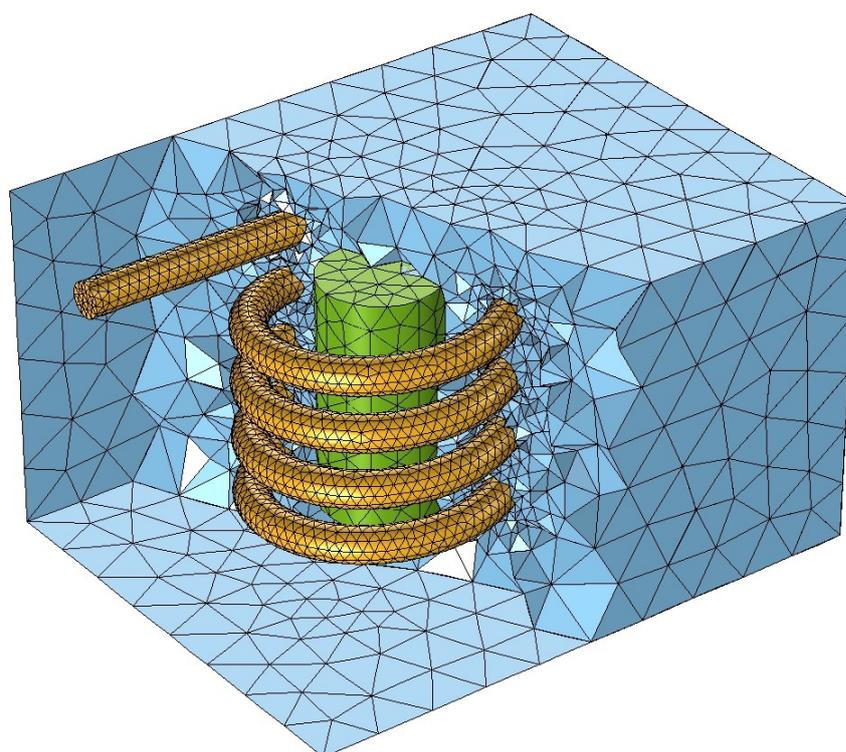
O MEF parte da premissa de que o problema pode ser subdividido em uma quantidade finita de elementos discretos, esses elementos podem ser organizados de diversas formas para representar uma geometria. Na Figura 21 é apresentado um modelo de uma bobina, em três dimensões, sendo subdividida em elementos finitos.

Segundo Bastos e Sadowski (2003), a resolução de problemas utilizando o método dos elementos finitos pode ser dividida em três etapas sequenciais. Estas etapas são adotadas por boa parte dos *softwares* de elementos finitos:

1. Pré-processamento: etapa na qual os dados gerais do problema a ser modelado são inseridos, tais como: a geometria do problema e, conseqüentemente, seus domínios e regiões, os materiais pelos quais cada domínio é composto, as condições de contorno, a natureza do problema em questão e as equações que representam o fenômeno estudado. Após todas essas definições, a malha que discretiza o problema é gerada.
2. Processamento: é nessa etapa que ocorre a aplicação do método dos elementos finitos. Utiliza-se o domínio do problema, discretizado através da malha, que resulta na formação de um sistema de equações a serem resolvidas através de análise numérica.

3. Pós-processamento: consiste na etapa em que os resultados são apresentados. Tais resultados podem ser configurados para serem exibidos segundo a necessidade do usuário, sejam gráficos em duas ou três dimensões. Também podem ser feitas análises sobre a grandeza obtida como média, desvio padrão, moda, dentre outras informações a serem obtidas.

Figura 21 – Exemplo de objeto em três dimensões subdividido em elementos finitos.



Fonte: Frei (2015).

Nota-se, avaliando as expressões apresentadas na seção 2.3, que o problema de determinação da distribuição de potencial pode ser modelado como um sistema de equações diferenciais parciais. Associado a isso, os problemas a serem resolvidos neste trabalho possuem geometrias complexas tornando o MEF uma excelente opção.

#### 2.4.2 Coeficiente de Determinação

O coeficiente de determinação apresenta o quanto um modelo foi, ou é, capaz de representar um conjunto de dados coletados. Normalmente se refere ao coeficiente de determinação por  $R^2$ , este valor deve estar presente na faixa entre zero e um, quanto mais próximo de um significa que o modelo melhor explica os dados, quanto mais

próximo de zero indica que o modelo não é adequado para explicação dos dados. Na expressão 2.11 é apresentada a forma como é possível obter o valor de  $R^2$  (DEVORE, 2016).

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.11)$$

em que,  $SQE$  somatório do quadrado das diferenças entre os dados coletados  $y_i$  e o modelo analisado  $\hat{y}_i$ , também conhecido como soma dos quadrados dos erros, e  $SQT$  é o somatório do quadrado das diferenças entre os dados coletados  $y_i$  e a média desses dados  $\bar{y}$ , conhecido também como soma dos quadrados totais. Apresenta-se na Figura 22 uma ilustração para melhor compreensão do que se trata os valores  $SQE$  e  $SQT$ .

Como exemplo pode dizer que um conjunto de dados que possui o coeficiente de determinação igual a 0,697 significa que o modelo explica 69,7% da variância da variável em estudo a partir dos regressores, incluídas naquele modelo. Para este trabalho será considerado uma boa representação de uma curva, valores de  $R^2$  iguais ou acima de 0,95.

## 2.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

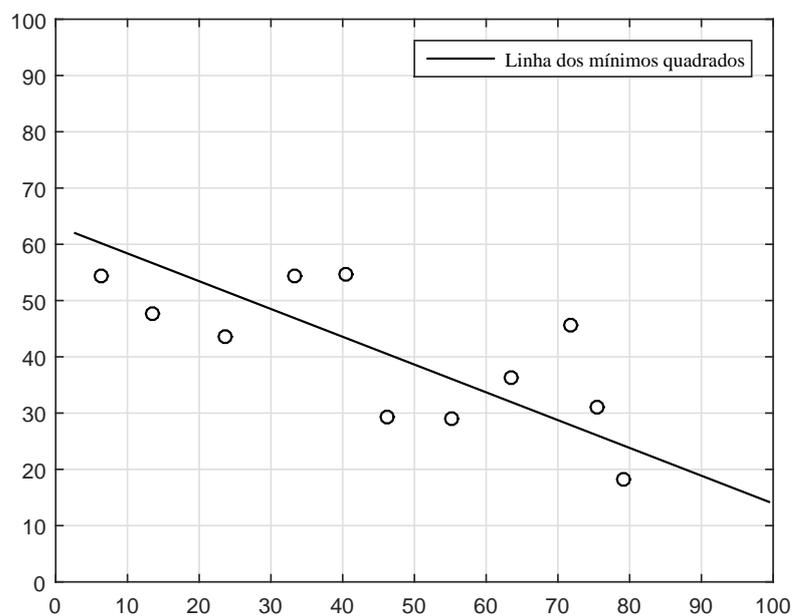
Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos necessários ao entendimento deste trabalho. Foram descritas as principais características dos isoladores poliméricos, tais como: aspectos construtivos, vantagens e desvantagens.

Em seguida, considerações sobre o desempenho dos isoladores poliméricos submetidos a poluição e umidade foram abordados. Mostrou-se a influência da perda das características hidrofóbicas e sua relação com o processo de descargas superficiais e conseqüente degradação do isolador.

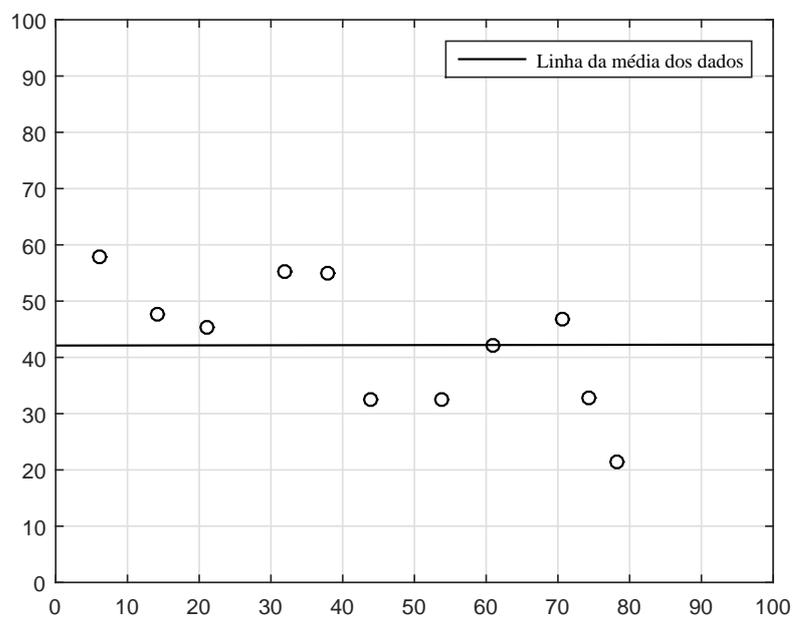
A teoria referente à distribuição de potencial elétrico em isoladores poliméricos foi apresentada, com destaque para o comportamento da distribuição de potencial em diferentes condições de operação, bem como os métodos para representar um caminho condutivo juntamente com o isolador.

Figura 22 – Ilustração explicativa sobre SQE e SQT.

(a) SQE.



(b) SQT.



Fonte: adaptado de Devore (2016).

Por fim, foram expostas ferramentas matemáticas úteis neste trabalho: o MEF, utilizado para obter a distribuição de potencial ao longo do isolador, e o coeficiente de

determinação, utilizado como critério para definir o quanto as curvas de distribuição de potencial se aproximam de um perfil linear.

No próximo capítulo é exposto uma revisão das pesquisas relacionadas ao tema apresentado. Estão presentes aquelas que mais serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentadas as principais pesquisas referentes à concepção de sistemas de monitoração em isoladores que utilizam da distribuição de potencial como parâmetro de monitoração, bem como as pesquisas sobre modelos visando calcular o potencial elétrico ao longo da superfície de isoladores sob diferentes circunstâncias. Deve-se notar que as pesquisas aqui apresentadas são aquelas que formaram a base para o desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 PRINCIPAIS PESQUISAS

Esta seção está dividida em dois itens: distribuição de potencial como parâmetro de monitoração em isoladores e modelos para cálculo da distribuição de potencial em isoladores. Em cada item as pesquisas apresentadas estão nas respectivas ordens cronológicas.

##### 3.1.1 Distribuição de Potencial como Parâmetro de Monitoração em Isoladores

A utilização direta da distribuição de potencial como parâmetro de monitoração é normalmente empregada em isoladores de porcelana. Devido à opacidade deste material, problemas internos no isolador podem não ser diagnosticados através de uma inspeção visual, porém distorcem o potencial elétrico ao longo do isolador, possibilitando assim a constatação desses problemas. Em isoladores de vidro, essa grandeza é menos utilizada, visto que ao apresentar algum defeito, mesmo internamente, o mesmo é passível de verificação visual, não sendo necessária a utilização desta técnica. O uso em isoladores poliméricos é limitado, devido ao fato de que um isolador polimérico não é composto de uma estrutura "metal-dielétrico-metal". Sendo assim é difícil determinar qual seria a melhor localização para realização da medição do potencial, bem como as dificuldades inerentes à medição de tensão elétrica em uma superfície polimérica.

A técnica mais comum empregada na utilização do potencial elétrico para monitoração é o chamado *buzz method*, método do zumbido em português. Pelo fato de não ter sido encontrado o autor deste método, mas devido a sua importância sendo aplicado em linhas de transmissão, vale a menção e considerações ao seu respeito. O método do zumbido é baseado na formação de uma centelha quando duas

partes metálicas, com diferentes níveis de potencial elétrico, são curto-circuitadas. Essa centelha provoca um zumbido, dando origem assim ao nome do método. O dispositivo utilizado para aplicação desta técnica consiste em um eletrodo metálico em formato de 'U' conectado a um bastão isolante por meio de uma ferragem metálica (BELLERIVE, 1990).

Para utilizar o método do zumbido, primeiramente, é necessário estimar qual o potencial elétrico ao longo da cadeia de isoladores. Isso é realizado através do toque de uma das pontas de prova do dispositivo com a linha viva estabelecendo uma referência de ruído sonoro das descargas corona. Em seguida, a outra ponta de prova entra em contato com as campânulas dos isoladores da cadeia, enquanto o ruído provocado pelo corona é avaliado em cada isolador. Por fim, isoladores ao longo da cadeia são curto-circuitados sucessivamente com o uso da ferramenta de medição, enquanto ouve-se o ruído produzido. Um isolador curto-circuitado internamente não provoca ruído sonoro no dispositivo de medição, visto que o mesmo não apresenta diferença de potencial em suas extremidades metálicas (VAILLANCOURT et al., 1994).

O método do zumbido possui algumas limitações: primeiramente, a medição de ruído em cadeias de isoladores longas é uma atividade difícil para o técnico que está medindo. Isto se dá devido ao fato do ruído ser uma grandeza influenciada por diversos agentes do meio, tais como: o som do vento, barulho de fábricas ou dos carros, caso o objeto a ser monitorado esteja próximo a uma rodovia. Além do aspecto subjetivo de quem está medindo, dado ao fato de que fica a cargo do técnico ao medir o ruído audível constatar alterações nos níveis do ruído. Também deve ser levado em consideração a fadiga causada durante a realização desta atividade que pode levar a erros humanos durante o processo (VAILLANCOURT et al., 1994). Outros métodos usando a distribuição de potencial foram desenvolvidos com o passar do tempo, porém as maiores evoluções e modificações se concentram na mudança do equipamento de medição e não no próprio método em si.

Bennett (1925) patenteou uma espécie de voltímetro eletrostático anexado ao fim de um bastão isolante, no qual o potencial elétrico ao longo dos isoladores, presentes em uma cadeia, pode ser medido de maneira individual. Esse instrumento é utilizado de forma semelhante a ferragem em 'U' aplicada no método do zumbido, porém sem a necessidade da fase de calibração do ruído, visto que a tensão na linha é conhecida. Através de uma estimativa da distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores, se tem uma noção do valor do potencial elétrico ao qual cada isolador

deve estar submetido. Realiza-se uma medição da diferença de potencial entre o pino e a campânula em cada isolador e, caso este valor não esteja conforme o previsto, se constata a presença de uma unidade defeituosa.

Spangler (1933), introduziu uma alteração no dispositivo para medição do potencial. Diferentemente do método zumbido, que utilizava ruído sonoro, e do dispositivo apresentado por Bennett (1925), a ferramenta concebida por Spangler (1933) possui uma lâmpada, consistindo em uma resistência entre os terminais de medição. Essa lâmpada acende com maior ou menor intensidade, a depender da diferença de potencial medida. Quanto maior mais iluminada, quanto menor menos iluminada. Caso uma unidade apresente problema a lâmpada não acenderá, ou acende com um nível de iluminação inferior ao esperado.

Em seguida, Forrest (1942) desenvolveu um estudo no qual são apresentados resultados adquiridos com um instrumento de medição semelhante ao patenteado por Bennett (1925). Uma característica adicional deste dispositivo é a inserção de capacitores variáveis coaxiais em série. Tais elementos possuem como função principal possibilitar o ajuste da sensibilidade de medição, bem como melhorar a isolamento eletrostática. Assim, reduzindo o erro de leitura da grandeza medida devido à indução produzida pelo campo elétrico, presente em ambientes expostos a uma tensão elevada. Os resultados apresentados por Forrest (1942) indicaram que o método era factível e confiável, em cadeias de isoladores de porcelana aplicada em sistemas de 132 kV, contanto que a umidade relativa do ar fosse abaixo dos 70%.

Castelli (1954), também desenvolveu um dispositivo com propriedades semelhantes aos dos autores até o momento citados. Porém, o dispositivo criado por Castelli (1954) realizava a medição de potencial através de um galvanômetro D'Arsonval em série com resistores de alta tensão. O galvanômetro D'Arsonval consiste basicamente de uma bobina móvel suspensa entre os pólos de um ímã que pode girar em torno de um eixo. Quando submetida a uma diferença de potencial, surge uma corrente na bobina que gera um campo magnético e, conseqüentemente, uma força magnética que produz um torque fazendo a bobina girar. A deflexão provocada é proporcional a diferença de potencial presente e, semelhante aos outros dispositivos apresentados até o momento, através do valor de potencial elétrico medido é possível identificar se a unidade da cadeia de porcelana está com defeito ou não.

Lee et al. (2012) implementaram um sistema de medição de distribuição de potencial por contato, semelhante aos apresentados por Bennett (1925), Spangler

(1933), Forrest (1942) e Castelli (1954). A diferença consiste em ser um dispositivo de contato inteligente, no qual diversas etapas do processo são automatizadas com o uso de sensores e atuadores. O dispositivo mede a tensão elétrica sobre a qual o isolador se encontra, bem como a resistência elétrica do mesmo, provendo assim mais informações e, conseqüentemente, gerando um diagnóstico mais exato. O equipamento desenvolvido possui estruturas mecânicas de sustentação e um sistema de controle que mede não só a tensão e a resistência, mas também as condições ambientais (temperatura, umidade, dentre outros), comunicação via *Bluetooth* com o sistema diagnóstico e módulo para condicionar o valor da alta tensão medida no dispositivo.

Park et al. (2012) desenvolveram um robô o qual percorre a cadeia de isoladores de porcelana realizando a medição de distribuição de potencial. O protótipo desenvolvido possui 2,97 kg e foi testado em uma linha viva de 345 kV. O robô desenvolvido é dotado de um módulo atuador, que consiste em: uma bateria, um conjunto de sensores de posicionamento e diversas estruturas mecânicas que permitem a movimentação do robô ao longo da cadeia de maneira autônoma, bem como a realização do contato do robô com o pino e a campânula de cada isolador. Além das estruturas mecânicas o robô possui componentes eletrônicos, como um módulo de comunicação, via *Bluetooth* e rádio frequência, bem como uma unidade de medição de alta impedância. Ao final os dados adquiridos pelo robô são transmitidos a uma unidade que é responsável pelo diagnóstico da cadeia.

Ferreira (2019) desenvolveu um trabalho no qual é exposto uma forma de identificação de defeitos em cadeia de isoladores de vidro através da análise das variações na distribuição de potencial devido ao defeito. O autor utilizou MEF para determinar a capacitância de uma unidade de isolador de vidro, em seguida aplicou o valor dessa capacitância no modelo apresentado na Figura 15 para obter uma distribuição de potencial em condições normais de operação e na presença de defeitos nas unidades. Após a realização dessa etapa, experimentos foram realizados com o objetivo de comparar a distribuição de potencial obtida experimentalmente com os das simulações. Por fim, foram verificados a influência de sobretensões na viabilidade de aplicação de um processo de monitoração. Porém é um estudo em isoladores de vidro e não leva em consideração os isoladores submetidos em condições de poluição e umidade.

### 3.1.2 Modelos para Cálculo da Distribuição de Potencial em Isoladores

Existem várias pesquisas com o objetivo de cálculo do potencial elétrico para diversos fins. Neste trabalho, as pesquisas mais relevantes estão relacionadas ao cálculo do potencial em isoladores, sejam eles cerâmicos ou poliméricos, submetidos a diferentes condições de operação sob poluição e umidade, bem como na presença de descargas superficiais.

O estudo de Asenjo e Morales (1982), consiste em apresentar um método geral para solução de campos elétricos em sistemas alternados de baixa frequência em isoladores poluídos. O método é baseado na decomposição das equações de Maxwell em que a solução pode ser implementada de maneira analítica ou numérica. O método das diferenças finitas é utilizado no trabalho para mostrar como obter o campo elétrico em isoladores sob a presença de poluição e umidade. A principal característica deste trabalho é apresentar como modelar a poluição como uma condição de contorno sobre a superfície do isolador, possibilitando estudos eletrostáticos para estes casos sem a necessidade de modelagem física de uma camada condutiva.

O modelo apresentado no Capítulo 2, na Seção 2.3, consiste em um modelo capacitivo aplicado a isoladores de vidro, em que as diversas capacitâncias variam de acordo com uma série de parâmetros já apresentados. Zhao e Comber (2000) mostraram, utilizando o método da simulação de carga, que esses mesmos parâmetros também alteram a distribuição de potencial em isoladores poliméricos. Apresentando a distribuição de potencial e campo elétrico para um mesmo isolador presente em diversos casos, tais como: diferentes formas de instalação do isolador, vários comprimentos de condutor e isoladores em I e em V.

A pesquisa desenvolvida por Aydogmus e Cebeci (2004) propõe um novo modelo para determinação da tensão de ruptura em isoladores de vidro mais exato do que os já apresentados até a data de publicação da pesquisa. Para isso, o autor faz uso do MEF para determinar os níveis de potencial e campo elétrico na superfície de um isolador de vidro. Ao longo do estudo desenvolvido por Aydogmus e Cebeci (2004), os mesmos utilizam de uma forma de modelagem de descargas superficiais que também será utilizada neste trabalho devido a sua efetividade e simplicidade. O modo de modelagem de descargas superficiais consiste na substituição da superfície por uma condição de contorno referente a de um curto-circuito.

Volat (2013) realizou um estudo no qual é feito uma comparação entre as

formas de modelagem da poluição em isoladores poliméricos. O ponto principal dessa pesquisa foi a modelagem de um isolador polimérico de 33 kV no qual a poluição foi modelada de duas formas: através da configuração de uma condição de contorno com as características da poluição sobre a superfície do isolador, semelhante ao demonstrado por Asenjo e Morales (1982), comparado com o desenvolvimento de uma camada física, representada por uma fina camada condutiva de fato presente na superfície do isolador e não mais como uma condição de contorno. O estudo resultou na conclusão de que os valores medidos da distribuição de potencial entre os dois métodos são próximos, tendo uma diferença média de 3% entre os métodos. O estudo não utiliza valores de poluição encontrados em condições ambientais e sim uma faixa arbitrária de condutividade para camada condutiva. Logo, não representando uma situação próxima da real de operação. Utilizou-se MEF em ambos os casos estudados.

Arshad et al. (2015) realizaram um estudo semelhante ao apresentado por Volat (2013), com um isolador polimérico de 33 kV e a aplicação de MEF. Entretanto, são utilizados valores de poluição que visam se aproximar das condições reais encontradas por isoladores em operação. Nesse estudo, é possível notar que a distribuição de potencial tende a saturar em um comportamento linear a partir de um determinado nível de condutividade, ou seja, aumentos na condutividade não provocam variações significativas na distribuição de potencial. Arshad et al. (2015) apenas consideraram a situação em que o isolador apresenta uma camada de poluição uniforme que cobre toda a superfície do isolador, caso esse encontrado apenas em isoladores com perdas das propriedades hidrofóbicas ao longo de toda superfície.

Ilhan et al. (2015) utilizaram de experimentos e simulações para mostrar o comportamento da distribuição de potencial em cadeias de isoladores de vidro. As simulações realizadas utilizaram o método dos elementos finitos e modelaram a camada de poluição como uma condição de contorno com as características pertinentes. Do ponto de vista experimental, os experimentos foram realizados através da impregnação dos isoladores com uma tinta semi-condutiva. Essa tinta foi fabricada no próprio laboratório em que o estudo foi realizado, consistindo de resina epóxi, um endurecedor e grafite em pó, para determinar a condutividade da solução. Estudou-se quatro casos: poluição uniforme, poluição apenas na parte superior do isolador, poluição apenas na parte inferior do isolador e presença de bancas secas no isolador. Ao final foram comparados os resultados das simulações e experimentos, que apresentaram uma boa correspondência.

He e Gorur (2017) realizaram um estudo com o objetivo de obter o campo elétrico ao longo de um isolador polimérico no momento da propagação de uma descarga superficial. O estudo realizado utiliza um método computacional denominado de método das diferenças finitas em grade auto-adaptativa. Este método consiste em uma "grade" de pontos que aumenta sua resolução na área de interesse diferente do método das diferenças finitas tradicional que possui o mesmo valor para todo o espaço estudado. Apesar das características importantes deste estudo para o presente trabalho, o mesmo não faz uma análise tridimensional, apenas realiza simulações bidimensionais. O estudo também não utiliza os resultados com o objetivo de monitorar um determinado isolador, e sim de ter o conhecimento sobre o comportamento do campo elétrico a medida que uma determinada descarga evolui.

### 3.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Constata-se, através da revisão apresentada, que o uso da distribuição de potencial elétrico como grandeza de monitoração é utilizado apenas em isoladores cerâmicos, ainda não sendo aplicado para monitoração em isoladores poliméricos.

A monitoração através da distribuição de potencial utilizando as técnicas existentes é cansativa e demorada, visto que é necessário o levantamento de toda curva da distribuição de potencial ao longo do isolador para que o diagnóstico seja realizado. Fato que dificulta a utilização da distribuição de potencial como parâmetro mesmo em isoladores cerâmicos. Além de utilizarem dispositivos que não são aplicáveis para monitoração em tempo real. Ou seja, tem aplicabilidade limitada a avaliações *in loco*.

Este trabalho busca fornecer subsídios para tornar viável a utilização da distribuição de potencial como parâmetro de monitoração da ocorrência de descargas superficiais em isoladores poliméricos, visto que esse fenômeno está associado a degradação polimérica e é intermitente.

O método desenvolvido possibilita que não seja necessário o levantamento de toda distribuição de potencial para monitorar o isolador, e sim de que uma região de monitoração seja determinada. A diferença de potencial entre os limites dessa região seria a variável de interesse, assim possibilitando, no futuro, a existência de um método de monitoração em tempo real, dado o fato de que apenas a tensão em dois pontos do isolador precisaria ser monitoradas.

Os modelos para cálculo da distribuição de potencial em isoladores são de

fundamental importância para este trabalho, visto que, dão suporte ao método para definição da região de monitoração. Esses modelos também são utilizados para verificar se a diferença de potencial elétrico nos limites da região definida é parâmetro para identificar uma descarga superficial.

Com a finalidade de resumir as características das pesquisas apresentadas, na Tabela 5 são sintetizadas as principais referências e características das pesquisas descritas neste capítulo.

Tabela 5 – Síntese comparativa das principais pesquisas e suas características pertinentes a este trabalho.

Pesquisa	Característica										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Bennett (1925)	✓										
Spangler (1933)	✓										
Forrest (1942)	✓										
Castelli (1954)	✓										
Asenjo e Morales (1982)						✓		✓		✓	
Zhao e Comber (2000)						✓		✓			
Aydogmus e Cebeci (2004)						✓	✓	✓	✓	✓	✓
Lee et al. (2012)	✓										
Park et al. (2012)	✓	✓									
Volat (2013)						✓	✓	✓	✓	✓	
Arshad et al. (2015)						✓	✓	✓		✓	
Ilhan et al. (2015)						✓	✓	✓		✓	
He e Gorur (2017)						✓		✓		✓	✓
Ferreira (2019)	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓			✓
Este trabalho	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Legenda:

A - Monitoração por distribuição de potencial

B - Monitoração autônoma

C - Monitoração em tempo real

D - Monitoração de apenas um trecho do isolador

E - Monitoração em isoladores poliméricos

*Continua na próxima página*

Tabela 5 – *Continuação da página anterior*

Pesquisa	Característica										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K

F - Modelo para resolução de potencial elétrico

G - Utilização de MEF

H - Emprego de geometria 2D

I - Emprego de geometria 3D

J - Modelagem com poluição e umidade

K - Modelagem com descargas superficiais

Fonte: O autor (2021).

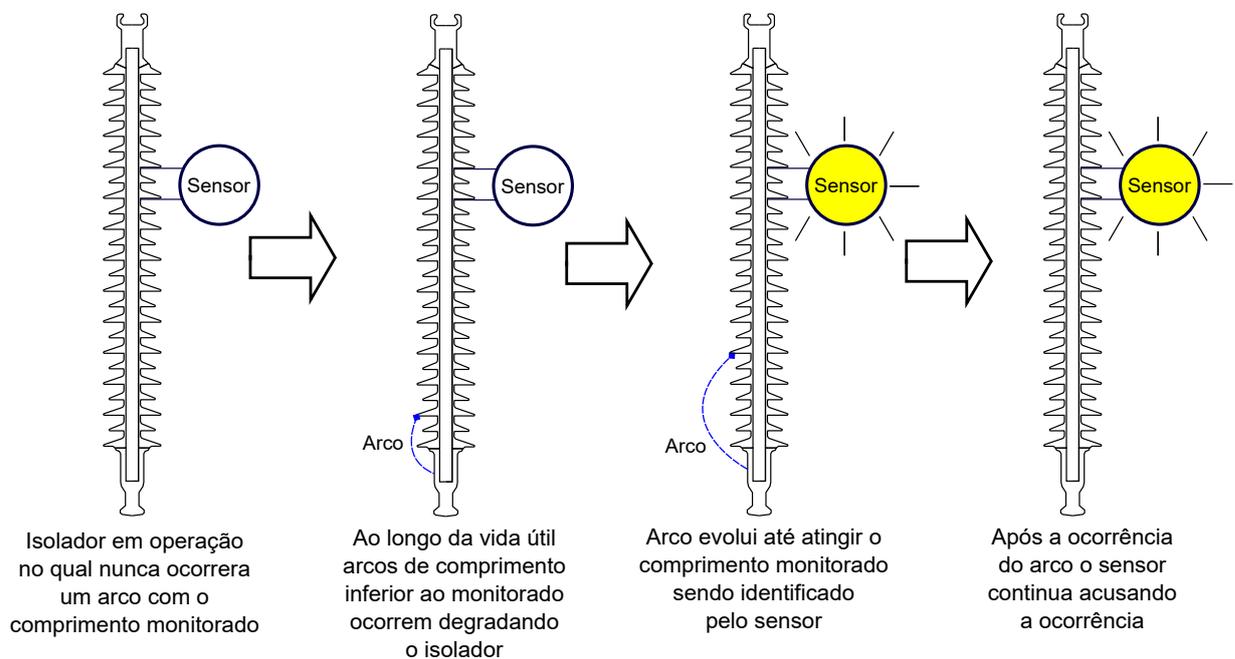
Neste capítulo foram apresentadas as pesquisas com maior relevância para este trabalho, além de uma exposição crítica a respeito dessas pesquisas.

O próximo capítulo será dedicado à descrição do método desenvolvido para determinação da região de monitoração.

## 4 MÉTODO DESENVOLVIDO

O método tem como um dos objetivos fornecer subsídios para o desenvolvimento de uma nova técnica de monitoração em isoladores poliméricos. A nova técnica consiste em identificar a ocorrência de uma descarga na superfície do isolador polimérico, a partir de um certo comprimento de arco, utilizando a diferença de potencial apenas entre dois pontos da superfície do isolador. Na Figura 23, é apresentada uma ilustração que facilita a visualização da nova técnica de monitoração proposta.

Figura 23 – Ilustração da técnica proposta a ser viabilizada com o método.



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 23, é ilustrado um caso de arco do lado fase do isolador. Entretanto, a técnica será capaz de identificar arcos em quaisquer local do isolador, bem como arcos de comprimento menores ocorrendo simultaneamente que, ao terem seus comprimentos somados, são maiores que o valor de comprimento monitorado.

O método determina qual região do isolador polimérico deve ser monitorada. Essa região é fixa e limitada por dois pontos nos quais o potencial elétrico será medido ao longo do tempo de operação do isolador. Caso a diferença de potencial elétrico atinja um nível acima do determinado é constatado a ocorrência de um arco com o comprimento ao qual se quer monitorar.

A inspiração para a técnica proposta vem da inspeção visual noturna, na

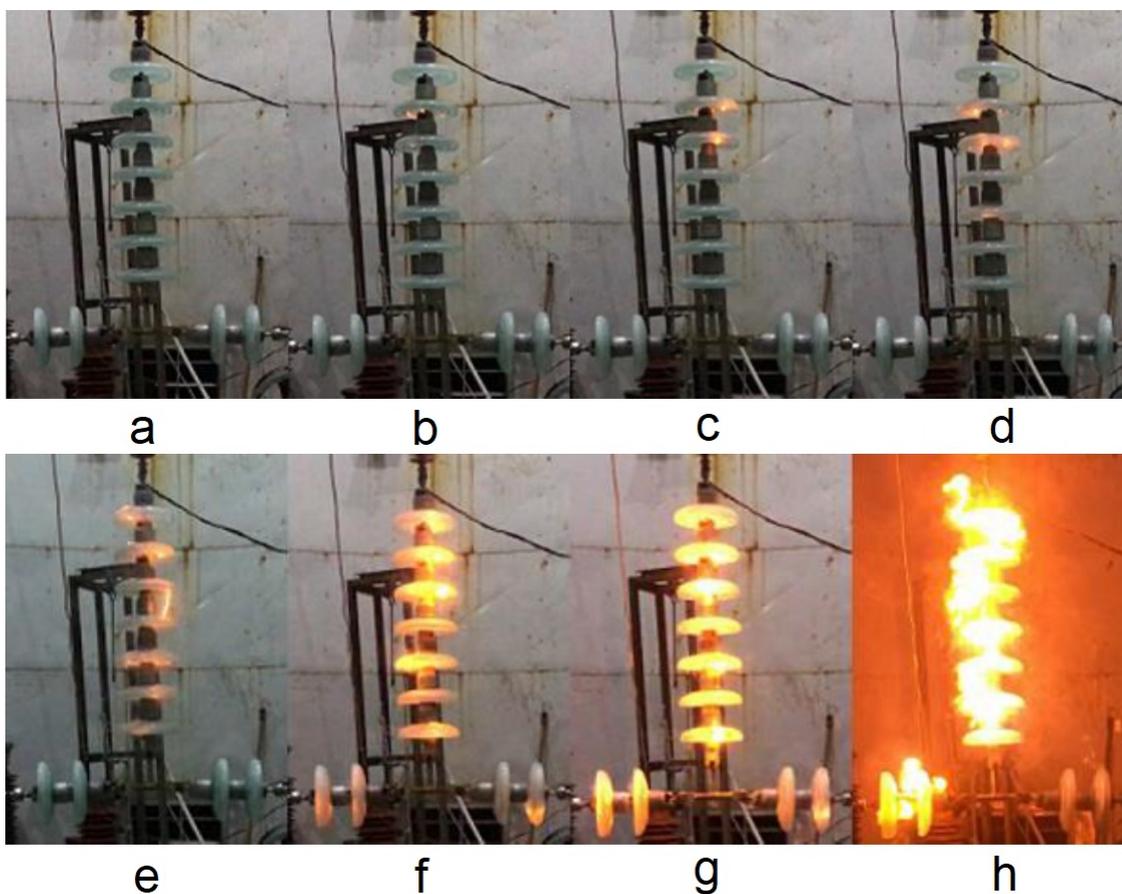
qual o objetivo é verificar a presença de arcos superficiais devido às condições nas quais o isolador está submetido. O comportamento de tais arcos leva, ao técnico que está realizando a inspeção, a constatar a necessidade, ou não, de lavagem dos isoladores. Devido ao exposto, é possível notar que esta técnica de inspeção é bastante dependente do avaliador, visto que esse fenômeno é de difícil observação, realizado em condições inadequadas e por apenas um instante de tempo, podendo, logo após a realização da inspeção, ocorrer descargas que indicam a necessidade de lavagem dessa unidade.

Conforme a normativa IM-MN-LT-M.06, formulada e utilizada pela CHESF (2016), é possível notar a subjetividade na aplicação da inspeção visual noturna, visto que a mesma não preconiza um comprimento objetivo de arco que indique problemas no isolador, e sim a presença ou ausência de descargas nos isoladores das cadeias de vidro somente. Pode-se observar na Figura 24 a evolução do processo de uma descarga superficial em uma cadeia de isoladores de vidro.

A inspeção visual noturna é mais aplicada para isoladores de vidro, visto que traz um bom indicativo da necessidade de tomada de ação com relação à deposição de poluição que, devido às características hidrofílicas do vidro, possui uma maior probabilidade de formação de um filme condutivo e, conseqüentemente, formação de arco de contorno no isolador. Em isoladores poliméricos, conforme apresentado no capítulo 2, as características hidrofóbicas garantem um melhor desempenho desses isoladores em ambientes sujeitos a poluição e umidade.

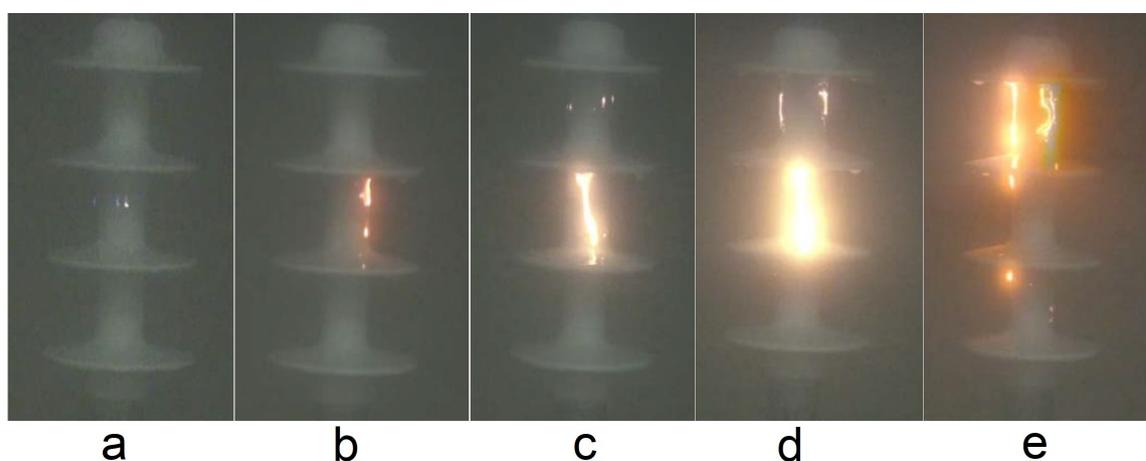
Porém, conforme apresentado nas Figuras 11 e 12, com o passar do tempo, descargas corona podem surgir levando à perda local de hidrofobicidade. Ao perder essa característica ocorre o aumento da corrente de fuga e, conseqüentemente, o aumento das descargas superficiais. Esse processo pode agravar ainda mais a perda de hidrofobicidade, aumentando assim a corrente de fuga, levando a uma maior degradação do isolador e começando um processo de trilhamento e erosão do mesmo. À medida que a superfície do isolador se degrada, maior é o comprimento das descargas superficiais que ocorrem até o ponto em que ocorra um arco de contorno no isolador. Na figura 25 é apresentada a evolução de uma descarga superficial em um isolador polimérico.

Figura 24 – Processo de *flashover* em cadeia de isoladores de vidro.



Fonte: Ren et al. (2019).

Figura 25 – Evolução de descarga superficial em isolador polimérico de 11 kV.



Fonte: adaptado de Albano et al. (2016).

É possível, então, constatar uma relação entre o estado de degradação do

isolador polimérico e as descargas superficiais que ocorrem no isolador. A probabilidade de ocorrência das descargas superficiais é maior em situações nas quais o isolador está submetido a poluição e umidade, formando assim um caminho condutivo. Baseando-se nessas observações, busca-se o desenvolvimento de técnica que viabilize a utilização desse fenômeno como indicativo da retirada, de um determinado isolador polimérico em operação.

É necessário, para o desenvolvimento dessa nova técnica, a determinação de qual região do isolador pode ser monitorada de forma a indicar a ocorrência de uma descarga superficial de um certo comprimento. Para tal fim, é necessário um método que apresente os dois pontos nos quais o potencial elétrico será medido.

#### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO MÉTODO

Nesta seção são apresentadas as características do método desenvolvido nesta pesquisa.

##### 4.1.1 Aproximações

Inicialmente, para que o método de determinação da região a ser monitorada possa ser implementado, algumas aproximações precisam ser consideradas:

1. Representação da distribuição de potencial de maneira linear.
2. Resistência de arco nula.
3. Duração do arco maior que um ciclo da tensão aplicada.

A seguir, são apresentadas as justificativas que possibilitam a consideração de tais aproximações.

##### 4.1.1.1 Representação da distribuição de potencial de maneira linear

Conforme observado na Figura 19, é possível ver que, para os casos estudados por Arshad et al. (2015), o comportamento da distribuição de potencial, independente do nível de poluição utilizado, se comporta de maneira aproximadamente linear.

Apesar do estudo realizado por Arshad et al. (2015) contemplar isoladores poliméricos, submetidos a níveis de poluição condizentes com outros estudos que apresentam valores encontrados em campo, vide Tabela 2, os autores levam em consideração uma camada condutiva uniforme de poluição e umidade. Essa característica não é a de ocorrência mais comum e existe a necessidade de mostrar que esse fenômeno é válido para outros casos.

Segundo Zhang et al. (2017), o caso mais comum é a deposição não-uniforme da poluição e a formação de apenas regiões, ou caminhos, condutivos na superfície do isolador de diferentes condutividades. Fazendo uma analogia com o modelo para isoladores de vidro sob poluição e umidade, apresentado na Figura 18 no tópico 2.3.2.2, para o comportamento da distribuição de potencial ser linear as quedas de tensão em cada uma das resistências precisariam ser iguais. Sendo assim, essa condição apenas seria verdadeira caso, a partir de um determinado nível de poluição, a resistência da camada de poluição e umidade pouco variasse.

Assim como apresentado na Equação 2.8, é possível notar que a resistência é dependente da condutividade e, conforme apresentado por Ilhan et al. (2015), condutividades acima de  $5 \mu S/cm$  pouco alteram a distribuição de potencial. O estudo de Ilhan et al. (2015) foi realizado com isoladores de vidro submetidos a uma camada de poluição depositada de  $0,1 mm$  ao redor de todo o isolador.

#### 4.1.1.2 Resistência de arco nula

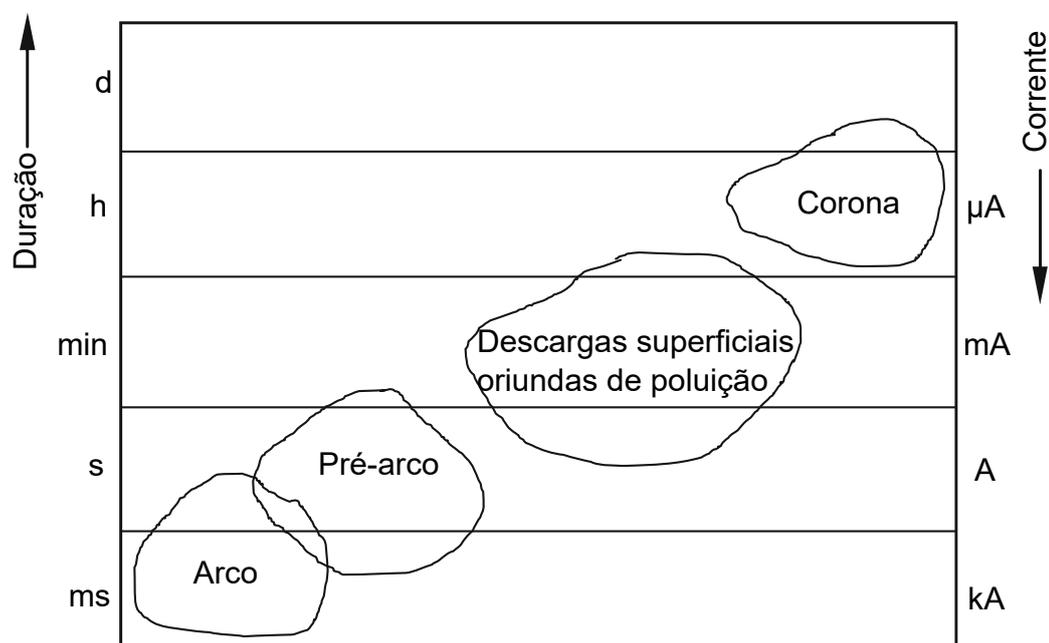
A segunda aproximação utilizada para o desenvolvimento do método é a consideração da resistência dos arcos serem nulas, ou seja, curto-circuitos. Logo, regiões as quais estejam conectadas por um arco possuem o mesmo potencial.

Essa aproximação é bastante utilizada por diversos autores, seja para representar arcos de contorno em unidades de isoladores de vidro, como feito por Adami (2008) e Capelini et al. (2015). Considerada em estudos de arcos de potência no sistema elétrico, como o realizado por Câmara (2010). E, de forma mais próxima ao considerado neste trabalho, em estudos de obtenção de potencial e campo elétrico de forma computacional, como utilizados por Aydogmus e Cebeci (2004), He e Gorur (2017) e Ferreira (2019).

#### 4.1.1.3 Duração do arco maior que um ciclo da tensão aplicada

O método desenvolvido para determinação da região de monitoração utiliza como entrada o valor de pico da tensão nominal aplicada ao isolador. Essa consideração só é possível se o arco persistir por um, ou alguns, ciclos da tensão de aplicada ao isolador. Na Figura 26 são apresentados os tempos de duração, bem como as correntes, dos fenômenos de descargas em isoladores.

Figura 26 – Duração e correntes dos fenômenos de interesse.



Fonte: adaptado de Papailiou e Schmuck (2013).

Nota-se, na Figura 26, que a duração de fenômenos relacionados às descargas superficiais oriundas de poluição possuem duração entre segundos e minutos. Considerando a tensão de alimentação com uma frequência de 60 Hz, o tempo necessário para completar um ciclo é cerca de 16 ms. Logo, é possível a análise de pior caso, visto que os fenômenos considerados possuem um tempo de duração superior à duração de um ciclo da tensão aplicada.

#### 4.1.2 Definição do Método

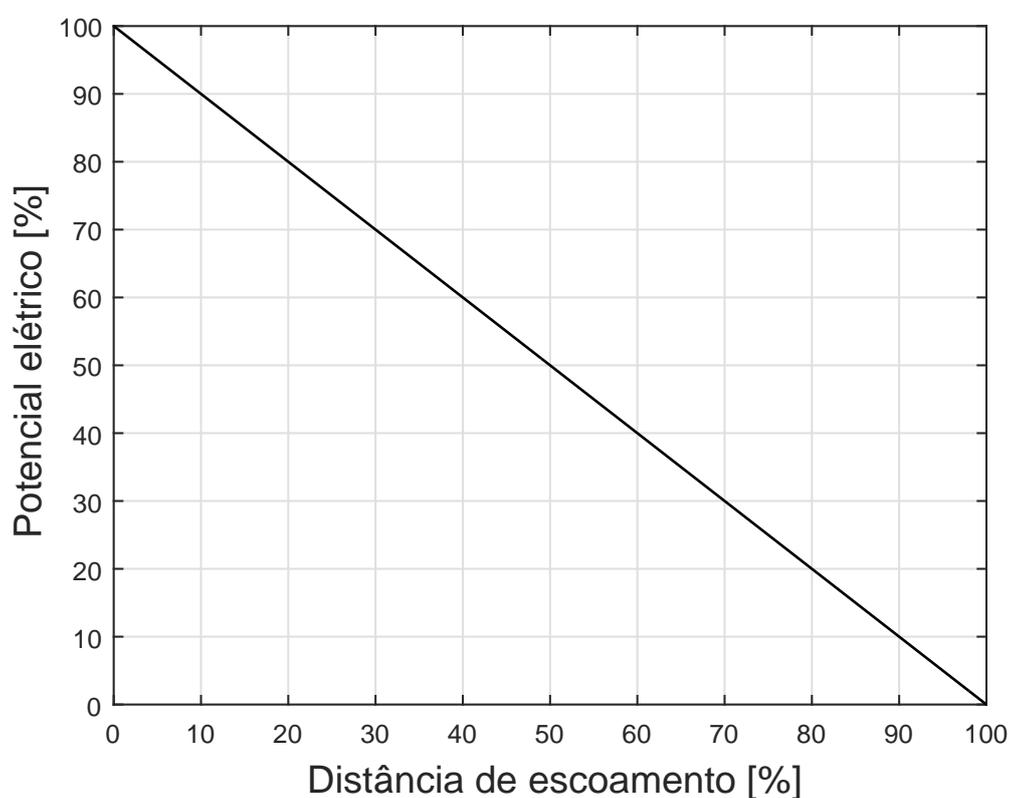
Realizando as aproximações anteriormente apresentadas, é possível formular um método no qual se consegue escolher dois pontos em que a diferença de potencial

entre eles indicam a ocorrência de uma descarga com um comprimento considerado.

#### 4.1.2.1 Aumento de Tensão ao Longo da Região do Isolador não Submetida aos Arcos

Partindo do princípio de que a distribuição de potencial em isoladores poliméricos se comporta de maneira linear, pode-se considerar a distribuição como uma reta conforme mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Aproximação da distribuição de potencial por uma reta.



Fonte: O autor (2021).

Para o caso apresentado na Figura 27, a expressão que define o comportamento da curva é a expressão de uma reta, como mostrado na Equação 4.1:

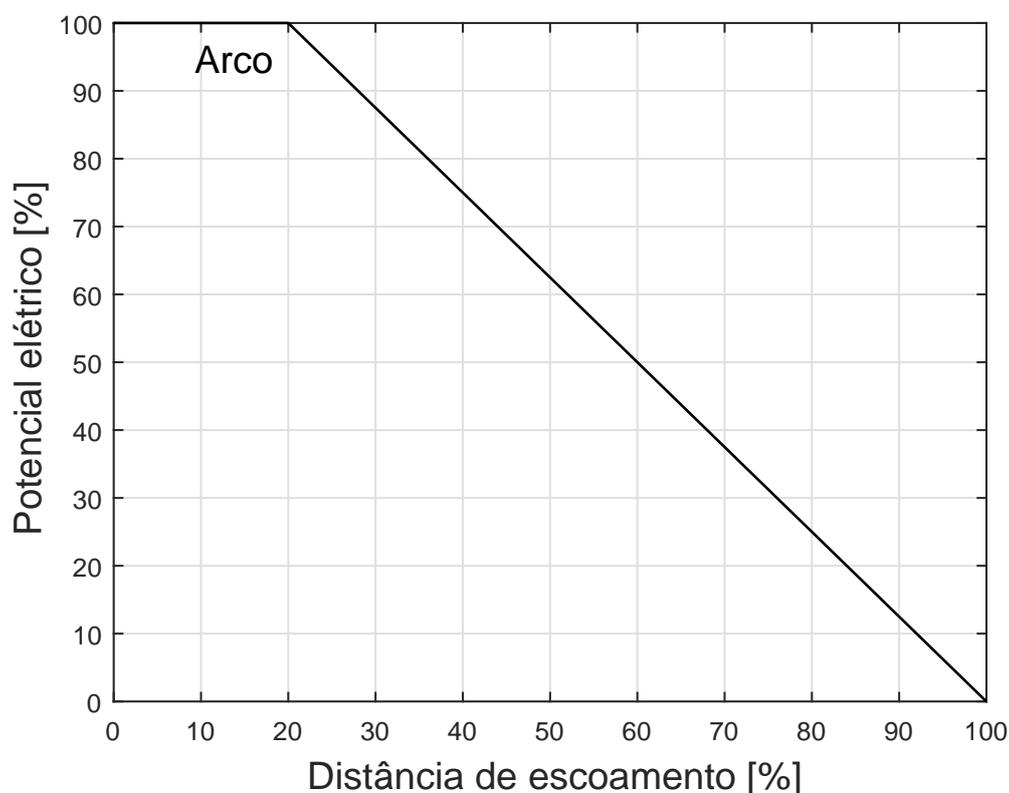
$$V(l_m) = -\frac{V_g}{L_{esco}}l_m + V_g, \text{ se } 0 \leq l_m \leq L_{esco}, \quad (4.1)$$

em que,  $V(l_m)$  é potencial elétrico no ponto da distância de escoamento [V];  $l_m$  é o ponto presente na distância de escoamento em que se quer obter o potencial elétrico [m];  $V_g$  é a tensão elétrica a qual o isolador está submetido [V] e  $L_{esco}$  é a distância de

escoamento total do isolador [ $m$ ].

Na Figura 28, é apresentado o comportamento da distribuição de potencial quando o mesmo apresenta um arco do lado fase, considera-se um arco como um curto-circuito, como dito anteriormente, ou seja, um trecho em que o potencial será constante e no caso da fase igual a tensão aplicada ao isolador.

Figura 28 – Aproximação da distribuição de potencial no caso de poluição com arco do lado fase.



Fonte: O autor (2021).

Para o caso do gráfico apresentado na Figura 28, após o trecho onde ocorre o arco, a expressão que define o comportamento da curva é a fórmula mostrada na expressão 4.2:

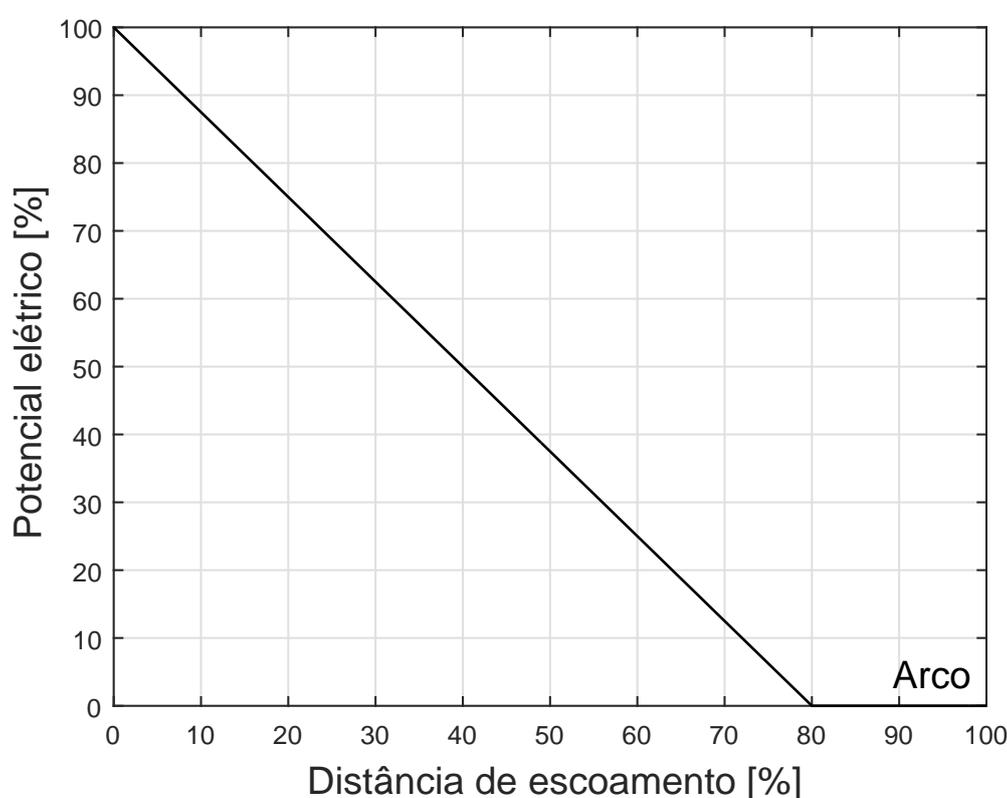
$$V(l_m) = \begin{cases} V_g, & \text{se } 0 \leq l_m \leq L_{arco} \\ -\frac{V_g}{L_{esco}-L_{arco}} l_m + \frac{V_g L_{esco}}{L_{esco}-L_{arco}}, & \text{se } L_{arco} < l_m \leq L_{esco} \end{cases}, \quad (4.2)$$

em que,  $V(l_m)$  é potencial elétrico no ponto da distância de escoamento [V];  $l_m$  é o ponto presente na distância de escoamento em que se quer obter o potencial elétrico [ $m$ ];  $V_g$  é a tensão elétrica a qual o isolador está submetido [V];  $L_{esco}$  é a distância de

escoamento total do isolador [ $m$ ] e  $L_{arco}$  é a distância de escoamento abrigada pelo arco [ $m$ ].

Na Figura 29 é exposto o comportamento da distribuição de potencial quando o mesmo apresenta um arco do lado terra, considera-se um arco como um curto-circuito, semelhante ao realizado anteriormente, ou seja, um trecho em que o potencial será constante e no caso do terra igual a tensão zero.

Figura 29 – Aproximação da distribuição de potencial no caso de poluição com arco do lado terra.



Fonte: O autor (2021).

Para o caso da reta apresentada na Figura 29, após o trecho onde ocorre o arco, a expressão que define o comportamento da curva é mostrada na expressão 4.3:

$$V(l_m) = \begin{cases} -\frac{V_g}{L_{esco}-L_{arco}}l_m + V_g, & \text{se } 0 \leq l_m < L_{esco} - L_{arco} \\ 0, & \text{se } L_{esco} - L_{arco} \leq l_m \leq L_{esco} \end{cases}, \quad (4.3)$$

em que,  $V(l_m)$  é potencial elétrico no ponto da distância de escoamento [ $V$ ];  $l_m$  é o ponto presente na distância de escoamento em que se quer obter o potencial elétrico [ $m$ ];  $V_g$  é a tensão elétrica a qual o isolador está submetido [ $V$ ];  $L_{esco}$  é a distância de

escoamento total do isolador  $[m]$  e  $L_{arco}$  é a distância de escoamento abrigada pelo arco  $[m]$ .

Escolheu-se, como locais para surgimento de descargas, os trechos próximo a fase e a terra por fins ilustrativos e de maior facilidade de obtenção das expressões de cada caso. Nota-se, através das Figuras 28 e 29 bem como das expressões 4.2 e 4.3, que os coeficientes das retas, dos trechos onde não há presença de arcos, são iguais. Isso quer dizer que independente do local onde ocorrer o arco, desde que eles possuam o mesmo comprimento, o aumento da tensão elétrica dado dois pontos será igual nos dois casos, isto é válido para a ocorrência de arcos em qualquer lugar da superfície do isolador.

É possível notar também que o coeficiente da reta representada pela expressão 4.1 é menor que os apresentados nas expressões 4.2 e 4.3. Isso implica que a diferença de potencial entre dois pontos, que não estejam sendo contornados pelo arco, no caso das expressões 4.2 e 4.3 serão maiores que na expressão 4.1. Quanto maior o comprimento do arco, maior será a diferença de potencial entre quaisquer dois pontos que não estejam contornados pelo arco, quando comparados a situação sem a presença de arcos.

#### 4.1.2.2 Determinação do Comprimento de Arco a Ser Utilizado

É necessário definir os parâmetros para que seja possível a utilização do método. O primeiro parâmetro a ser definido é o comprimento de um arco que seja suficiente para indicar a necessidade de atuação com relação ao isolador.

De acordo com Sundararajan e Gorur (1993), o maior comprimento de arco possível, que pode ocorrer sem que haja um *flashover*, ou seja, um arco de contorno no isolador, é conhecido e equivale a  $2/3$ , ou cerca de 66%, da distância de escoamento da superfície do isolador. Porém este estudo foi desenvolvido para cadeia de isoladores de vidro, os quais possuem um comportamento diferente dos isoladores poliméricos.

Wańkiewicz (2014) apresentou uma pesquisa utilizando modelos clássicos para predição de *flashover*, em que foi constatado que, para isoladores poliméricos, uma descarga de 75% leva a um *flashover* repentino do isolador para uma condição em que toda superfície do isolador perdeu as características hidrofóbicas. Nesse mesmo estudo, foi constatado que um isolador com apenas 25% da superfície com características hidrofóbicas e 75% hidrofílicas tem uma redução de 70% na tensão de *flashover*

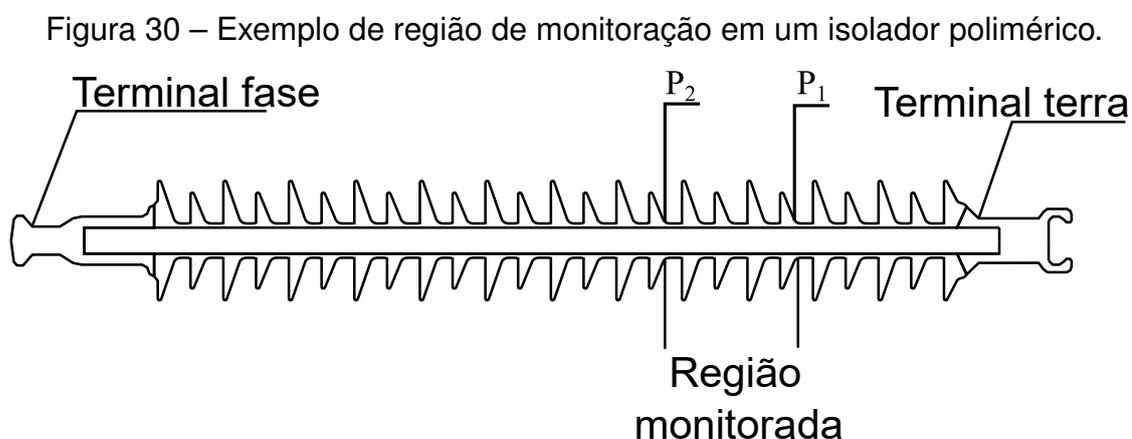
quando comparado a um isolador são.

Segundo Nigris et al. (2000), existe um comprimento máximo permitido para um defeito presente em isoladores poliméricos, denominado de comprimento de defeito crítico. Define-se o comprimento de defeito crítico como aquele que aumenta para 50% a probabilidade da ocorrência de um arco de contorno do isolador polimérico (IEEE, 1995).

Nigris et al. (2000) chegaram à conclusão de que um valor de 25% a 30% da distância de escoamento, para o comprimento de um defeito, não é crítico para o desempenho do isolador polimérico na linha de transmissão. Porém, sistemas diagnósticos devem ter uma sensibilidade mínima hábil para indicar defeitos com tais comprimentos. Dado o exposto, este trabalho adotará como comprimento de arco a ser monitorado cobrindo 25% da distância de escoamento para indicar que o isolador apresenta um defeito crítico.

#### 4.1.2.3 Determinação da Região de Monitoração

É necessário definir quais os dois pontos em que o potencial elétrico será medido e, conseqüentemente, indicarão a ocorrência, ou não, de uma descarga com comprimento igual a 25% da distância de escoamento. A região do isolador compreendida entre esses dois pontos é definida como a região de monitoração. Na Figura 30, é apresentado uma possível região de monitoração para um isolador polimérico.



Fonte: O autor (2021).

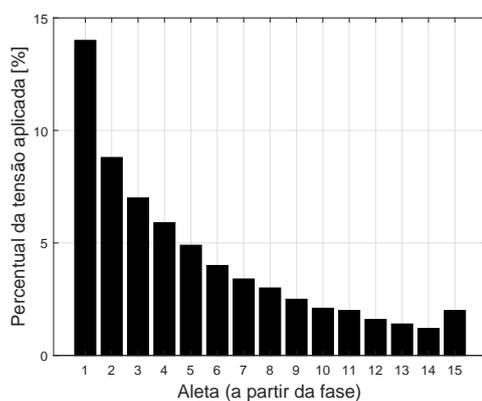
Teoricamente, é possível escolher quaisquer dois pontos ao longo do isolador

polimérico visto que o comportamento das curvas apresentadas nas Figuras 27, 28 e 29 são retas, então a diferença de potencial entre dois pontos de mesma distância é a mesma qualquer dois pontos. Entretanto, é necessário lembrar que, durante as condições normais de operação, limpo e sem umidade, do isolador, a diferença de potencial entre os dois pontos não pode ser superior ao valor de tensão elétrica que indica um defeito crítico.

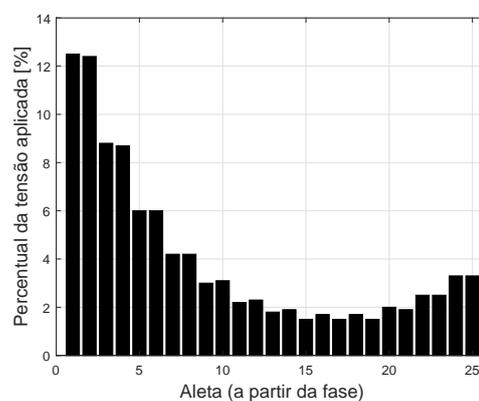
Para isso, é necessário uma análise da distribuição de potencial elétrica nas condições normais de operação. Entretanto, como foi mostrado anteriormente, nesse regime de funcionamento o isolador se comporta de maneira capacitiva e a respectiva distribuição variará caso-a-caso dependendo dos agentes que influenciam no valor das capacitâncias do modelo apresentado na Figura 15, porém algumas características são comuns na maioria das curvas que representam a distribuição de potencial elétrico na superfície de isoladores poliméricos na ausência de poluição e umidade. Na Figura 31, são apresentados dois exemplos do potencial elétrico em cada aleta, ou unidade, de dois isoladores poliméricos diferentes.

Figura 31 – Potencial elétrico em cada aleta de um isolador polimérico.

(a) Primeiro exemplo.



(b) Segundo exemplo.



Fonte: adaptado de (a) Bezerra et al. (2003) e (b) Ferreira, Lopes e Bezerra (2018).

Corroborando com o apresentado na Figura 17, a Figura 31 apresenta, de maneira mais clara, o potencial elétrico em cada aleta durante o regime normal de operação. É possível notar que as regiões de maior concentração de potencial elétrico estão próximas à fase e, comparada ao meio do isolador, em alguns casos, o lado próximo à terra apresenta maiores diferenças de potencial do que a região central. Normalmente essa configuração para a distribuição de potencial é constatada.

Partindo desse ponto, pode-se dizer que não é indicado a escolha da região de monitoração próximo ao lado fase. É necessário evitar uma localização muito próxima ao lado terra. Considerando o fato de que esses locais possuem os maiores níveis de potencial elétrico quando o isolador funciona no regime capacitivo.

Dados os argumentos apresentados, é preciso escolher uma região de monitoração pertencente aos 50% mais próximos ao lado terra, ou seja, entre 50% e 100% da distância de escoamento do isolador polimérico. Lembrando que sempre se considera a distância do ponto à fase, ou seja, a fase é considerada o ponto zero, ou inicial, do isolador.

Primeiramente, é necessário definir o ponto P1, este ponto corresponde ao ponto mais próximo ao lado terra, ou seja, mais distante do local de aplicação do potencial elétrico. Considerando as aproximações realizadas para aplicação do método e que o comprimento crítico da descarga adotado é de 25% da distância de escoamento do isolador, caso os dois pontos de monitoração estejam contornados pela descarga não há diferença de potencial entre eles. Para garantir que uma descarga com o comprimento de 25% da distância de escoamento do isolador totalmente no lado terra seja identificada, é necessária a adoção de um primeiro ponto de monitoração a pelo menos 25% da distância de escoamento do isolador do lado terra, ou seja, a 75% de distância do lado fase. Portanto, o ponto P1 será adotado sempre em uma distância de 25% da distância de escoamento do lado terra, ou 75% do lado fase, conforme apresentado pela expressão 4.4:

$$P_1 = 0,75L_{esco}, \quad (4.4)$$

em que,  $P_1$  é o primeiro ponto de monitoração da distância de escoamento [m] e  $L_{esco}$  é a distância de escoamento total do isolador polimérico [m].

A partir da determinação do primeiro ponto, o segundo pode ser determinado de acordo com a expressão 4.5, que além de depender do comprimento do arco, distância de escoamento e da tensão aplicada no isolador, depende do valor de tensão elétrica que se deseja monitorar, ou seja, o valor ao qual é considerado como limiar de tensão elétrica entre os dois pontos:

$$P_2 = P_1 - \frac{L_{esco} - L_{arco}}{V_g} V_{moni} = 0,75L_{esco} - \frac{L_{esco} - L_{arco}}{V_g} V_{moni}, \quad (4.5)$$

em que,  $P_1$  é o primeiro ponto de monitoração da distância de escoamento [m];  $P_2$  é o

segundo ponto de monitoração da distância de escoamento [ $m$ ];  $V_g$  é a tensão elétrica a qual o isolador está submetido [ $V$ ];  $V_{moni}$  é o limiar de tensão elétrica entre os dois pontos [ $V$ ];  $L_{esco}$  é a distância de escoamento total do isolador [ $m$ ] e  $L_{arco}$  é a distância de escoamento abrigada pelo arco [ $m$ ], no caso 25% da distância de escoamento.

Lembrando que as Equações 4.1, 4.2 e 4.3 foram baseadas nas Figuras 27, 28 e 29 que estão representadas no eixo x do lado fase em direção ao terra. Então a região a ser considerada são os 50% finais destas curvas, em que o primeiro ponto deve estar a uma distância de 75% do eixo y de tais gráficos. A equação 4.5, por ser derivada das equações 4.2 e 4.3 resultará em um valor de  $P_2$  menor que o de  $P_1$ , ou seja, mais próximo da fase que é o local em que x é igual a zero.

## 4.2 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o método para determinação da região de monitoração que identifica uma descarga superficial de um comprimento considerado. O método utiliza algumas aproximações, dentre elas: representa a distribuição de potencial na superfície do isolador polimérico por um perfil linear, situação que ocorre quando o isolador está submetido a uma camada condutiva; desconsidera a resistência de arco, modelando-o como um curto-circuito e considera a duração de um arco superficial maior do que um ciclo da tensão aplicada.

Através das aproximações realizadas, foi possível obter um método que determina dois pontos fixos nos quais a tensão elétrica será medida para identificação de um arco superficial que abriga pelo menos 25% da distância de escoamento do isolador. A determinação dos pontos depende apenas da diferença de potencial máxima permitida entre esses dois pontos, da distância de escoamento do isolador, da tensão aplicada e do comprimento da distância de escoamento abrigada pelo arco.

No próximo capítulo será apresentado o material e métodos utilizados para testar se o método obtêm sucesso e, de fato, indica a ocorrência de uma descarga superficial. Portanto, se a diferença de potencial entre os dois pontos determinados pelo método excede o valor de tensão máxima na ocorrência de diferentes perfis de camada condutiva e descargas superficiais.

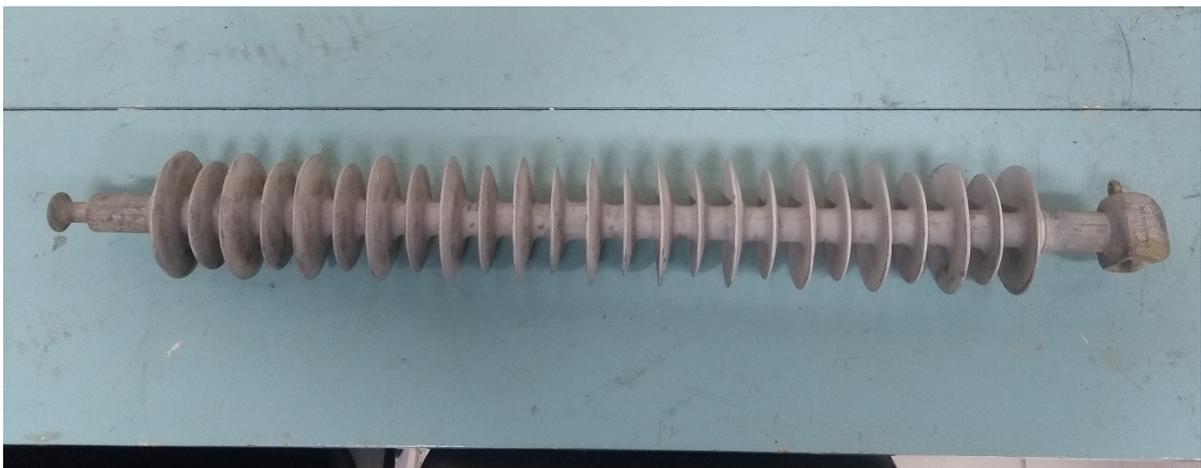
## 5 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados o material utilizado e os métodos aplicados para atingir os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

### 5.1 MATERIAL

O isolador polimérico utilizado foi doado pela CHESF, sobre os quais não se tem mais detalhes a respeito do fabricante. Em um primeiro momento, foram realizadas medições para determinar as dimensões do isolador e, assim, ser possível sua posterior representação em um ambiente computacional para realização das simulações. Uma fotografia do isolador pode ser visualizada na Figura 32.

Figura 32 – Fotografia do isolador utilizado.



Fonte: O autor (2021).

Determinou-se, através do uso de um paquímetro e de uma trena, as dimensões do isolador polimérico a ser utilizado. Na Tabela 6 são apresentados os dados referentes as características construtivas do isolador utilizado. O isolador polimérico apresentado possui tensão de operação nominal de 69  $kV$ , e revestimento polimérico de EPDM.

### 5.2 MÉTODOS

Inicialmente, é necessário aplicar o método para definição da região a ser monitorada. Considerando um comprimento de arco que abriga 25% do isolador (479,22  $mm$ ), conforme apresentado na Seção 4.1.2.2, e uma tensão de monitoração de 7  $kV$ ,

é possível determinar a região de monitoração. Utiliza-se os dados apresentados na Tabela 6 para aplicar as expressões 4.4 e 4.5. O valor de tensão de 7 kV foi escolhido por ser um valor passível de medição no laboratório em que foram realizados os experimentos preliminares deste trabalho, apresentados no Apêndice 7.3.2. Porém, o método pode ser utilizado para outros valores de tensão, caso necessário.

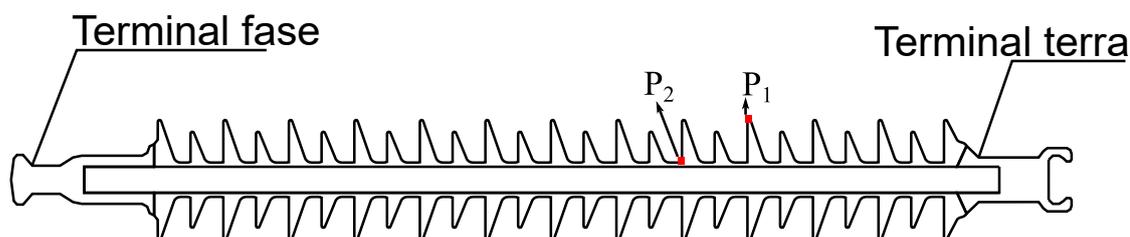
Tabela 6 – Detalhes construtivos do isolador polimérico utilizado.

Características construtivas.	
Tensão de operação	69 kV
Comprimento	870 mm
Distância de escoamento	1916,88 mm
Número de aletas	25
Diâmetro da aleta maior	101 mm
Diâmetro da aleta menor	86 mm
Diâmetro do Núcleo	27 mm
Comprimento do terminal concha	87 mm
Comprimento do terminal bola	97 mm

Fonte: O autor (2021).

A região é definida pelos pontos P1 e P2 que, contornando a distância de escoamento do isolador, estão presentes a uma distância de respectivamente 1437,66 mm e 1259,04 mm do terminal fase. Na Figura 33 é apresentado a localização de P1 e P2 na superfície do isolador.

Figura 33 – Localização de P1 e P2 na superfície do isolador.



Fonte: O autor (2021).

Foram desenvolvidas simulações para obtenção da diferença de potencial ao longo da superfície do isolador polimérico. A plataforma utilizada para a modelagem do problema utilizando MEF foi o COMSOL Multiphysics®. Além da plataforma de MEF, foi utilizado o MATLAB® para automatizar o processo de desenvolvimento das descargas superficiais, bem como a realização de múltiplas simulações em sequência.

### 5.2.1 Simulações com o Isolador Limpo

Visando verificar a diferença de potencial entre os pontos obtidos pelo método desenvolvido no capítulo 4 em condições de superfície limpa e sem umidade, é possível a utilização de um modelo em duas dimensões para representar o isolador polimérico. A representação em 2D é mais adequada pois aproveita a simetria do problema, bem como reduz o custo computacional.

É necessário especificar a geometria do problema. Para este estudo deve ser definido o isolador com todos os seus componentes e o espaço de simulação. O isolador é composto pelas estruturas apresentadas na Figura 2 com as dimensões presentes na Tabela 6.

O espaço de simulação consiste em um envolto de ar no qual o isolador está presente. Esse espaço deve ser extenso o suficiente para que um aumento em seu tamanho não mais influencie a distribuição de potencial no objeto de estudo. Neste trabalho, foi utilizado o espaço de simulação como um retângulo com lado horizontal de comprimento 3000 *mm* e lado vertical de 8700 *mm* conforme apresentado na Figura 34.

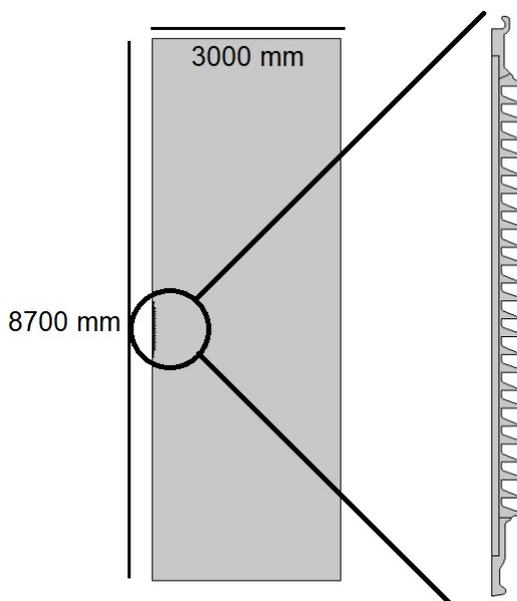
Após a construção da geometria do problema, é necessária a definição dos materiais a serem utilizados. O problema possui quatro materiais: ar, atribuído ao espaço de simulação; o revestimento polimérico do isolador; o material isolante associado ao núcleo, e as ferragens metálicas. Para realização das análises de potencial elétrico e corrente elétrica são necessários os parâmetros de condutividade e permissividade relativa de cada material. Os valores utilizados neste estudo são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Permissividade e condutividade dos materiais.

Material	Permissividade relativa	Condutividade [S/m]
Ar <sup>(1)</sup>	1	$10^{-15}$
Revestimento polimérico <sup>(2)</sup>	4,3	$10^{-14}$
Núcleo <sup>(2)</sup>	7,2	$10^{-14}$
Ferragens metálicas <sup>(3)</sup>	1	$5,98 \cdot 10^7$

Fonte: <sup>(1)</sup>Dias (2017), <sup>(2)</sup>Kone, Volat e Ezzaidi (2017) e <sup>(3)</sup>COMSOL Multiphysics®.

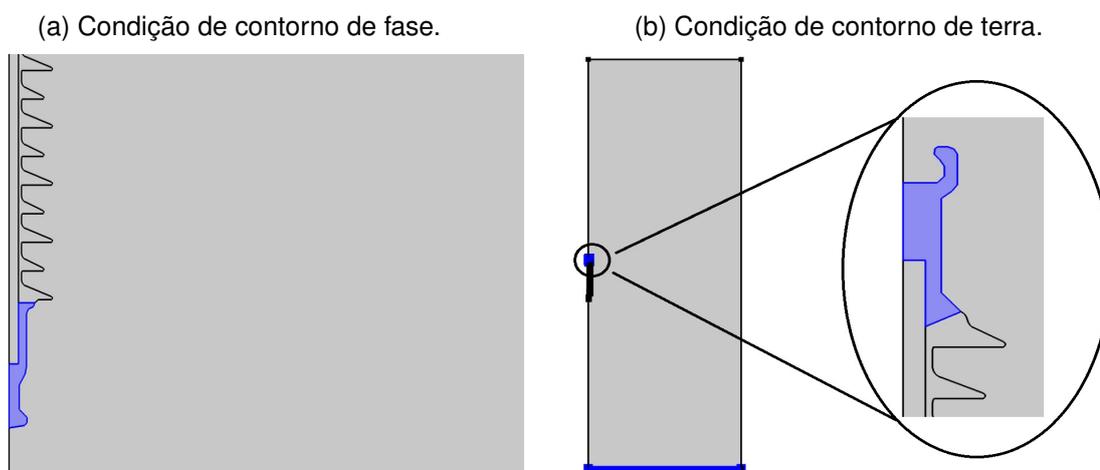
Figura 34 – Ilustração da geometria do problema em 2D.



Fonte: O autor (2021).

É necessária a definição das condições de contorno para o problema, nesse estudo são três condições de contorno utilizadas. Uma referente ao potencial de referência, zero volts, aplicada no terminal terra do isolador e na aresta inferior do espaço de simulação, conforme apresentado na Figura 35b.

Figura 35 – Condições de contorno de tensão aplicadas (em azul).



Fonte: O autor (2021).

A outra condição de contorno, Figura 35a, consiste na tensão aplicada ao isolador que, para este caso de simulação, é variante no tempo e representada pela

expressão 5.1:

$$V_{app} = V_{pico} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad (5.1)$$

em que,  $V_{app}$  é a tensão aplicada [kV];  $V_{pico}$  é o valor da tensão de pico de fase ao qual o isolador opera nominalmente ou seja  $69 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} kV$  resultando em 56,34 kV;  $f$  é a frequência da rede, sendo considerada 60 Hz e  $t$  é a variável referente ao tempo. É a ultima que modela as descargas superficiais no isolador, as quais é utilizada a condição de contorno de potencial flutuante, condição essa que representa uma região condutiva.

Apesar dos casos de descargas superficiais com comprimentos consideráveis serem de difícil ocorrência em condições sem camada condutiva, ou seja sem poluição e umidade, alguns testes podem ser feitos para avaliar o método. A diferença de potencial nos pontos determinados só deve exceder a tensão monitorada nos casos de formação de camada condutiva, associado a descargas superficiais com comprimento que abriguem mais de 25% da distância de escoamento do isolador. Os casos que serão testados, além da condição sem a ocorrência de descargas, são apresentados na Figura 36.

Por fim, é gerada uma malha de elementos finitos para que o problema possa ser resolvido. A malha foi gerada utilizando as opções presentes na plataforma de elementos finitos utilizada, informações referentes à malha são apresentadas na Tabela 8.

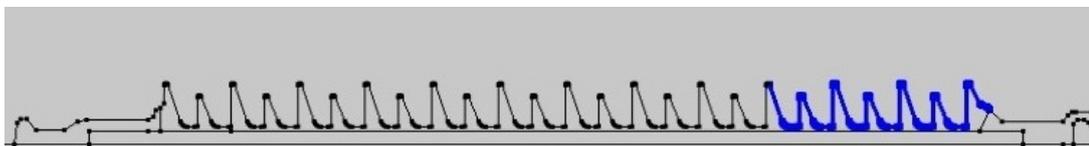
### **5.2.2 Simulações em que o Isolador possui 100% da Superfície Submetida a Camada Condutiva**

Visando verificar a diferença de potencial entre os pontos obtidos pelo método desenvolvido no capítulo 4, em condições nas quais uma superfície condutiva cobre toda superfície do isolador, é possível a utilização de um modelo em duas dimensões para representar o isolador polimérico coberto por uma camada.

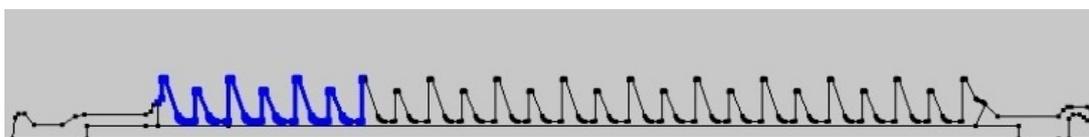
Na geometria do isolador limpo, é acrescentado uma camada de 1 mm ao longo de toda superfície do isolador, conforme apresentado na Figura 37. A camada condutiva consiste na inserção de um novo material ao problema e, por representar poluição e umidade, possui permissividade relativa de 80 (VOLAT, 2013) e condutividade a depender do nível de poluição considerado.

Figura 36 – Locais de inserção da condição de contorno de potencial flutuante para modelagem das descargas superficiais.

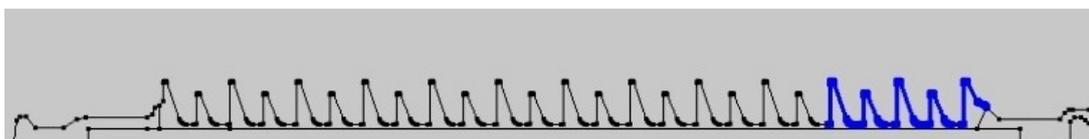
(a) Caso 1: contornando 25% da superfície próxima ao terminal de terra.



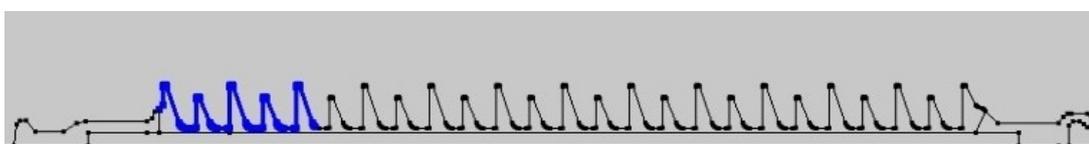
(b) Caso 2: contornando 25% da superfície próxima ao terminal de fase.



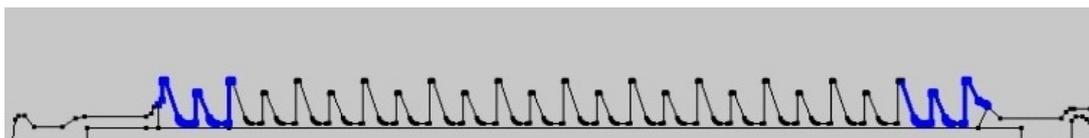
(c) Caso 3: contornando 20% da superfície próxima ao terminal de terra.



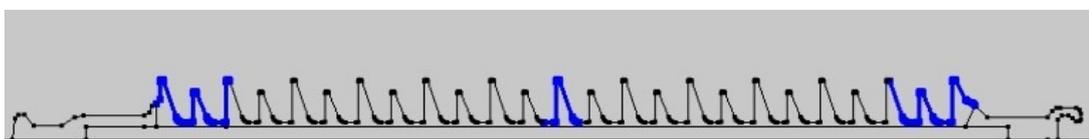
(d) Caso 4: contornando 20% da superfície próxima ao terminal de fase.



(e) Caso 5: contornando 10% da superfície próxima ao terminal de fase e 10% da superfície próxima ao terminal de terra.



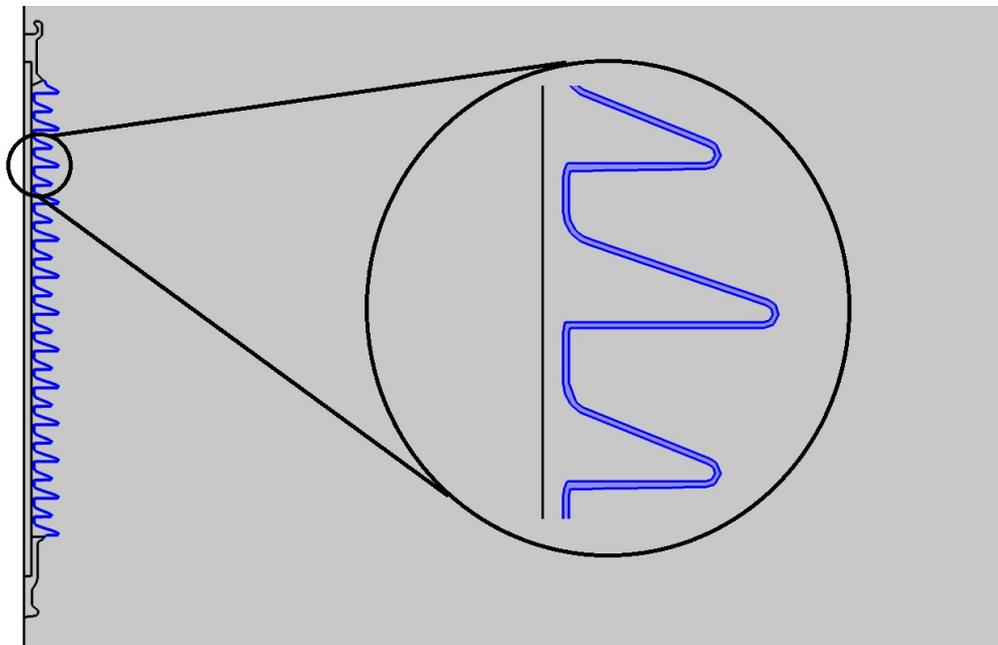
(f) Caso 6: contornando 10% da superfície próxima ao terminal de fase, 10% da superfície próxima ao terminal de terra e 5% no meio do isolador.



Fonte: O autor (2021).

As condutividades consideradas neste trabalho são: para o nível leve,  $100 \mu S/cm$ ; para o nível moderado,  $300 \mu S/cm$ ; para o nível pesado,  $600 \mu S/cm$  e para o nível muito pesado  $900 \mu S/cm$ . Todas as condutividades estão em conformidade com os valores apresentados na Tabela 2. Os demais materiais são os mesmos aplicados na condição em que o isolador está limpo.

Figura 37 – Geometria do problema na presença de uma camada com 1 *mm* de espessura cobrindo o isolador.



Fonte: O autor (2021).

As condições de contorno para esse caso são as mesmas apresentadas para o isolador limpo, expostas na Figura 35. Assim como para as simulações com o isolador limpo, é possível testar o método na condição da presença de descargas superficiais. Com esse fim, são aplicadas as condições de contorno de potencial flutuante apresentadas na Figura 36, na presença da camada condutiva para cada um dos casos de condutividade.

Por fim, é gerada uma malha de elementos finitos para que o problema possa ser resolvido. Semelhante a situação do isolador limpo, a malha foi gerada utilizando as opções presentes na plataforma do MEF, informações referentes à malha são apresentadas na Tabela 8.

### 5.2.3 Simulações em que o Isolador possui 1% da Superfície Submetida a Camada Condutiva

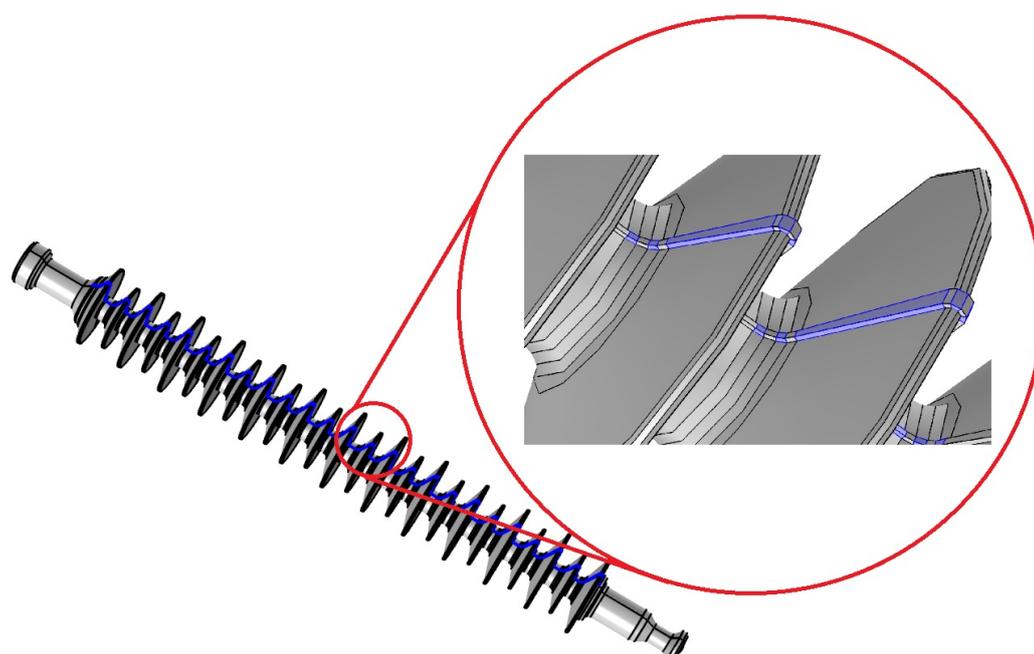
Conforme demonstrado por Ilhan et al. (2015), condutividades acima de 5  $\mu S/cm$  pouco alteram a distribuição de potencial ao longo da superfície do isolador em condições de tensão aplicada na frequência industrial e camada de 0,1 *mm* cobrindo

todo o isolador, devido a pouca variação da resistência da camada a partir desse valor de condutividade. Logo, para as faixas de condutividade apresentadas na Tabela 2 resultarem em variações na distribuição de potencial, é necessário alterar a resistência ao longo da camada. Essa implementação é possível ao variar a largura da camada, deixar de cobrir todo o isolador, ou a espessura da camada ser menor que 1 *mm*.

Reduzir a espessura da camada implica em uma maior dificuldade na geração da malha de elementos finitos, sendo assim optou-se por reduzir a área de cobertura da camada considerando o valor de apenas 1% da superfície.

Para possibilitar a obtenção de diversos perfis de distribuição de potencial, a camada foi subdividida em 312 partes, ou domínios, conforme exposto na Figura 38. O intuito dessa divisão é a geração de regiões de condutividade diferentes, possibilitando a definição de uma condutividade para cada região, representando assim uma camada com condutividade variável e, conseqüentemente, gerando diferentes perfis de distribuição de potencial.

Figura 38 – Representação do caminho condutivo com destaque nos domínios.

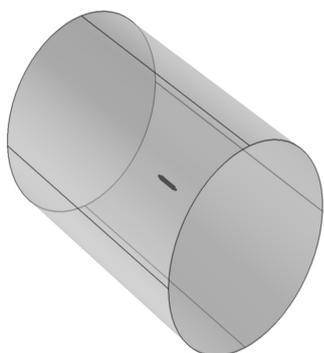


Fonte: O autor (2021).

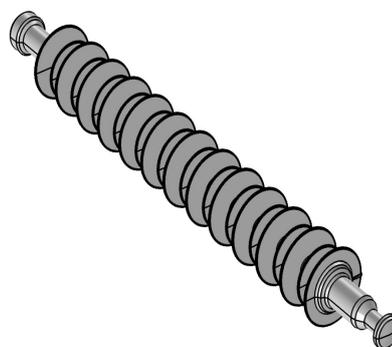
Além da camada e do isolador, a geometria é composta pelo espaço de simulação que consiste em um cilindro com raio de 3000 *mm* e altura de 8700 *mm*, no qual o isolador se encontra no centro. Na Figura 39, é apresentada a geometria do problema.

Figura 39 – Definição da geometria do problema.

(a) Espaço de simulação.



(b) Isolador polimérico.



Fonte: O autor (2021).

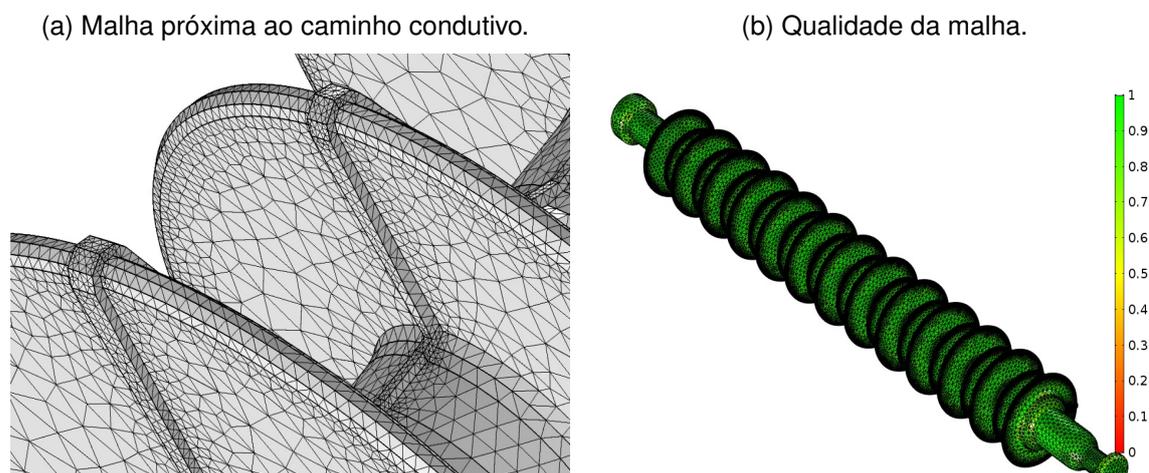
A forma como foi modelada a camada não representa, em sua completude, o comportamento em condições operacionais. Ela é útil para a geração de diversos perfis de distribuição de potencial e teste do método. Um modelo que fosse fiel ao processo de formação da camada em condições operacionais é complexo, visto que precisaria levar em consideração as características fluido-dinâmicas do problema, as características térmicas e elétricas. Prezando pela simplificação, optou-se pela abordagem apresentada neste trabalho.

Referente aos materiais, todos os domínios da camada possuem permissividade relativa de 80, semelhante ao da poluição nas simulações apresentadas na seção 5.2.2. As condutividades de cada domínio são definidas de acordo com a Tabela 2 e determinadas pela rotina que será apresentada na seção 5.2.3.1. Os demais materiais são os mesmos das outras simulações e possui suas propriedades apresentadas na Tabela 7.

Diferentemente das simulações anteriores, em que a tensão aplicada era variante no tempo, por motivos de simplificação da simulação, o potencial elétrico aplicado ao terminal fase do isolador para esta simulação é de  $69 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \text{ kV}$ , ou seja, valor de pico do sinal aplicado nos outros casos. O potencial de zero volts é aplicado ao terminal terra do isolador polimérico e ao limite inferior do espaço de simulação. Por fim, a condição de contorno do potencial flutuante, responsável por representar uma descarga superficial, tem local de aplicação determinado pela rotina automática que será apresentada na seção 5.2.3.1.

Em seguida, é gerada uma malha de elementos finitos através da plataforma para que o problema possa ser resolvido. Na Figura 40 é apresentada a malha gerada para esta simulação, mais informações sobre a malha podem ser vistas na Tabela 8.

Figura 40 – Ilustrações sobre a malha gerada.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 8 – Quantidade de elementos e qualidade da malha gerada com as diferentes representações geométricas utilizadas.

Representação Geométrica	Número de Elementos	Qualidade Média da Malha
2D sem camada	8353	0,8897
2D com camada	34153	0,9199
3D com caminho de 1%	3006125	0,6581

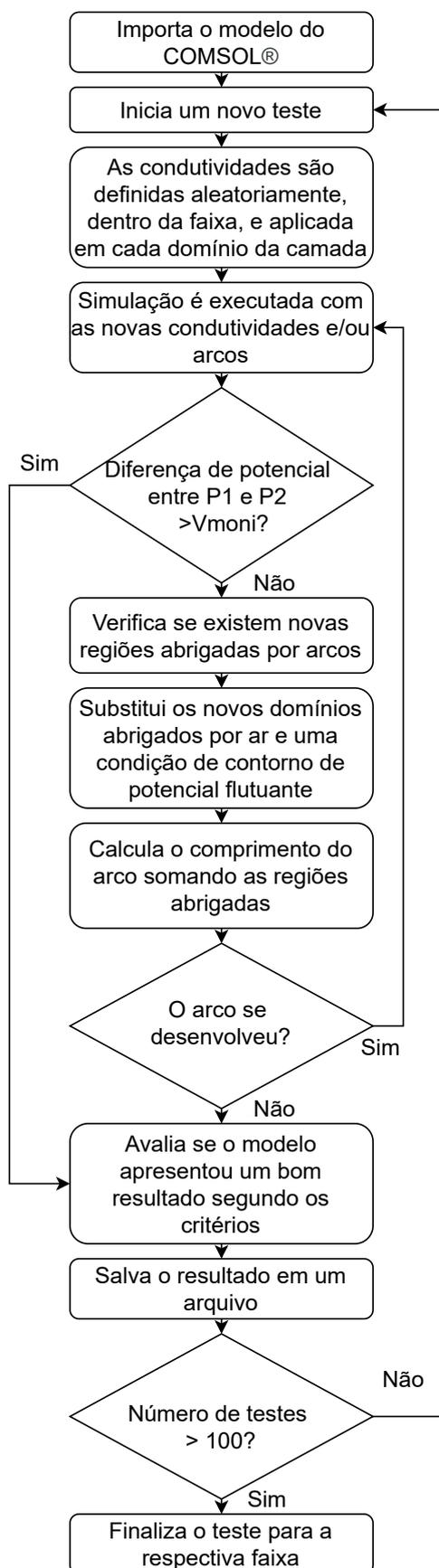
Fonte: O autor (2021).

Como apresentado anteriormente, a determinação do local das condições de contorno de potencial flutuante e a definição da condutividade em cada domínio do caminho condutivo é realizado através de uma rotina automática, possibilitando a execução de diversos testes do método.

### 5.2.3.1 Rotina Automática para Teste do Método

O principal objetivo da rotina é testar o método, ou seja, verificar a diferença de potencial entre os dois pontos de monitoração durante a ocorrência de descargas superficiais, para diversas combinações de condutividade no caminho condutivo, e atestar se o método obteve êxito ou não. Na Figura 41, é apresentado um fluxograma de como funciona a rotina de teste do método.

Figura 41 – Fluxograma da rotina utilizada para testar o método desenvolvido.



Fonte: O autor (2021).

Semelhante ao modelo utilizado para representar a deposição de poluição, a rotina não possui a intenção de simular precisamente, ou até prever, o fenômeno de descargas superficiais. Para isso ser possível seria necessário a adição de diversas grandezas a simulação, tais como: o calor devido a corrente de fuga, o fenômeno de reignição de arco, todas as questões de dinâmica de fluídos devido ao fluxo de água sobre a superfície, a influência do vento, entre outros. Em resumo, desenvolver um modelo com todas essas características é uma tarefa difícil, da mesma forma que demanda uma quantidade considerável de poder computacional para executá-la. Sendo assim, a rotina utilizada consiste em uma aproximação e indica se o comportamento esperado ocorre ou não.

Primeiramente, a rotina importa o problema modelado em elementos finitos conforme apresentado na Seção 5.2.3 e inicia um novo teste. Em seguida, a rotina define aleatoriamente as condutividades dos 312 domínios da camada condutiva. Para cada um dos domínios é definido um valor de condutividade dentro da respectiva faixa de teste. Por exemplo, caso a faixa de teste seja o grau de severidade da poluição leve é escolhido um valor de condutividade entre 0 e  $175 \mu S/cm$ , conforme apresentado na Tabela 2.

O valor sorteado não é o mesmo para toda a camada condutiva, e sim apenas para um dos 312 domínios, sendo esse processo repetido até que todos os 312 possuam valores de condutividade dentro da faixa desejada. Ao final dessa etapa se tem um caminho condutivo com condutividade não-uniforme.

O próximo passo consiste em executar a simulação com os novos valores de condutividade, gerando assim um novo perfil de distribuição de potencial e campo elétrico. Ao finalizar a execução, a rotina verifica a diferença de potencial entre os dois pontos definidos pelo método. Caso essa diferença de potencial seja superior ao valor monitorado, a rotina identifica que as condições para identificação do arco foram atingidas e irá fazer a relação entre o comprimento do arco e a tensão verificada para em seguida salvar o resultado em um arquivo.

No caso em que a diferença de potencial ainda não é superior àquela monitorada, se verifica a ocorrência de arcos superficiais para a nova configuração de distribuição de potencial e campo elétrico. Isto é feito verificando os pontos nos quais o campo elétrico é superior a  $2,1 kV/mm$ , conforme He e Gorur (2017). Caso sejam encontrados domínios com campo elétrico igual ou superior ao valor mencionado, o domínio é substituído por ar, configurando assim uma banda seca, e no local é colocado uma

condição de contorno de potencial flutuante indicando que toda aquela superfície possui o mesmo potencial elétrico, logo, um curto-circuito.

Após substituir todos os domínios com a condição de campo elétrico que indica a formação de um arco superficial, a rotina realiza a soma do comprimento de todos esses domínios, identificando o desenvolvimento ou estabilização do arco, em outras palavras, se manteve o mesmo comprimento sem a adição de novas regiões sob arcos.

Caso o arco tenha se estabilizado, a rotina prossegue para o diagnóstico e em seguida salva o resultado em um arquivo. No caso em que o arco se desenvolva, a rotina executa novamente a simulação com as novas regiões abrigadas por arcos, repetindo assim o processo até o arco chegar no comprimento máximo ou a tensão de monitoração ser maior que o valor especificado. Por fim, a rotina armazena o resultado em um arquivo.

Para cada faixa de poluição utilizada neste trabalho, são executadas cem simulações. Ao término dessas simulações a rotina encerra e o arquivo pode ser analisado. Essa rotina foi aplicada para os quatro graus de poluição considerados: leve, moderada, pesada e muito pesada.

### 5.2.3.2 Rotina de Comparação da Distribuição de Potencial com um Perfil Linear

Além da rotina para teste do método desenvolvido, faz-se necessário verificar se os perfis gerados no caso do caminho condutivo de 1% possuem uma distribuição de potencial linear.

Essa verificação é realizada através de um programa semelhante ao apresentado na Seção 5.2.3.1, porém nesse caso não existem descargas a serem analisadas. Realiza-se uma comparação entre uma reta com os parâmetros da simulação e a distribuição de potencial elétrico no isolador obtida pela simulação utilizando MEF.

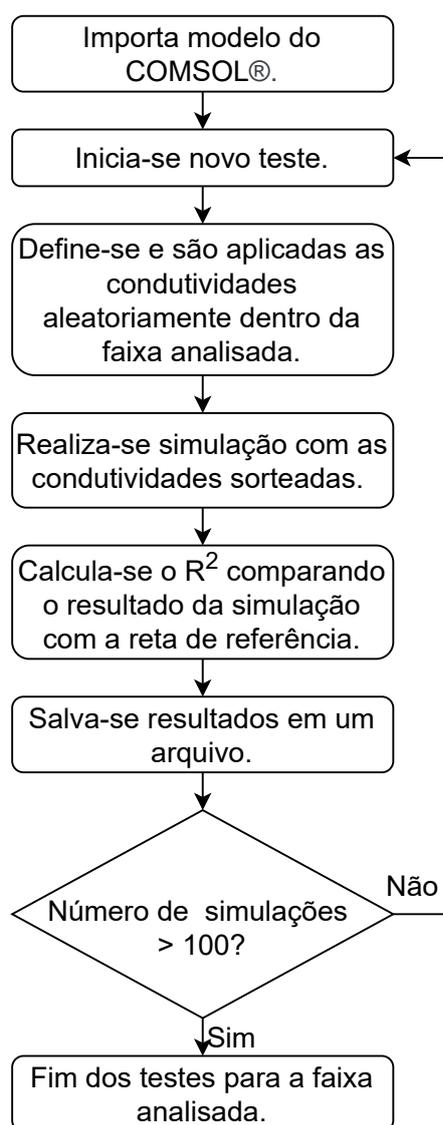
A reta de comparação é representada pela expressão 5.2, obtida utilizando o nível de tensão aplicada e distância de escoamento do isolador em estudo:

$$V(l_m) = -\frac{56,34}{1916,88}l_m + 56,34 \quad (5.2)$$

em que,  $V(l_m)$  é o potencial elétrico no ponto da distância de escoamento [ $kV$ ] e  $l_m$  é o ponto presente na distância de escoamento em que se quer obter o potencial elétrico [ $mm$ ].

Para determinação do quanto a distribuição de potencial se aproxima da reta de comparação é utilizado o coeficiente de determinação,  $R^2$ . Para este trabalho são considerados perfis lineares aqueles cujo resultado for igual ou superior a 0,95. Foram realizadas cem simulações para cada faixa de condutividade apresentada na Tabela 2. A Figura 42 apresenta um fluxograma com a implementação da rotina de comparação.

Figura 42 – Fluxograma da rotina de comparação entre distribuição de potencial e a reta de referência para um caminho condutivo com poluição não-uniforme.



Fonte: O autor (2021).

### 5.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados o material utilizado e os métodos aplicados no desenvolvimento deste trabalho. O material consiste em um isolador polimérico que serve para criação de um modelo computacional utilizando MEF, todas as características do isolador foram apresentadas.

Os métodos correspondem a representações computacionais com o objetivo de testar o método desenvolvido, verificando a diferença de potencial entre os pontos definidos pelo método para diversos perfis de potencial elétrico. As simulações tem como objetivo constatar se a diferença de potencial na região obtida constitui parâmetro indicativo de descargas superficiais. Considera-se que pelo menos 25% da distância de escoamento do isolador deve estar submetido a descargas superficiais.

O capítulo seguinte apresentará os resultados obtidos, bem como análises pertinentes ao estudo.

## 6 RESULTADOS E ANÁLISES

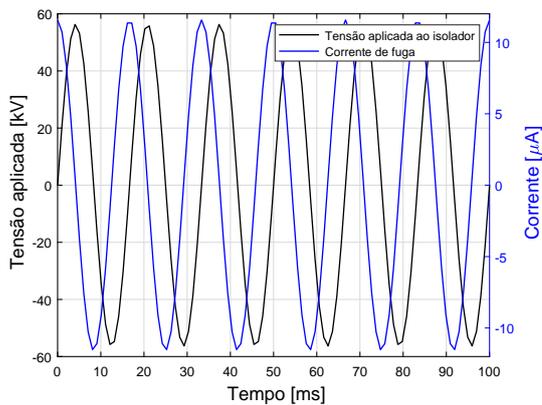
Inicialmente, são abordados os resultados e análises das simulações em que o isolador está limpo, em seguida para o isolador com camada condutiva uniforme cobrindo toda superfície do isolador e, por fim, aqueles referentes as simulações para um caminho condutivo que cobre apenas 1% da superfície do isolador.

### 6.1 SIMULAÇÕES COM O ISOLADOR LIMPO

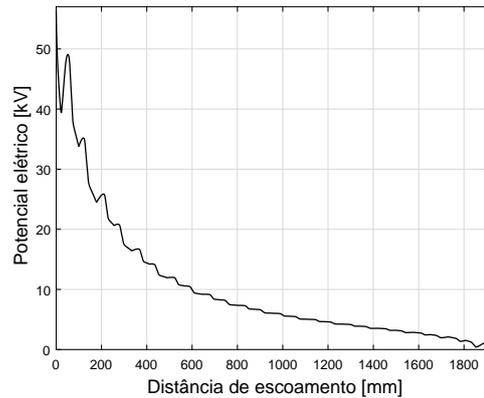
Na Figura 43, são expostos os resultados referentes ao isolador limpo sem descargas superficiais.

Figura 43 – Resultados para o isolador limpo sem descargas superficiais.

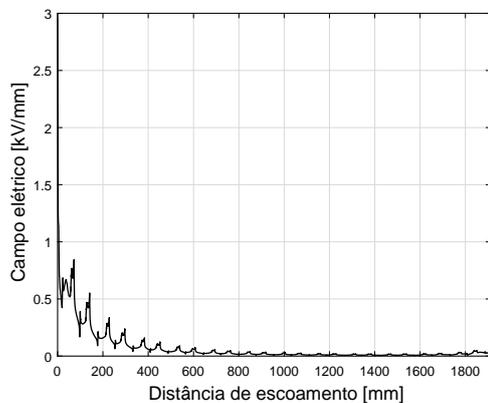
(a) Tensão aplicada e corrente de fuga.



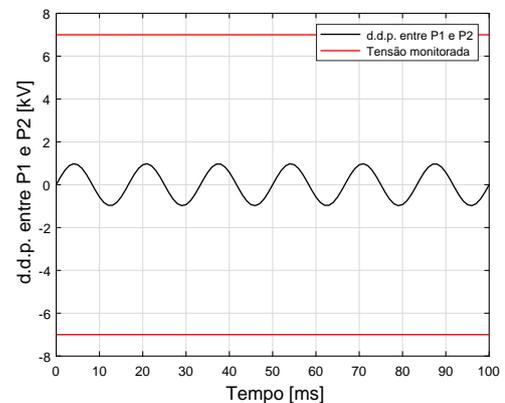
(b) Potencial elétrico ao longo do isolador para o valor de pico de tensão aplicada.



(c) Campo elétrico ao longo do isolador para o valor de pico de tensão aplicada.



(d) Diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 em relação a tensão monitorada.



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 43a, tem-se o gráfico da tensão aplicada no isolador juntamente com a corrente de fuga presente no isolador em que se nota o defasamento de noventa graus entre os dois gráficos. Essa característica implica em um comportamento capacitivo do isolador reforçado pelos valores de corrente encontrados com ordem de grandeza de  $\mu A$ , indicando apenas a presença da corrente de deslocamento do dielétrico.

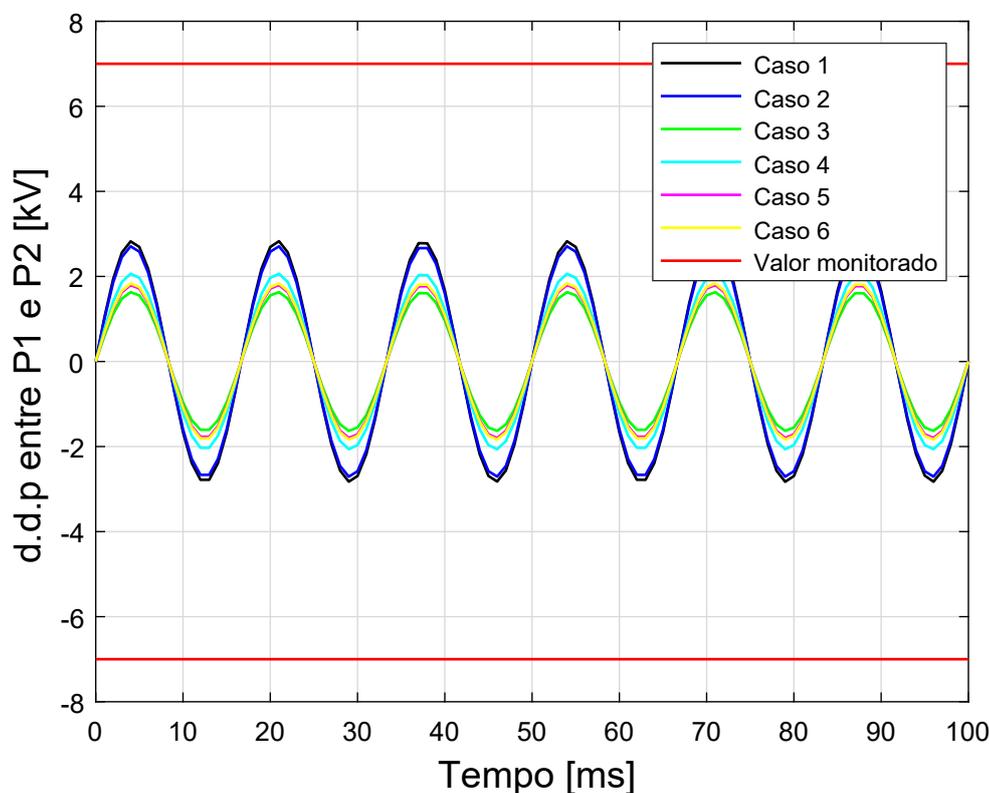
Na Figura 43b, é mostrada a distribuição de potencial, enquanto na Figura 43c a distribuição de campo elétrico. Ambas as figuras denotam que, conforme constatado através da análise de defasamento entre a corrente de fuga e a tensão aplicada, o isolador apresenta um comportamento capacitivo. Essa constatação é possível devido à concentração de potencial, e ao campo elétrico, no terminal fase, bem como dado pelo perfil não-linear da curva de potencial elétrico.

Por fim, na Figura 43d, é exposta a diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 comparadas com o valor que dá o indicativo de ocorrência de descargas cobrindo 25% da distância de escoamento do isolador em condições de poluição e umidade. O valor máximo da diferença de potencial encontrado foi de 977,59 V, distante do valor monitorado de 7 kV. Esse resultado está em linha com o método, indicando a ausência de poluição e descargas.

Na Figura 44, são apresentadas as diferenças de potencial entre os pontos P1 e P2 para cada um dos casos apresentados na Figura 36, em que os casos representam:

- caso 1: cenário em que é considerado um arco abrigando 25% da superfície próxima ao terminal de terra;
- caso 2: cenário em que é considerado um arco abrigando 25% da superfície próxima ao terminal de fase;
- caso 3: cenário em que é considerado um arco abrigando 20% da superfície próxima ao terminal de terra;
- caso 4: cenário em que é considerado um arco abrigando 20% da superfície próxima ao terminal de fase;
- caso 5: cenário em que é considerado um arco abrigando 10% da superfície próxima ao terminal de terra e 10% da superfície próxima ao terminal fase;
- caso 6: cenário em que é considerado um arco abrigando 10% da superfície próxima ao terminal de terra, 10% da superfície próxima ao terminal fase e 5% da região central do isolador.

Figura 44 – Diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 em relação a tensão monitorada em cada um dos casos considerados para o isolador limpo.



As curvas apresentadas na Figura 44 mostram que a ocorrência de descargas, mesmo sem poluição e umidade, aumentam a diferença de potencial entre os pontos definidos pelo modelo. Entretanto, essas descargas não provocam aumento da tensão suficiente de forma a indicá-las. Esse resultado é esperado de acordo com o método, visto que a indicação deve ocorrer no caso de formação da camada condutiva e descargas cobrindo 25% da distância de escoamento do isolador.

## 6.2 SIMULAÇÕES COM O ISOLADOR COBERTO POR UMA CAMADA CONDUTIVA

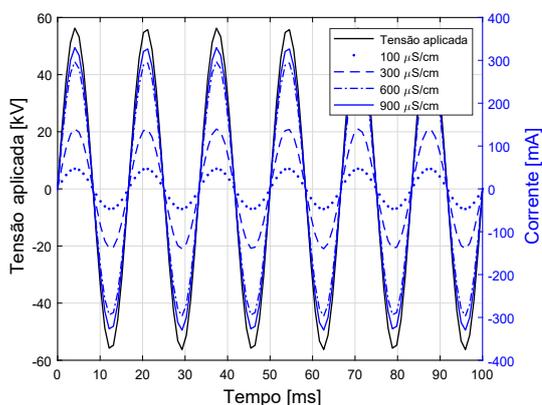
Primeiramente, são exibidos os resultados referentes as simulações nas quais o isolador está sob uma camada de poluição, porém sem a presença de descargas superficiais.

Os resultados para esse cenário são apresentados na Figura 45, em que gráficos

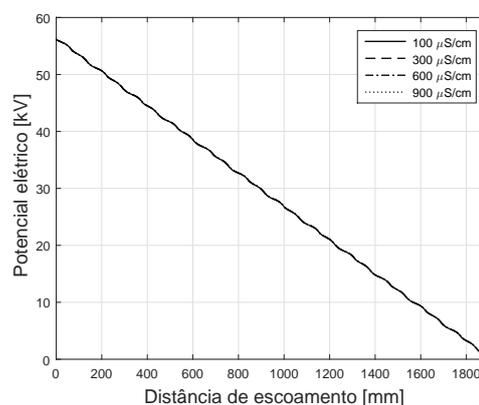
para as condutividades consideradas neste trabalho são exibidas. As condutividades são: para o nível leve,  $100 \mu S/cm$ ; para o nível moderado,  $300 \mu S/cm$ ; para o nível pesado,  $600 \mu S/cm$  e para o nível muito pesado  $900 \mu S/cm$ .

Figura 45 – Resultados para o isolador coberto por uma camada condutiva e sem descargas superficiais.

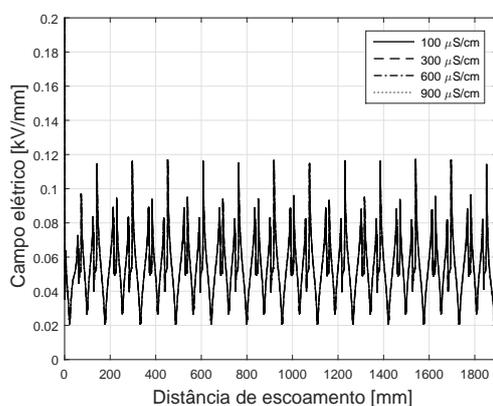
(a) Tensão aplicada e corrente de fuga em cada nível de condutividade considerado.



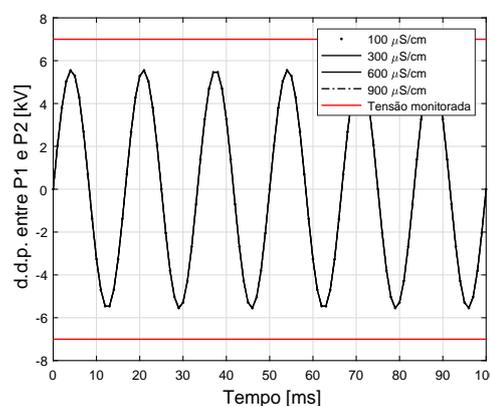
(b) Distribuição de potencial elétrico ao longo do isolador para cada nível de condutividade considerado.



(c) Distribuição de campo elétrico ao longo do isolador para cada nível de condutividade considerado.



(d) Diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 em cada nível de condutividade considerado.



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 45a, tem-se o gráfico da tensão aplicada juntamente com a corrente de fuga presente no isolador em cada grau de condutividade considerada. Nota-se que corrente e tensão estão em fase, indicando um comportamento resistivo devido à presença da camada condutiva sobre o isolador. Constata-se o aumento da corrente quando comparado com a situação do isolador sem a camada, de forma que a corrente aumenta da ordem de  $\mu A$  para  $mA$ . Verifica-se que a condutividade influi na corrente

de fuga, quanto maior a condutividade maior a corrente.

Na Figura 45b é mostrada a distribuição de potencial, enquanto na Figura 45c a distribuição de campo elétrico para cada um dos níveis de condutividade considerados. Nota-se o perfil linear da distribuição de potencial. Esse fenômeno corrobora com a defasagem entre a tensão aplicada e corrente de fuga, indicando a operação no regime resistivo. Confirmando as constatações de Ilhan et al. (2015), é nítido, para o caso simulado, que o aumento da condutividade não tem influência na distribuição de potencial, visto que as curvas para cada nível de condutividade estão sobrepostas.

Por fim, na Figura 45d, é exposta a diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 comparadas com o valor que dá o indicativo de ocorrência de descargas cobrindo 25% da distância de escoamento do isolador em condições poluição e umidade em cada grau de condutividade estudado. O valor máximo da diferença de potencial encontrado foi de 5,78 kV, inferior ao valor monitorado de 7 kV. Esse resultado está em linha com o método, indicando a ausência de poluição e descargas.

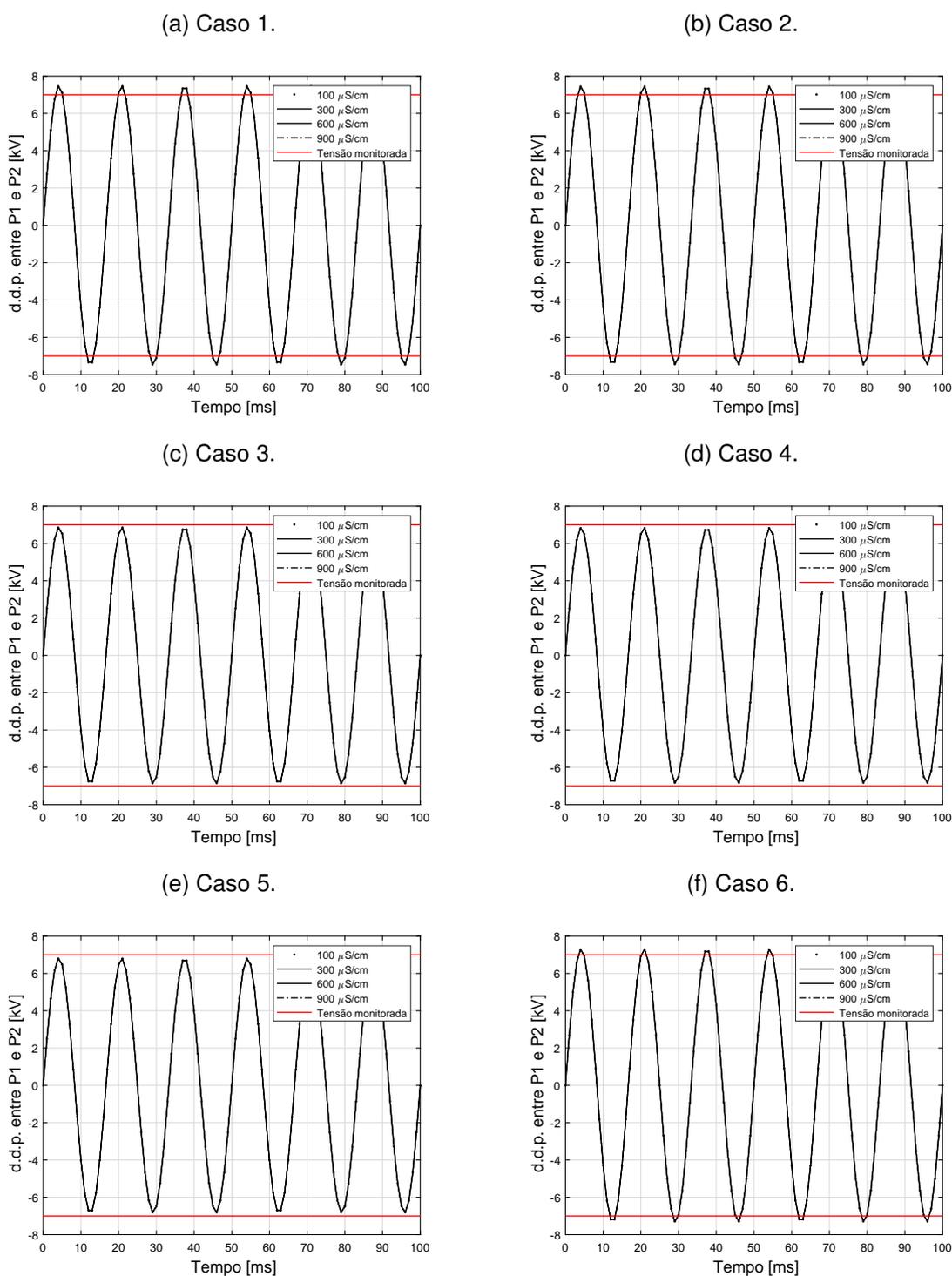
Na Figura 46, são apresentados os gráficos da diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 nos cenários em que ocorre a presença de descargas superficiais no isolador exibidos na Figura 36. Expostos nas Figuras 46a, 46b, 46c, 46d, 46e e 46f, podem ser visualizadas as diferenças de potencial entre P1 e P2 para todos os níveis de condutividade utilizados para os respectivos casos: caso 1, caso 2, caso3, caso 4, caso 5 e caso 6.

Em todos os gráficos da Figura 46, é possível constatar que o método obteve êxito. Nos casos em que as descargas cobriam 25% da distância de escoamento, casos 1,2 e 6, a diferença de potencial máxima entre os pontos definidos pelo método superam a tensão monitorada de 7 kV. Nos casos em que o arco cobre um percentual inferior a 25% da superfície do isolador, casos 3,4 e 5, o valor máximo da diferença de potencial não atinge a tensão monitorada, indicando que o arco não se propagou o suficiente.

### 6.3 SIMULAÇÕES EM QUE O ISOLADOR POSSUI 1% DA SUPERFÍCIE SUBMETIDA A CAMADA CONDUTIVA

Para cada um dos níveis de condutividade: leve, moderada, pesada e muito pesada, foram realizadas com simulações com diferentes perfis de distribuição de potencial.

Figura 46 – Diferença de potencial entre os pontos P1 e P2 em relação a tensão monitorada em cada um dos casos considerados na presença de uma camada condutiva que cobre todo o isolador.

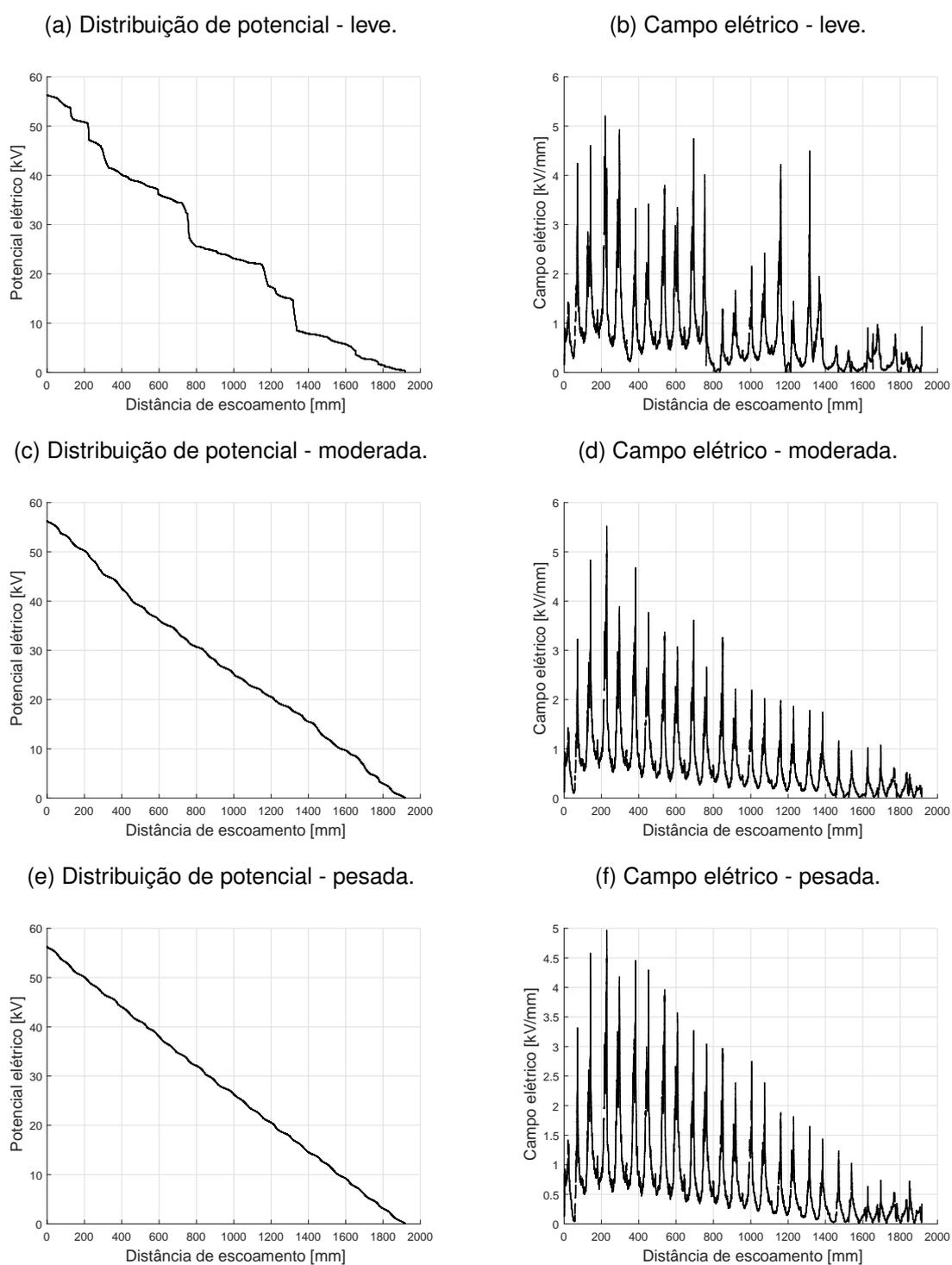


Fonte: O autor (2021).

Na Figura 47, podem ser visualizados exemplos de perfis de distribuição de

potencial e campo elétrico ao longo da superfície do isolador gerados pela rotina automática exposta na Figura 41.

Figura 47 – Exemplos de perfis de distribuição de potencial e campo elétrico gerados pela rotina apresentada na Figura 41 para as faixas de condutividade leve, moderada e pesada.



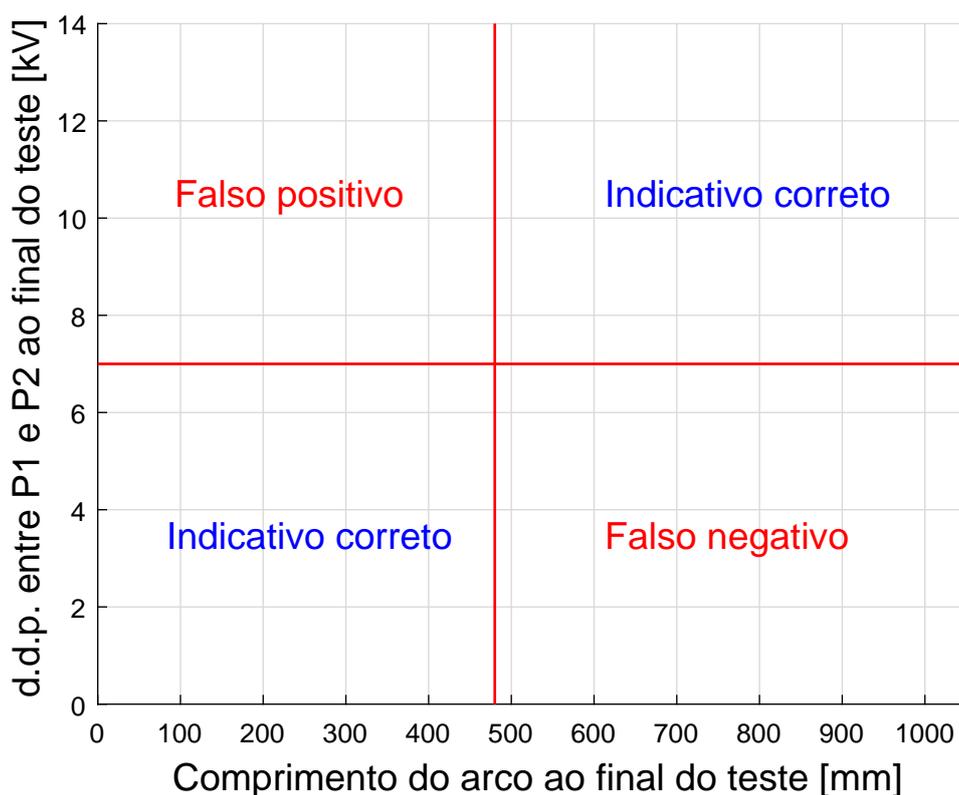
Fonte: O autor (2021).

Analisando a Figura 47, é possível ver que existem perfis gerados, principalmente na condutividade leve, que não se assemelham a um perfil linear.

Para os perfis apresentados na Figura 47, as diferenças de potencial nos pontos definidos através do método são de 7,85 kV na faixa de condutividade leve, 5,59 kV na moderada e 5,69 kV na pesada. Nota-se como o perfil não-linear, no cenário leve, concentra um potencial superior ao monitorado nos pontos definidos pelo método, levando assim a um falso positivo.

Na Figura 48, é apresentado um gabarito para o entendimento dos resultados obtidos. O resultado de cada simulação é apresentado como um ponto, consistindo de um par ordenado, em que a componente X representa o comprimento do arco no final da simulação e a componente Y a diferença de potencial entre os pontos P1 e P2.

Figura 48 – Gabarito dos testes do método.



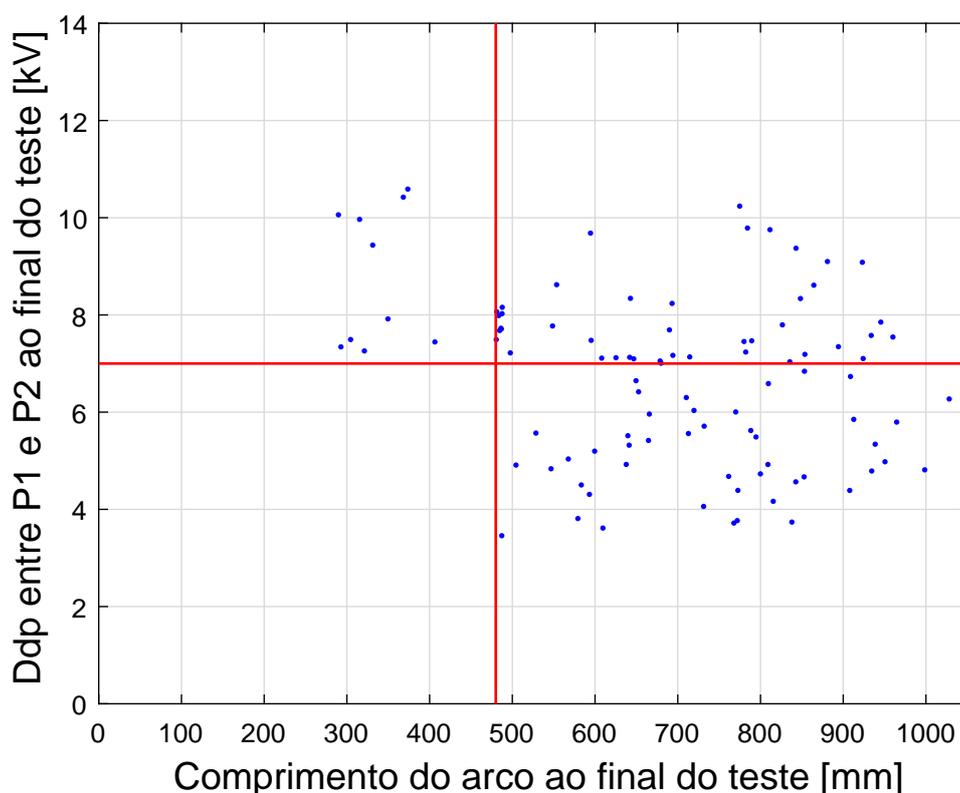
Fonte: O autor (2021).

O ponto que representa o resultado da simulação pode estar em um dos quadrantes apresentados na Figura 48, sendo assim, o método obtêm êxito nas simulações em que os pontos estão nos quadrantes denominados "indicativo correto" e falha se estiver em algum dos outros quadrantes.

Resultados no quadrante "falso positivo" são referentes às simulações nas quais houve uma diferença de potencial maior que a monitorada entre os pontos P1 e P2, porém não houve um arco que abrigasse mais do que 25% da superfície do isolador. Os chamados "falsos negativos" consistem em simulações nas quais o comprimento do arco abriga mais do que 25% da superfície do isolador, entretanto não houve uma diferença de potencial entre P1 e P2 maior do que a tensão monitorada.

Na Figura 49, são apresentados os resultados das cem simulações realizadas para o cenário leve. Nota-se que nem todas as simulações obtiveram êxito: 10 simulações resultaram em falsos positivos, indicando um arco que não ocorreu, bem como 47 simulações resultaram em falsos negativos, não reconhecendo o arco mesmo com o comprimento considerado. No total, 43 simulações indicaram corretamente a ocorrência do arco.

Figura 49 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa leve.



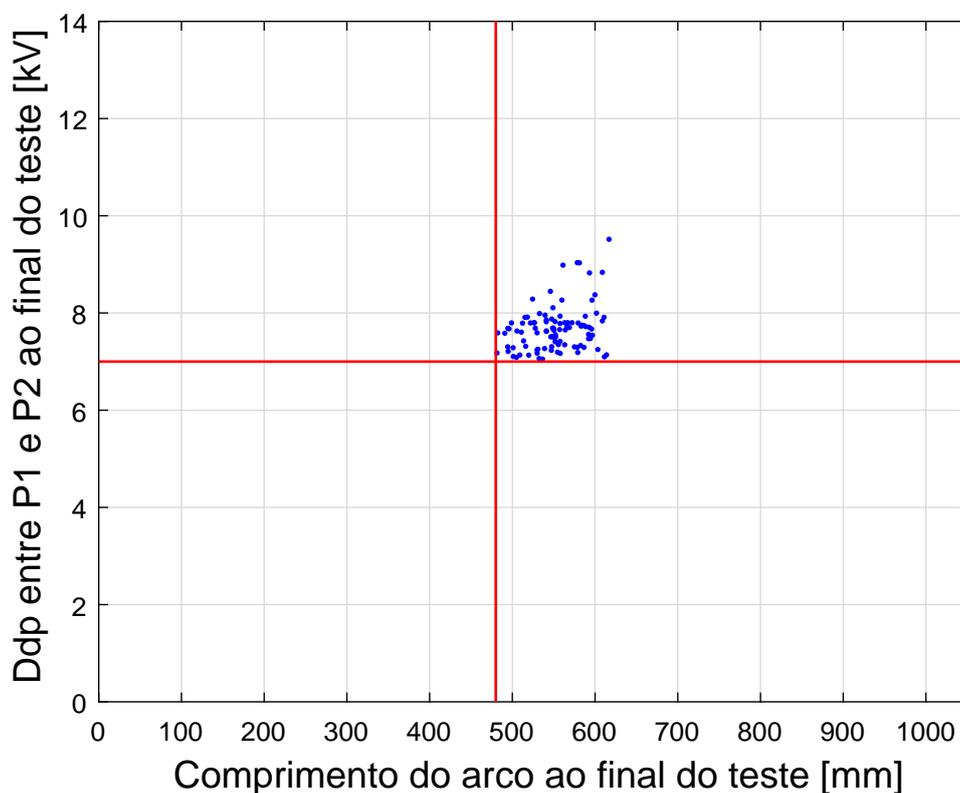
Fonte: O autor (2021).

A razão do insucesso do método para essa classe de poluição está na presença de não-linearidades na distribuição de potencial. Conforme apresentado na Figura 47a, essa classe de condutividade é a que apresenta os perfis mais distantes de um

comportamento linear. Essas não linearidades dificultam o sucesso do método, visto que o comportamento linear é uma das aproximações adotadas pelo mesmo. Na Figura 50, são apresentados os resultados das cem simulações realizadas para o cenário de condutividade moderada.

Através da Figura 50, é possível constatar que o método obteve o comportamento esperado em todas as simulações para o nível moderado, indicando adequadamente a ocorrência de arcos que abrigam pelo menos 25% da superfície do isolador.

Figura 50 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa moderada.



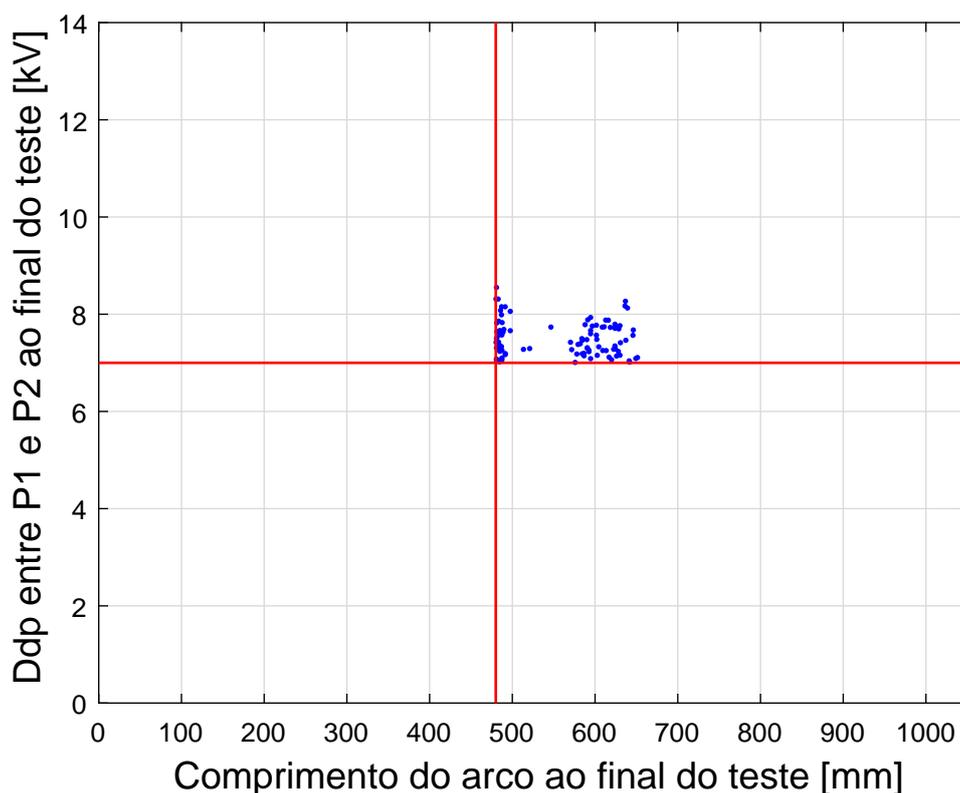
Fonte: O autor (2021).

Na Figura 51 são apresentados os resultados das cem simulações realizadas para o cenário de condutividade pesada. Analisando a Figura 51, é possível constatar que, novamente, o método obteve o comportamento esperado em todas as simulações, indicando adequadamente a ocorrência de arcos que abrigam pelo menos 25% da superfície do isolador.

Expostos na Figura 52 estão os resultados referentes às cem simulações para

o cenário de condutividade muito pesada. Semelhante aos resultados obtidos para a faixa de condutividade pesada, o método obteve êxito em todos os casos simulados.

Figura 51 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa pesada.



Fonte: O autor (2021).

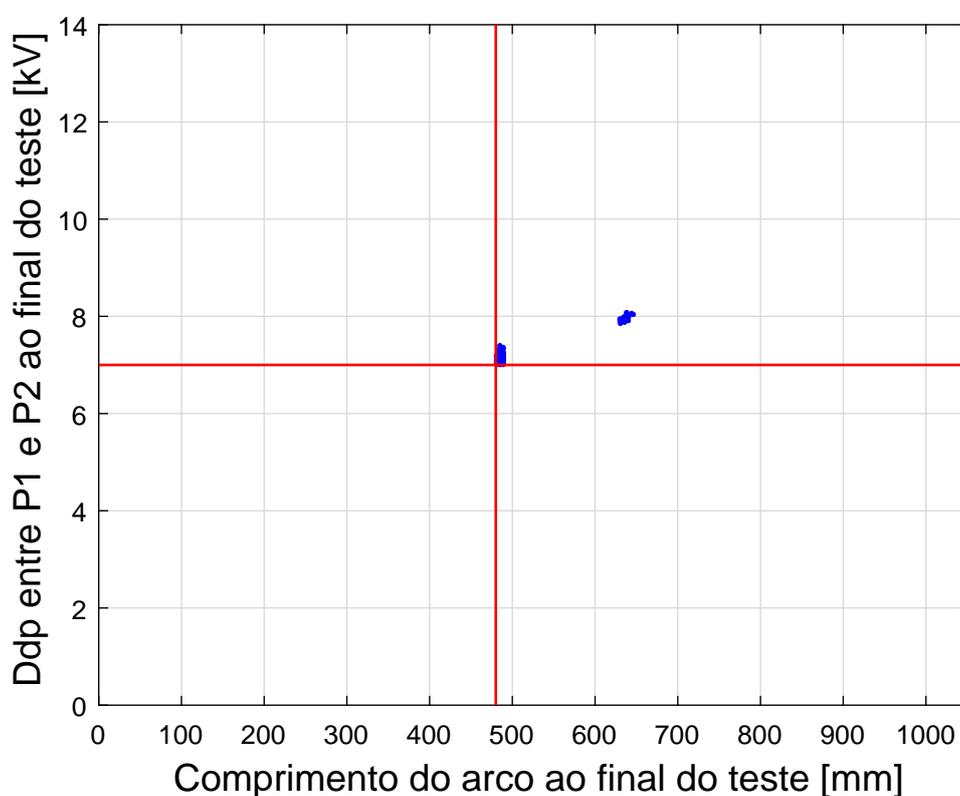
Nas Figuras 51 e 52, principalmente na Figura 52, é possível identificar uma tendência de concentração dos resultados em duas regiões: uma próxima aos valores definidos na aplicação do método para tensão monitorada e comprimento do arco, e outra um pouco mais afastada acima e a direita no gráfico com relação aos valores determinados no método.

Esse comportamento ocorre por dois motivos: a distribuição obtida ser melhor representada por um perfil linear quanto maior o nível de condutividade, atendendo assim a aproximação utilizada para o desenvolvimento do método, e o número de iterações das simulações teste executadas.

Considerando que a implementação do teste é iterativa, a qual possui duas condições de parada: a diferença de potencial entre os pontos definidos pelo método ser superior ao valor monitorado, ou estabilização do comprimento do arco com relação

a iteração anterior. Tem-se, em uma determinada iteração, que o valor da diferença de potencial medido entre P1 e P2 é muito próximo do valor da tensão monitorada, porém não igual ou superior, a rotina realiza outra iteração. Assim o arco se propaga mais, aumentando o comprimento abrigado e, conseqüentemente, a tensão entre os pontos definidos pelo método. Ao avaliar a diferença de potencial, o teste verifica que o valor é superior ao monitorado finalizando o teste. Dessa forma, o arco se propaga mais até que o teste consiga constatar que o valor da tensão monitorada foi ultrapassado.

Figura 52 – Resultados das cem simulações no cenário de condutividade na faixa muito pesada.



Fonte: O autor (2021).

Com o objetivo de investigar a relação entre a formação de perfis não-lineares com os resultados apresentados, mais cem simulações para cada cenário de condutividade foram realizadas. Nesse grupo de simulações, a rotina utilizada é apresentada pelo fluxograma exposto na Figura 42. Não são considerados arcos na superfície do isolador, as análises são feitas baseadas no perfil de distribuição de potencial gerado pelas condutividades e o coeficiente de determinação é calculado. Na Tabela 9, são expostos os resultados dos coeficientes de determinação obtidos em

cada faixa de condutividade considerada.

Tabela 9 – Valor de  $R^2$  para cada faixa de condutividade.

Grau de Severidade	Condutividade da Camada [ $\mu S/cm$ ]	$R^2$ Médio	$R^2$ Máximo	$R^2$ Mínimo
Leve	0 à 175	0,793	0,993	0,038
Moderada	176 à 500	0,993	0,999	0,974
Pesado	501 à 850	0,998	1	0,992
Muito Pesado	>850	0,999	1	0,998

Fonte: O autor (2021).

Analisando a Tabela 9, constata-se que a faixa de condutividade leve é a única que apresenta valores de coeficiente de determinação inferiores a 0,95, valor utilizado para se considerar um perfil linear. Dado que a faixa de condutividades tida como leve foi a única na qual o método não obteve sucesso em todos os casos, verifica-se, então, que a presença de não linearidades é condição para insucesso do método desenvolvido.

Apesar dos resultados satisfatórios, é necessário salientar que as simulações executadas consistem em um modelo simplificado dado a complexidade do fenômeno. Por esse motivo, experimentos que visam uma representação mais fiel são imperativos. Não obstante as aproximações realizadas, 435 simulações com perfis de poluição e arcos aleatórios foram executadas para cada faixa de condutividade considerada. Portanto, os resultados encontrados são válidos como teste para o método desenvolvido.

Constatou-se a ocorrência de falsos positivos e negativos para o nível de condutividade leve. Essa constatação não inviabiliza uma futura técnica de identificação de descargas superficiais em isoladores poliméricos, visto que em outras técnicas, desenvolvidas e implementadas, falsos diagnósticos também podem ocorrer. Porém, é necessário determinar se a taxa de acerto satisfaz os requisitos de uma técnica de diagnóstico eficiente. Estudos referentes a eficiência só serão possíveis após o desenvolvimento completo da técnica de monitoração e não apenas com a definição da região a ser monitorada, conforme proposto nesta tese.

## 6.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados referentes aos testes do método desenvolvido neste trabalho. Ao total foram executadas 435 simulações.

Sete simulações considerando o isolador limpo, a primeira em que o isolador está limpo e sem a ocorrência de arcos em sua superfície, e as outras seis que levam em consideração a ocorrência desses arcos. Vinte e oito simulações considerando o isolador em que toda sua superfície está submetida a uma camada uniforme de mesma condutividade, na presença e na ausência de arcos de superfície pré-definidos. Por fim, quatrocentas simulações considerando o isolador coberto por apenas 1% da sua superfície por uma camada condutiva com condutividade variável e formação de arcos.

No total, o método obteve uma taxa de acerto de 87%. Entretanto, as situações em que o método não obtêm sucesso ocorrem apenas na condição de poluição leve, na qual a taxa de acerto é reduzida para 43%, visto que o perfil da distribuição de potencial não é linear. Nos outros cenários estudados, os pontos conseguem identificar a ocorrência de um arco dada sua diferença de potencial.

Diante do exposto, constata-se que é possível utilizar as variações na distribuição de potencial como parâmetro de identificação de descargas superficiais em isoladores poliméricos, desde que o perfil da distribuição possa ser representado por um comportamento linear.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e algumas sugestões de trabalhos futuros.

### 7.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho, verificou-se, portanto, através de modelos computacionais, a viabilidade de se monitorar o estado operacional de isoladores poliméricos a partir de avaliações do comportamento dinâmico da diferença de potencial em trechos críticos, devidamente balizados.

A avaliação do comportamento dinâmico da distribuição de potencial foi realizada através de simulações nas quais foram empregados MEF para criação de modelos físicos bidimensionais e tridimensionais, com objetivo de definir a distribuição de potencial ao longo do isolador polimérico. Foram considerados os cenários em que o isolador está limpo e sem a presença de arcos superficiais, isolador com camada condutiva uniforme sem a ocorrência de arcos superficiais e na presença de arcos pré-determinados, bem como o isolador submetido a camada condutiva com condutividade não uniforme e arcos em sua superfície.

Baseado no comportamento da distribuição de potencial no momento em que o isolador está submetido a uma camada condutiva e sob descargas superficiais, desenvolveu-se um método que resulta na determinação de dois pontos na superfície do isolador que definem uma região na qual é possível a identificação da ocorrência de um arco, ou soma de arcos, que abriga pelo menos vinte e cinco por cento da distância de escoamento do isolador. Durante a ocorrência de arcos superficiais é verificado um aumento na diferença de potencial elétrico entre os dois pontos obtidos, atingindo, em determinado momento, o valor definido na aplicação do método, que indica a ocorrência de uma descarga com comprimento considerado. Neste trabalho, adotou-se o valor de 7 kV como diferença de potencial a ser monitorada.

Ao todo, foram executadas 435 simulações através das quais a aferição da diferença de potencial no trecho crítico obtido pelo método foi verificada. Atingiu-se uma taxa de sucesso em cem por cento dos testes para o isolador limpo, poluído uniformemente com e sem arcos superficiais para todas as faixas de poluição consideradas, e para os níveis de condutividade moderada, pesada e muito pesada

no caso de poluição com condutividade não uniforme. Entretanto, obteve uma taxa de acerto de 47% para os casos em que está submetido a uma camada condutiva com condutividade não uniforme na faixa leve. Comprovou-se que o motivo do método não obter sucesso resulta da não linearidade da distribuição de potencial que ocorre nesse cenário, gerando concentrações de tensão entre os pontos definidos pelo método sem que necessariamente haja a ocorrência de um arco. Ainda é necessária a realização de testes experimentais que repliquem com maior fidelidade possível as condições de operação do isolador, visando uma maior proximidade com as condições observadas em campo.

Pelo exposto, conclui-se que o comportamento dinâmico da distribuição de potencial ao longo da cadeia de isoladores poliméricos pode ser utilizado como parâmetro de monitoração do seu estado. O método desenvolvido se mostrou capaz de identificar um arco de superfície com um dado comprimento, caso a distribuição de potencial na superfície do isolador seja uniforme. Contanto que essa premissa seja atendida, condição que ocorre na presença de uma camada condutiva estabelecida na superfície do isolador, é possível aplicação do método para isoladores poliméricos diversos. Para isto, são necessárias a tensão máxima aplicada e a distância de escoamento do isolador, e a diferença de potencial definida como valor de indicação do arco.

Sendo assim, a identificação de trechos críticos da cadeia de isoladores permite embasar o desenvolvimento de uma nova técnica de monitoração de isoladores poliméricos em tempo real. Para implementação dessa nova técnica é necessário a determinação de quais pontos da superfície do isolador devem ter o potencial elétrico monitorado, de forma a indicar a ocorrência de uma descarga superficial, questão respondida por este trabalho. Possíveis estudos podem ser realizados com objetivo de verificar o comportamento da diferença de potencial nos pontos obtidos pelo método para outros tipos de defeitos.

A nova técnica de monitoração sinalizada se vislumbra competitiva, diante das dificuldades ou impossibilidades práticas e econômicas das técnicas atualmente utilizadas. Esse aspecto se torna ainda mais fortalecido ao se considerar a necessidade de uma monitoração em tempo real de um fenômeno que possui uma característica essencialmente aleatória.

## 7.2 TRABALHOS FUTUROS

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

1. Teste do método desenvolvido através da realização de experimentos normatizados que repliquem com maior fidelidade possível as condições de operação do isolador.
2. Adaptação e teste do método desenvolvido para cadeias de isoladores de vidro.
3. Verificação do comportamento da diferença de potencial nos pontos indicados pelo método fora das condições nominais de operação: surto de manobra e descargas atmosféricas.
4. Verificação do comportamento da diferença de potencial nos pontos indicados pelo método para identificação de descargas internas em isoladores poliméricos.
5. Verificação do comportamento da diferença de potencial nos pontos indicados pelo método provocada por anéis equalizadores.
6. Desenvolvimento de dispositivo para medição da diferença de potencial elétrico entre os pontos obtidos através do método, viabilizando assim uma nova técnica de diagnóstico em isoladores.

## 7.3 TRABALHOS PUBLICADOS/SUBMETIDOS

Nesta seção são apresentados os trabalhos publicados pelo autor durante o período do doutorado.

### 7.3.1 Publicação em Periódico

J. M. B. Bezerra, S. H. M. S. Rodrigues, B. R. F. Lopes, **D. S. Lopes** and V. A. L. Ferreira, "Evaluating failures of polymer insulators in Brazilian distribution networks", in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 35, no. 1, pp. 38-44, January-February 2019.

### 7.3.2 Publicações em Congressos

V. A. L. Ferreira, **D. S. Lopes** and J. M. B. Bezerra, "Dynamic voltage distribution analysis applied to a polymer insulator chain", 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Niterói, 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/SBSE.2018.8395823

V. A. L. Ferreira, **D. S. Lopes** and J. M. B. Bezerra, "Performance Evaluation of Polymeric and Ceramic Insulators from a Dynamic Variations Analysis of Voltage Distribution along the String", 2018 International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Athens, Greece, 2018, p.4.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, D. *Dois terços das indústrias têm prejuízos com falhas no fornecimento de energia elétrica, diz pesquisa da CNI*. 2016. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/infraestrutura/dois-tercos-das-industrias-tem-prejuizos-com-falhas-no-fornecimento-de-energia/-eletrica-diz-pesquisa-da-cni/>>. Acesso em: 07 janeiro 2020. Citado na página 19.
- ADAMI, J. F. *Detecção e Identificação de Arcos de Contorno em Cadeias de Isoladores de Linhas de Transmissão Utilizando Técnicas de Processamento de Sinais*. Tese de Doutorado — UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 78.
- AHMADI-JONEIDI, I.; SHAYEGANI-AKMAL, A. A.; MOHSENI, H. Leakage current analysis of polymeric insulators under uniform and non-uniform pollution conditions. *IET Generation, Transmission Distribution*, v. 11, n. 11, p. 2947–2957, 2017. ISSN 1751-8695. Citado na página 23.
- ALBANO, M. et al. Infrared analysis of dry-band flashover of silicone rubber insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 23, n. 1, p. 304–310, 2016. Citado na página 76.
- ALBUQUERQUE, E. L. de. *Análise e Tomada de Decisão Utilizando Sistema de Monitoramento via Satélite para Poluição em Cadeia de Isoladores de Alta Tensão*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Agosto 2014. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 21.
- ALVES, L. N. T. *Classificação da Hidrofobicidade em Isoladores Elétricos Empregando o Guia STRI e Processamento Digital de Imagem*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2018. Citado na página 31.
- ANEEL. *Relatório de Análise dos Desligamentos Forçados do Sistema de Transmissão*. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/656808/0/Relat%C3%B3rio+de+An%C3%A1lise+de+Desligamentos+For%C3%A7ados+do+Sistema+de+Transmiss%C3%A3o+-+Edi%C3%A7%C3%A3o+2017/7a991934-f7b4-5835-07e1-4349bd513f96>>. Acesso em: 07 janeiro 2020. Citado na página 19.
- ARSHAD et al. Effect of pollution severity on electric field distribution along a polymeric insulator. In: *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 612–615. ISSN 2160-9225. Citado 6 vezes nas páginas 57, 58, 70, 72, 77 e 78.
- ASENJO, S. E.; MORALES, O. N. Low frequency complex fields in polluted insulators. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-17, n. 3, p. 262–268, June 1982. ISSN 1557-962X. Citado 3 vezes nas páginas 69, 70 e 72.
- AYDOGMUS, Z.; CEBECI, M. A new flashover dynamic model of polluted hv insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 11, n. 4, p. 577–584, Aug 2004. ISSN 1558-4135. Citado 3 vezes nas páginas 69, 72 e 78.

AZEVEDO, A. F. M. *Método dos Elementos Finitos*. 2003. Disponível em: <<http://www.fe.up.pt/~alvaro>>. Acesso em: 26 março 2020. Citado na página 60.

BASTOS, J.; SADOWSKI, N. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, Marcel Dekker, 2003. (Electrical and Computer Engineering). ISBN 9780849313974,084931397X. Citado na página 60.

BELLERIVE, J. P. Performance of porcelain insulators: Forty years of experience at hydro-québec. *Canadian Electrical Association, Transmission Section, Spring Meeting*, Março 1990. Citado na página 66.

BENNETT, C. E. *Instrument for Locating and Observing Defective Insulator Units*. 1925. *United State Patent*. 1925. Citado 3 vezes nas páginas 66, 67 e 72.

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 3 vezes nas páginas 50, 55 e 85.

CÂMARA, A. S. B. *Modelagem de Arco Elétrico no Ar. Aplicações em Sistemas de Potência*. Tese de Doutorado — UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010. Citado na página 78.

CAPELINI, R. M. *Inspeção Remota de Isoladores em Linhas de Transmissão a Partir de Sinais de Descargas Parciais Externas*. Tese de Doutorado — UNIFEI, Universidade Federal de Itajubá, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.

CAPELINI, R. M. et al. Development of a system for detecting and locating damaged insulator strings with signals collected at substation. *Ingenieria e Investigacion.*, v. 35, p. 43–48, 2015. Citado na página 78.

CASTELLI, C. *Apparecchio per individuare gli isolatori guasti o difettosi montati su linee elettriche in tensione, Patente italiana No. 502453, 30 de Novembro de. 1954*. Citado 3 vezes nas páginas 67, 68 e 72.

CHAKRABORTY, R.; REDDY, B. S. Performance of silicone rubber insulators under thermal and electrical stress. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 3, p. 2446–2454, May 2017. ISSN 0093-9994. Citado na página 35.

CHAKRAVORTI, S.; MUKHERJEE, P. K. Power frequency and impulse field calculation around a hv insulator with uniform or nonuniform surface pollution. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 1, p. 43–53, Feb 1993. ISSN 0018-9367. Citado na página 51.

CHENG, Y.; LI, C. Online detecting composite insulators by two dimensions electric field distribution. In: *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 132–135. ISSN 1089-084X. Citado na página 23.

CHESF. *IM-MN-LT-M.026 - Inspeção Noturna em Isoladores de Linhas de Transmissão e Barramentos de Subestações*. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 75.

DEVORE, J. L. *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. 9ed.. ed. [S.l.]: Cengage Learning;Brooks Cole;Cengage, 2016. ISBN 1305251806,978-1-305-25180-9. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

DIAS, B. A. *Simulação Computacional da Poluição Biológica em Isoladores de Vidro*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2017. Citado na página 90.

DIAS, B. A. *Gestão Técnica de Isoladores Poliméricos Utilizando Aprendizado de Máquina*. Tese de Doutorado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.

DINIZ, L. *Aprimoramento da Inspeção de Isoladores Poliméricos Correlacionando Temperatura e Campo Elétrico*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 23.

DOMINGUES, E. D. S. *Improved Condition Monitoring of Composite Insulators*. Tese de Doutorado — University of Manchester, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 34, 44 e 46.

EPRI. *Transmission line reference book; 345 kV and above*. 2 ed.. ed. [S.l.], 1975. Citado na página 51.

EPRI. *Field Guide: Visual Inspection of Polymer Insulators*. 2006. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/1013283/?lang=en-US>>. Acesso em: 7 março 2020. Citado 4 vezes nas páginas 40, 44, 46 e 48.

ERBETTA, C. D. C. *Caracterização e Estudo de Envelhecimento de Isolador tipo Pino em PEAD Utilizado no Setor Elétrico*. Tese de Doutorado — UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. Citado na página 32.

FARZANEH, M.; CHISHOLM, W. A. *Insulators for Icing and Polluted Environments (IEEE Press Series on Power Engineering)*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 0470282347,9780470282342. Citado 5 vezes nas páginas 32, 36, 38, 39 e 43.

FERREIRA, T. V. *Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Maio 2007. Citado na página 31.

FERREIRA, T. V. *Estimação Inteligente da Poluição de Isolamentos Elétricos Baseada nos VECSE do Ruído Ultrasônico*. Tese de Doutorado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Abril 2011. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.

FERREIRA, V. A. L. *Fundação Teórica e Experimental para Monitoração em Cadeia de Isoladores de Vidro com Base nas Variações de sua Distribuição de Tensão*. Dissertação de Mestrado — UFPE, Universidade Federal de Pernambuco, Julho 2019. Citado 5 vezes nas páginas 68, 72, 78, 130 e 133.

FERREIRA, V. A. L.; LOPES, D. S.; BEZERRA, J. M. B. Dynamic voltage distribution analysis applied to a polymer insulator chain. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 85.

FORREST, J. S. The characteristics and performance in service of high-voltage porcelain insulators. *Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part II: Power Engineering*, v. 89, n. 7, p. 60–80, February 1942. Citado 3 vezes nas páginas 67, 68 e 72.

FREI, W. *Improving Your Meshing with Swept Meshes*. 2015. Disponível em: <<https://www.comsol.com/blogs/improving-your-meshing-with-swept-meshes/>>. Acesso em: 26 março 2020. Citado na página 61.

FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*. 1. ed. Itajubá: LTC/EFEL, 1977. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

GORUR, R. S. *Condition Assessment of Polymer Insulators*. 2003. Disponível em: <[https://pserc.wisc.edu/documents/general\\_information/presentations/pserc\\_seminars/pserc\\_seminars\\_2003/gorur\\_pserc\\_seminar\\_june2003.pdf](https://pserc.wisc.edu/documents/general_information/presentations/pserc_seminars/pserc_seminars_2003/gorur_pserc_seminar_june2003.pdf)>. Acesso em: 01 março 2020. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 40.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM., J. T. Outdoor insulators. *Phoenix, Arizona: Ravi S. Gorur, Inc.*, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 31.

GOVINDARAJU, P.; SARANYA, K.; MUNIRAJ, C. Condition monitoring of transmission line insulators using pmu for smart grid environment. In: *2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 23.

GUEDES, C. P. G. *Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Julho 2015. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 31.

GUPTA, A.; BAIS, A. S. *Composite Insulators Market Size*. 2018. Disponível em: <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/composite-insulators-market>>. Acesso em: 01 março 2020. Citado na página 27.

HALL, J. F. History and bibliography of polymeric insulators for outdoor applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 8, n. 1, p. 376–385, Jan 1993. ISSN 1937-4208. Citado na página 27.

HE, J.; GORUR, R. S. Electric field calculations on outdoor insulators including the effect of arc jumping. *The 20th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH*, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 71, 72, 78 e 99.

IEC TS 60815. *Guide for the Selection of Insulators in Respesct of Polluted Conditions*. Genebra, Suíça, 2008. Citado na página 32.

IEC TS 62073. *Guidance on the measurement of hydrophobicity of insulator surfaces*. Genebra, Suíça, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

IEEE. Ieee guide for maintenance methods on energized power lines. *Std 516-1995*, p. 1–72, 1995. Citado na página 84.

ILHAN, S. et al. Numerical and experimental investigation of the effects of pollution on glass suspension-type insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 22, n. 5, p. 2987–2994, October 2015. ISSN 1070-9878. Citado 5 vezes nas páginas 70, 72, 78, 94 e 107.

KARADY, G. G.; SHAH, M.; BROWN, R. L. Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-i. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1965–1971, Oct 1995. ISSN 1937-4208. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

KLOES, H. J.; KOENIG, D. Multifactor-surface-tests of organic insulating materials in the early stage of degradation. In: *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 1, p. 296–299 vol.1. ISSN 1089-084X. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

KONE, G.; VOLAT, C.; EZZAIDI, H. Numerical investigation of electric field distortion induced by internal defects in composite insulators. *IET – The Institution of Engineering and Technology*, v. 2, p. 253–260, 2017. Citado na página 90.

LAPP. *High-Voltage Insulators*. 2004. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/1IMz5SWDR543bnKtUeBydG1eX8wz7j0aB/view?usp=sharing>>. Acesso em: 07 janeiro 2020. Citado na página 29.

LEE, J.-K. et al. Development of a live-line insulator inspection tool system for 154 kv power transmission lines. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, v. 7, 01 2012. Citado 3 vezes nas páginas 23, 67 e 72.

MACEY, R.; VOSLOO, W.; TOURREIL, C. de. *The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators*. Crown Publications, 2004. ISBN 9780620310741. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=pwNKOAAACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

MAVRIKAKIS, N. et al. Hydrophobicity transfer mechanism evaluation of field aged composite insulators. In: *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 215–219. ISSN 2155-5532. Citado na página 39.

MAVRIKAKIS, N.; SIDERAKIS, K.; MIKROPOULOS, P. N. Laboratory investigation on hydrophobicity and tracking performance of field aged composite insulators. In: *2014 49th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. Citado na página 38.

MENDONÇA, P. L. et al. Monitoramento de isoladores poliméricos em linhas de transmissão através de sensor de corrente de fugas. *XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica.*, São Paulo, Brasil, 2010. Citado na página 23.

MENDONÇA, Y. A. de. *Análise da Corrente de Fuga de Isoladores Poliméricos para Classificação das Condições de Degradação com Auxílio de Lógica Fuzzy*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Citado na página 30.

MÜLLER, B. *Untersuchungen zum Oberflächenverhalten von stabförmigen Isolatoren aus Epoxidhan-Formstoff bei simultaner Beanspruchung durch Feuchte und hohe*

- Wechselspannung*. Dissertação de Mestrado — Technische Universität Darmstadt, 1985. Citado na página 45.
- NIGRIS, M. et al. Diagnostic methods of non-ceramic insulators for hv lines. *Session 2000 CIGRÉ*, v. 22-207, 2000. Citado na página 84.
- PAPAILIOU, K. O.; SCHMUCK, F. *Silicone Composite Insulators: Materials, Design, Applications*. 1. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. (Power Systems). ISBN 978-3-642-15319-8,978-3-642-15320-4. Disponível em: <<http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=afa0aea6fe4f67c5decef160d206d9ca>>. Citado na página 79.
- PARK, J. et al. An inspection robot for live-line suspension insulator strings in 345-kv power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, n. 2, p. 632–639, April 2012. ISSN 1937-4208. Citado 3 vezes nas páginas 23, 68 e 72.
- QUEIRÓZ, J. P. M. *Análise Comparativa do Comportamento Dielétrico dos Isoladores Poliméricos com Isoladores em Materiais Convencionais*. Dissertação de Mestrado — FEUP, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Julho 2013. Citado 3 vezes nas páginas 27, 32 e 44.
- 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 57.
- REIS, D. F.; LOPES, I. J. da S.; SILVA, E. J. Effects of contamination in the electric field distribution on polymer insulators: An experimental and computational investigation. *The 20th International Symposium on High Voltage Engineering, ISH*, 2017. Citado na página 40.
- REN, X. et al. Effect of inverted t arrangement on ac pollution flashover characteristics of insulator strings. *High Voltage*, 01 2019. Citado na página 76.
- RIBEIRO, G. L. *Aprimoramento da classificação de isoladores poliméricos por medições termográficas e radiação UV usando processamento de imagens e RNA*. Dissertação de Mestrado, 2017. Citado na página 23.
- ROCHA, P. H. V. da. *Estimação da Poluição de Isoladores em Linhas de Transmissão a Partir da Irradiação de RF*. Tese de Doutorado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 23.
- RUMELI, A.; HIZAL, M.; DEMIR, Y. Analytical estimation of flashover performances of polluted insulators. *MADRAS.*, v. 1.02, p. 01–06, 1981. Citado na página 56.
- SADIKU, M. N. O. *Elements of Electromagnetics*. 7. ed. [S.l.]: Oxford University Press, 2018. ISBN 9780190698614. Citado 2 vezes nas páginas 49 e 60.
- S&C. *2020 State of Commercial & Industrial Power Reliability Report*. 2020. Disponível em: <[https://www.sandc.com/globalassets/sac-electric/documents/sharepoint/documents---all-documents/technical-paper-100-t125.pdf?dt=637485223714720305&utm\\_source=web&utm\\_medium=digital&utm\\_campaign=Reliability&utm\\_content=2020report](https://www.sandc.com/globalassets/sac-electric/documents/sharepoint/documents---all-documents/technical-paper-100-t125.pdf?dt=637485223714720305&utm_source=web&utm_medium=digital&utm_campaign=Reliability&utm_content=2020report)>. Acesso em: 16 maio 2021. Citado na página 20.

- SCHMUCK, F. et al. Assessment of the condition of overhead line composite insulators. *Cigré Session Papers and Proceedings*, 2012. Citado na página 28.
- SCHWAIGER, A. *Elektrische Festigkeitslehre*. [S.l.]: Springer-Verlag, 1925. Citado 3 vezes nas páginas 51, 53 e 54.
- SHAH, M.; KARADY, G. G.; BROWN, R. L. Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-i. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1972–1978, Oct 1995. ISSN 1937-4208. Citado na página 40.
- SHAH, M.; KARADY, G. G.; BROWN, R. L. Flashover mechanism of silicone rubber insulators used for outdoor insulation-ii. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 10, n. 4, p. 1972–1978, Oct 1995. ISSN 1937-4208. Citado na página 40.
- SINAPSIS. *Avaliação dos Custos Relacionados às Interrupções de Energia Elétrica e suas Implicações na Regulação. Relatórios 1,2,3a,3b e 5*. 2016. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/36144/472644/Produto+1.pdf>>. Acesso em: 07 janeiro 2020. Citado na página 19.
- SOUZA, B. A. de. *Monitoramento e Diagnóstico de Isoladores Poliméricos Utilizando Processamento Digital de Imagens Termográficas*. Dissertação de Mestrado — UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, 2016. Citado na página 23.
- SPANGLER, C. H. *Prong Type Holder For Safety Testing Devices, Patente norte americana No. 1,896,598, 7 de Fevereiro de*. 1933. Citado 3 vezes nas páginas 67, 68 e 72.
- STRI. *Guide 1, 92/1: Hydrophobicity Classification Guide. Swedish Transmission Research Institute*. 1992. Disponível em: <<https://www.stri.se/>>. Citado na página 37.
- SUNDARARAJAN, R.; GORUR, R. S. Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under dc voltage. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 2, p. 209–218, April 1993. ISSN 0018-9367. Citado na página 83.
- TZIMAS, A.; ROWLAND, S. M. Asymmetrical ageing of composite insulators: effect on water dripping behaviour and electrical performance. In: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. ISSN 1089-084X. Citado na página 37.
- VAILLANCOURT, G. H. et al. New live line tester for porcelain suspension insulators on high-voltage power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 1, p. 208–219, Jan 1994. ISSN 1937-4208. Citado na página 66.
- VOLAT, C. Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer. *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE*, C, p. 409–413, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 59, 69, 70, 72 e 92.
- WAŃKOWICZ, J. Mechanism of sudden flashover on composite insulator surface with non-uniformly distributed wettability and pollution. *Przeglad Elektrotechniczny*, v. 90, p. 240–246, 01 2014. Disponível em: <<http://pe.org.pl/articles/2014/5/53.pdf>>. Acesso em: 30 março 2020. Citado na página 83.

YANG, Z. et al. Hydrophobicity distribution analysis of dc composite insulators. In: *2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 465–468. ISSN 2334-0975. Citado 3 vezes nas páginas 35, 37 e 38.

ZHANG, Z. et al. Effects of ring-shaped non-uniform pollution on outdoor insulation electrical property. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 24, n. 6, p. 3603–3611, 2017. Citado na página 78.

ZHAO, T.; BERNSTORF, R. A. Ageing tests of polymeric housing materials for non-ceramic insulators. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 14, n. 2, p. 26–33, March 1998. ISSN 1558-4402. Citado na página 29.

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 69 e 72.

ZHAO, Z.; XU, G.; QI, Y. Representation of binary feature pooling for detection of insulator strings in infrared images. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 23, n. 5, p. 2858–2866, October 2016. ISSN 1558-4135. Citado na página 54.

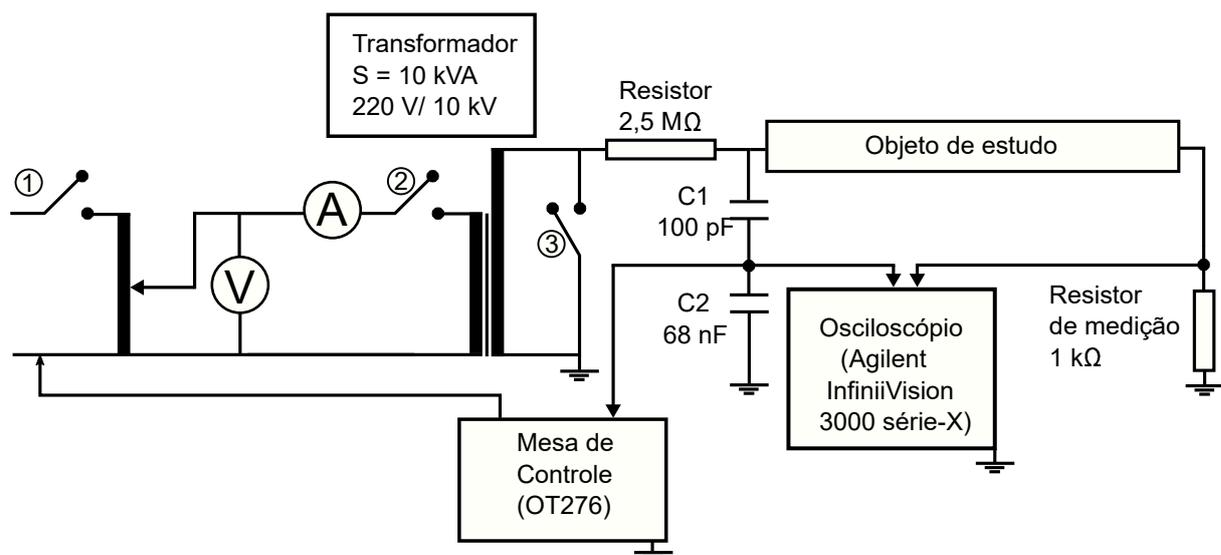
## APÊNDICE A – EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Neste apêndice, são apresentadas as montagens e os resultados de experimentos preliminares referentes a este trabalho. Devido às limitações laboratoriais, os experimentos realizados não modelam em sua totalidade o fenômeno estudado, bem como não podem ser considerados como comprovações científicas da validade do método desenvolvido dado a metodologia adotada. Entretanto, os experimentos servem como indicativo técnico de que o método efetivamente tem êxito na identificação de descargas superficiais em isoladores poliméricos para os casos estudados.

### A.1 MONTAGEM DOS EXPERIMENTOS

A realização dos experimentos ocorreu no laboratório de alta tensão da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), onde se encontra um *kit* de alta tensão da *Haefely*. O *kit* consiste em um transformador elevador de 10 *kVA* de potência com capacidade de elevar a tensão da rede de 220 *V* até 100 *kV*. Além do transformador o *kit* possui uma resistência de 2,5 *MΩ* para limitar a corrente, bem como um divisor capacitivo, em que C1 possui 100 *pF* e C2 68 *nF*, que possibilita as medições de tensão aplicada. Na Figura 53, é possível ver um diagrama referente ao *kit*.

Figura 53 – Diagrama do kit de alta-tensão utilizado nas montagens.

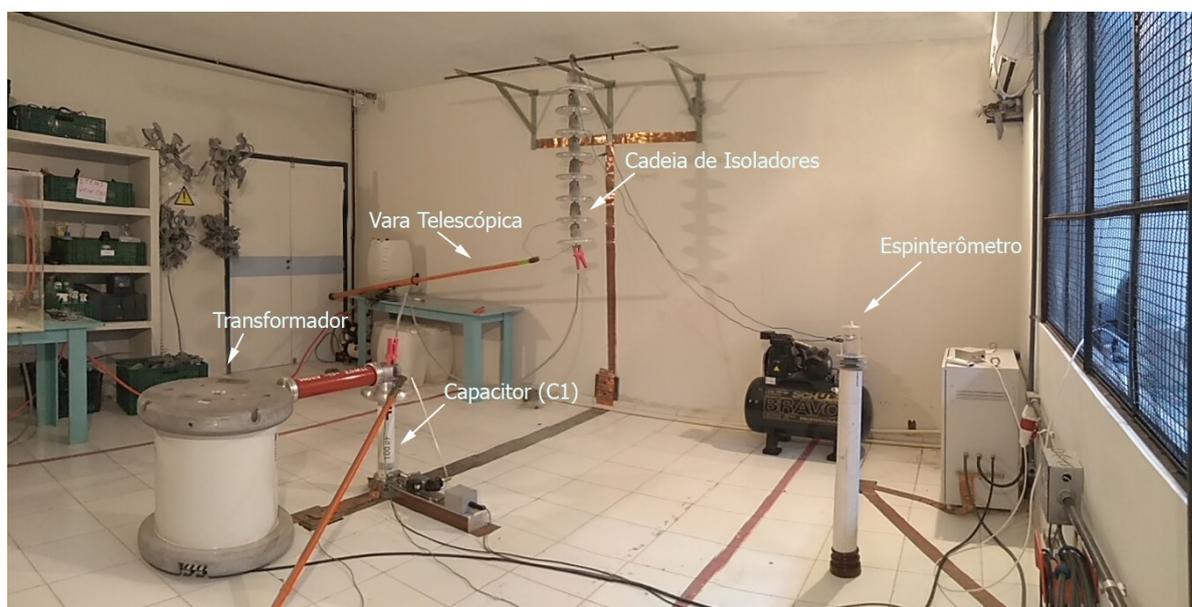


Fonte: O autor (2021).

Na Figura 54, é apresentado o laboratório de alta tensão onde foram realizados os experimentos.

Figura 54 – Laboratório de alta-tensão da UFPE.

(a) Área de ensaio.



(b) Sala de controle.



Fonte: Ferreira (2019).

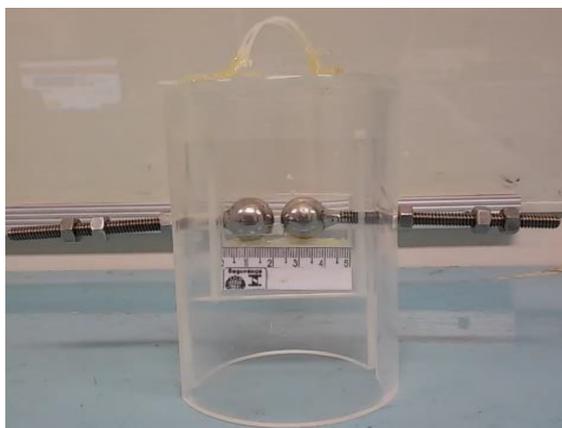
Nota-se que o laboratório é dividido em duas partes: a área de ensaio, apresentado na Figura 54a, é o local em que o objeto de estudo é submetido às condições pertinentes, essa área não pode estar ocupada durante a realização dos ensaios por questões de segurança. Enquanto a sala de controle, apresentada na

Figura 54b, consiste no local onde ficam os responsáveis por realizar o experimento. Nessa sala o controle é realizado através da unidade de controle de alta tensão, em que é possível ligar/desligar o *kit* bem como controlar o nível da tensão aplicada.

As principais ferragens metálicas para este trabalho foram o espinterômetro e as abraçadeiras de metal. No momento em que a tensão atinge um valor específico ocorre a ruptura do ar entre as duas esféricas, provocando assim um centelhamento que indica que o nível de tensão elétrica foi atingido. Além do espinterômetro, foram utilizadas abraçadeiras de metal. Esses elementos metálicos servem para criar uma interface metálica para medição do potencial elétrico em uma determinada região do isolador polimérico. Diferentemente dos isoladores de vidro, que possuem ferragens metálicas nas quais é possível fazer a conexão e, conseqüentemente, medição do potencial nessas regiões metálicas, os isoladores poliméricos não possuem essa interface. Sendo assim são inseridas abraçadeiras metálicas nas regiões em que se quer medir o potencial elétrico. Na Figura 55 é apresentado o espinterômetro e as abraçadeiras de metal utilizadas nos experimentos realizados.

Figura 55 – Ferragens metálicas utilizadas nos experimentos.

(a) Espinterômetro.



(b) Abraçadeiras de metal.



Fonte: O autor (2021).

Com o objetivo de representar a poluição e umidade foi necessário aplicar uma camada condutiva sobre a superfície do isolador, de forma a levar o isolador a operar no regime resistivo e testar o método. Esta camada é composta de Kaolin, uma argila de baixa condutividade elétrica, água destilada e cloreto do sódio.

Foram adicionados cinco gramas de cloreto de sódio em um litro de água destilada, misturadas e a condutividade desta solução foi medida com um

condutímetro. A solução apresentou uma condutividade de  $4,105 \text{ mS/cm}$  a  $25^\circ\text{C}$ , ou seja,  $4105 \text{ }\mu\text{S/cm}$ .

Para finalizar a camada é necessário a adição de Kaolin à solução citada. O objetivo é fazer com que a solução seja depositada na superfície do isolador, semelhante a uma pasta de Kaolin e não de forma líquida, de maneira que a mesma fique fixa ao isolador durante todo o experimento. Após sucessivas tentativas, foi percebido que uma boa proporção para formação da pasta é de  $1\text{g/ml}$ , ou seja, um grama de Kaolin a cada mililitro da solução. O processo foi realizado da seguinte forma:

Na Figura 56 é apresentado o isolador após o processo de aplicação da camada condutiva sobre sua superfície, instalado para realização do experimento, cerca de 50% da superfície do isolador foi submetida a camada condutiva.

Figura 56 – Isolador coberto com a camada condutiva.



Fonte: O autor (2021).

### A.1.1 Levantamento das Curvas de Distribuição de Potencial

Foram obtidas as curvas de potencial para o caso do isolador estudado de maneira limpa e com a superfície coberta pela camada condutiva. As medições foram feitas através do espinterômetro, medindo a tensão disruptiva do mesmo no início de uma sessão de medições.

A distribuição de potencial é obtida ao se variar a posição do espinterômetro ao longo do isolador e registrar a tensão aplicada que leva à ruptura do dispositivo. É medida a tensão elétrica em dois pontos, cada um conectado a um dos terminais do espinterômetro, e no momento que ocorre a ruptura é registrado o valor aplicado no terminal fase do isolador que levou a ocorrência da mesma. Para determinação da porcentagem de tensão em cada região de medição, para isoladores poliméricos uma região de medição será considerada um grupo de uma ou mais aletas, são necessários alguns ajustes.

Segundo Ferreira (2019), considerando  $N$  o número de regiões de medição,  $Y$  a região em questão,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$  os valores percentuais nas regiões  $1, 2, 3, \dots, N$  (contando-se do lado fase para o lado terra) e  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_N$  as tensões aplicadas ao isolador, para que a diferença de potencial em cada isolador ultrapasse a rigidez dielétrica do ar entre as esferas do espinterômetro e  $V$  a tensão disruptiva do espinterômetro, tem-se:

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N = 1 \quad (\text{A.1})$$

e

$$x_y = \frac{V}{V_Y} \quad (\text{A.2})$$

então, é possível dizer que:

$$x_y = \frac{\frac{V}{V_Y}}{1} \quad (\text{A.3})$$

sendo igual a:

$$x_y = \frac{\frac{V}{V_Y}}{\sum_{i=1}^N x_i} \quad (\text{A.4})$$

logo:

$$x_y = \frac{\frac{V}{V_Y}}{\sum_{i=1}^N \frac{V}{V_i}} = \frac{\frac{1}{V_Y}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{V_i}} \quad (\text{A.5})$$

Assim,

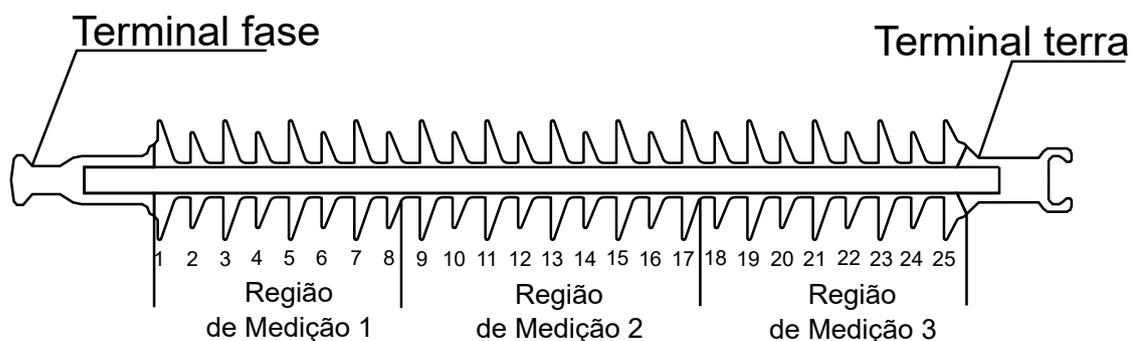
$$x_y = \frac{\frac{1}{V_Y}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{V_i}} \cdot 100 \quad (\text{A.6})$$

No caso do isolador limpo foram definidas três regiões de medição: uma com oito aletas, sendo da fase até a aleta 8, outro grupo com nove aletas, sendo da aleta 9 até a aleta 17 e um ultimo com oito aletas sendo da aleta 18 até o terra. Na Figura 57 são ilustradas as regiões de medição para o caso limpo.

A definição das regiões de medição para o caso limpo foi feita dessa forma devido à alta concentração de potencial que ocorre do lado fase. Essa concentração facilita a disrupção do espinterômetro na região de medição 1, porém dificulta nas outras regiões, obrigando o uso de tensões mais elevadas no *kit* de alta tensão. Caso fossem escolhidas regiões de medição com menores distâncias entre os terminais, as

distribuição de potencial seria mais exata, entretanto é provável que o *kit* não fosse capaz de fornecer a tensão suficiente para a atuação do espinterômetro, inviabilizando o experimento.

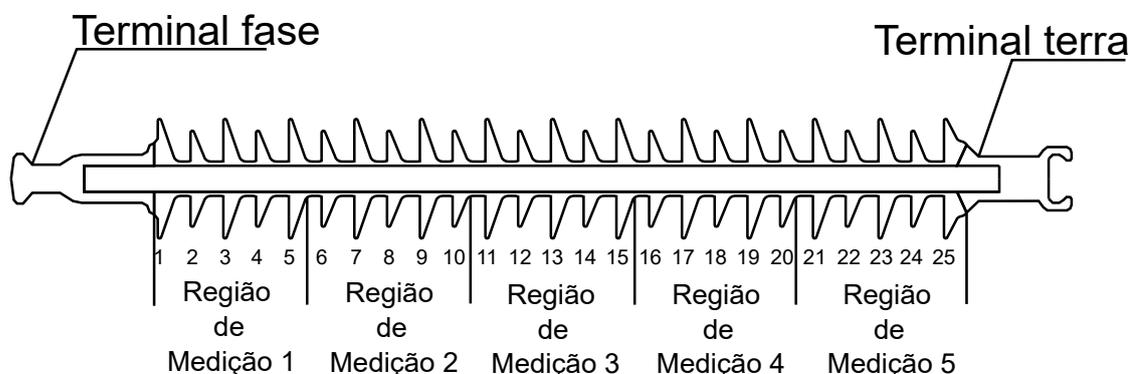
Figura 57 – Regiões de medição para o caso do isolador limpo.



Fonte: O autor (2021).

Na Figura 58 são ilustradas as regiões de medição para o caso com a camada condutiva.

Figura 58 – Regiões de medição para o caso do isolador com camada condutiva.



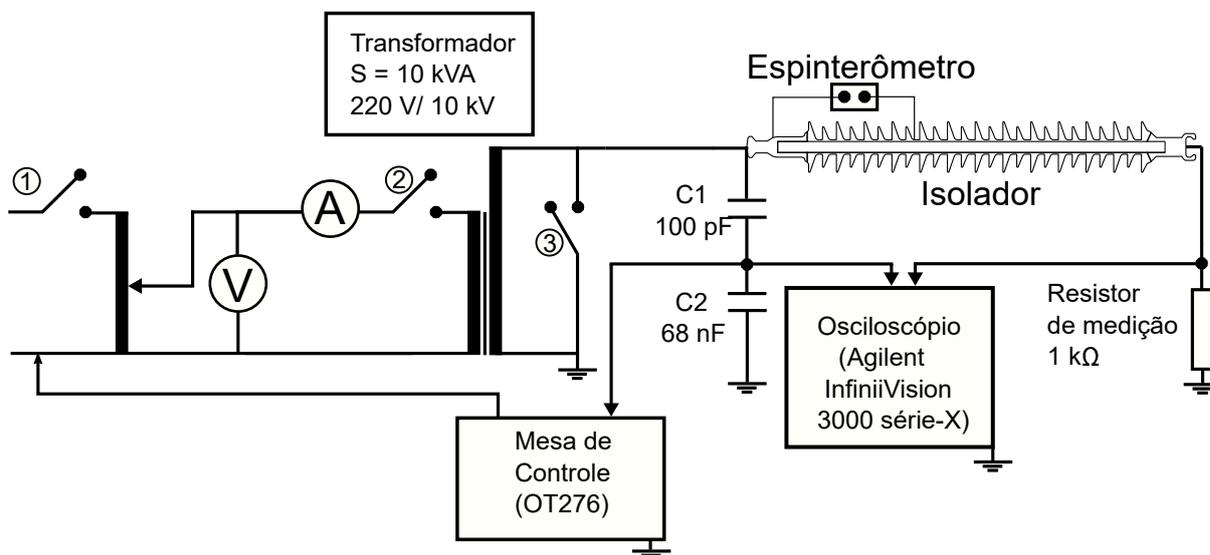
Fonte: O autor (2021).

Para o isolador com a presença da camada condutiva foram definidas cinco regiões de medição: todas as regiões possuem cinco aletas, a primeira do terminal fase a aleta 5, a segunda da aleta 6 até a aleta 10, a terceira da aleta 11 até a aleta 15, a quarta da aleta 16 até a aleta 20 e a ultima da aleta 21 até o terminal de terra.

Espera-se que a camada condutiva provoque a uniformização da tensão ao longo do isolador, sendo assim é possível definir as regiões de medição com a mesma quantidade de aletas e esperar que o espinterômetro rompa para o mesmo nível de tensão em todos os casos. Por isso o espaçamento de 5 aletas para cada região de medição foi adotado.

Na Figura 59 é apresentado o diagrama do sistema montado para o levantamento da curva de distribuição de potencial em ambos os casos.

Figura 59 – Diagrama da montagem para obtenção da curva de distribuição de potencial.



Fonte: O autor (2021).

O experimento é feito com o *kit* de alta tensão em que, inicialmente, conforme apresentado na Figura 59, as chaves 1 e 2 são fechadas e a chave 3 é aberta. Através da mesa de controle OT 276 a tensão é aumentada gradativamente até o momento de disrupção do espinterômetro.

O divisor capacitivo composto por C1 e C2 provê a medição da tensão aplicada ao osciloscópio e ao controlador OT 276. O resistor de medição tem a função de apresentar a forma de onda da corrente de fuga, sendo necessário para apresentar uma confirmação do comportamento resistivo do sistema. O valor desse resistor é de  $1\text{ k}\Omega$ .

Foram executadas dez medições para cada região de medição em cada um dos casos, com e sem a presença da camada condutiva. Ao final foram realizadas uma média entre os valores. No caso em que existe a camada condutiva era necessário umedecer a camada ao final de cerca de cinco medições, visto que a corrente de fuga secava a camada e fazia com que a mesma aumentasse sua resistência levando o isolador a operar na região capacitiva. O processo de umedecimento era feito com água destilada para reduzir a influência na condutividade da camada e garantir a operação na região resistiva.

Normalmente é utilizado um resistor para limitar a corrente do experimento e garantir uma maior proteção do *kit*, porém nos experimentos aqui realizados esse resistor não foi utilizado. Essa decisão foi tomada pois o menor resistor presente no laboratório possui uma resistência de  $2,5 M\Omega$ . Para o caso em que existe uma camada condutiva na superfície do isolador, essa resistência seria muito maior do que àquela encontrada no isolador com a camada que, de acordo com as simulações, seria da ordem de  $10^5\Omega$  ou  $0,1M\Omega$ . Sendo assim a tensão estaria predominantemente concentrada no resistor, impossibilitando a obtenção da curva de distribuição de potência no caso com a presença da camada condutiva.

### **A.1.2 Teste do Método Desenvolvido**

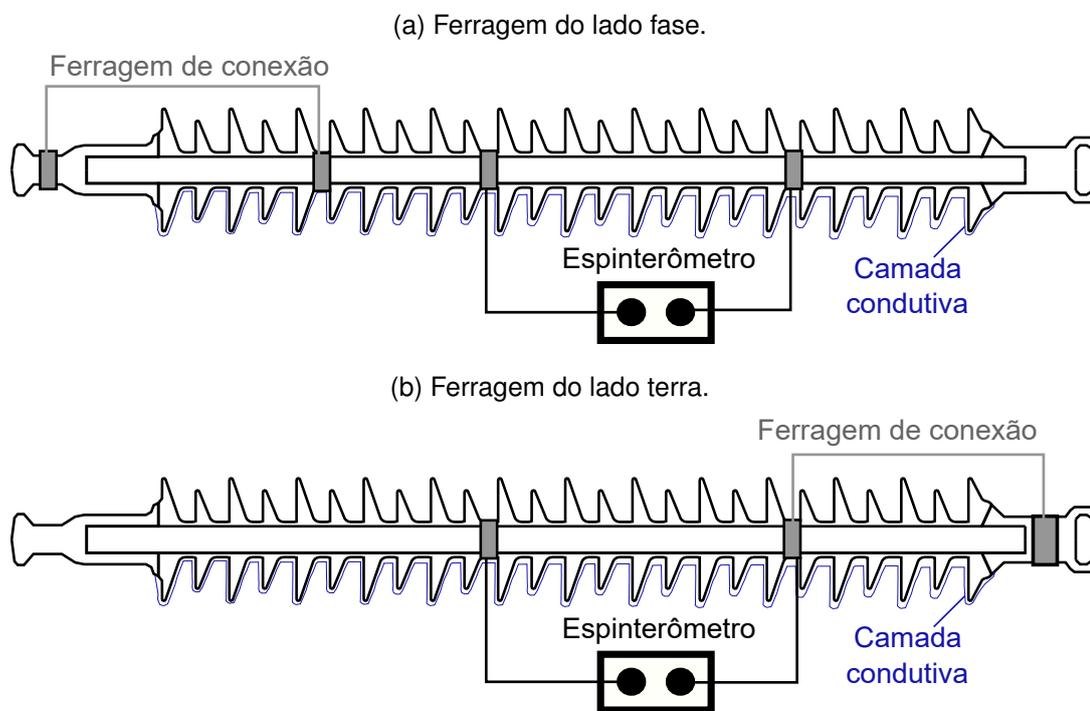
Os testes experimentais do método desenvolvido foram realizados de duas formas diferentes. Primeiramente, o método foi testado com o isolador possuindo uma camada condutiva que ia do terminal fase até o terminal terra, cobrindo 50% da superfície do isolador. Neste teste o arco se apresenta na forma de uma ferragem de metal que conecta dois terminais contornando 25% do isolador, sendo assim um curto-circuito.

Nessa classe de experimentos foram realizados dez medições nas quais a ferragem se encontra contornando 25% do isolador no lado fase, bem como mais dez medições nas quais a ferragem se encontra contornando 25% do isolador no lado terra, conforme apresentado no esquema da Figura 60.

Esse procedimento experimental possui algumas limitações. Ao aumentar a tensão aplicada ao isolador, a elevação da corrente de fuga levava a evaporação da umidade secando-a. Isso provocava o surgimento de bandas secas na própria camada, implicando em arcos e sua deterioração. Por esse motivo, neste experimento, não foi possível aplicar toda a tensão de nominal na qual o isolador estaria submetido em condições de operação.

Objetivando a viabilização desse experimento, foi aplicada uma tensão bem abaixo da tensão nominal. De acordo com testes realizados, as descargas começavam a surgir ao aplicar uma tensão de  $10 kV$ . Sendo assim, os pontos determinados pelo método foram definidos para a aplicação de uma tensão de  $8 kV$ . Em outras palavras, ao ser aplicada uma tensão de  $8 kV$  ao isolador o espinterômetro deveria atuar. Portanto o teste começa sem aplicação de tensão na camada e vai aumentando este valor até o momento da ruptura do espinterômetro.

Figura 60 – Ilustração das conexões para o teste do método com arco via conexão metálica.



Fonte: O autor (2021).

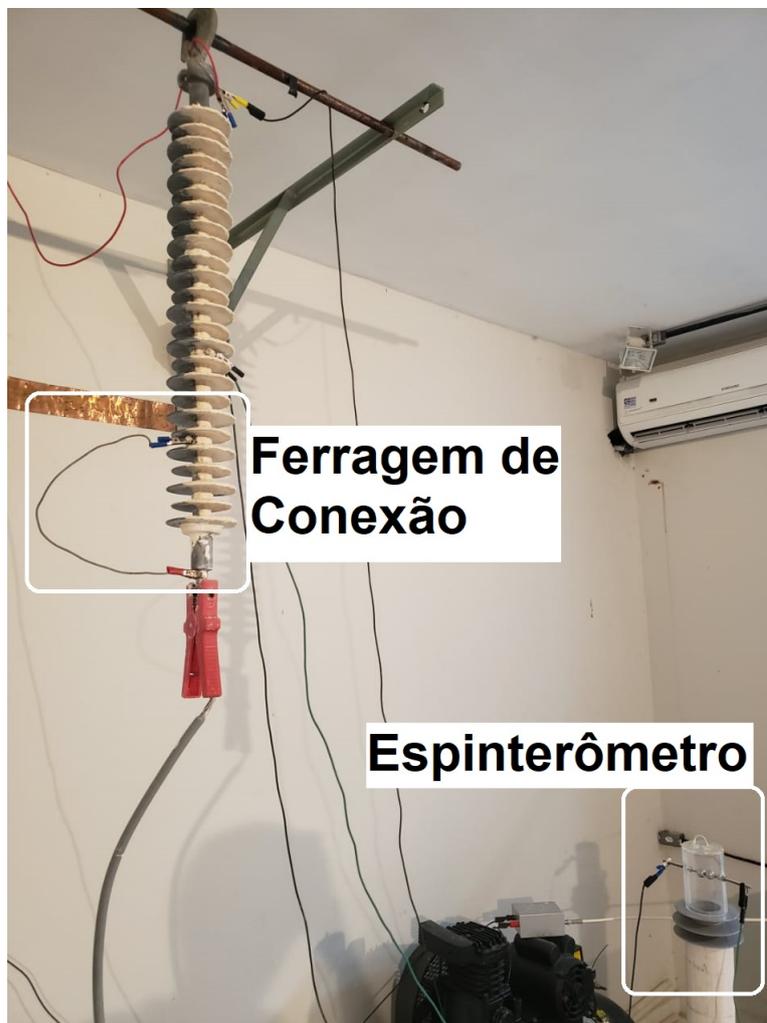
Caso a tensão aplicada fosse de  $56,34 \text{ kV}$  de pico, com uma tensão de monitoramento de  $7 \text{ kV}$ , os pontos  $P_1$  e  $P_2$  estariam em conformidade com os definidos na Seção 5.2.3.1 e utilizados nas simulações. Entretanto, devido à mudança da tensão aplicada, foi necessário a redefinição desses pontos. Isso é possível ao utilizar as Equações 4.4 e 4.5 apresentadas no método. Para uma tensão aplicada de  $8 \text{ kV}$  e uma tensão monitorada de  $3,78 \text{ kV}$ , os novos pontos são  $P_1 = 1437,66 \text{ mm}$  e  $P_2 = 762,96 \text{ mm}$ , estes pontos estão localizados entre as aletas 20 e 21, e entre as aletas 10 e 11, respectivamente. Isso explica o local de instalação das ferragens do espinterômetro, apresentadas na Figura 60. A montagem laboratorial é apresentada na Figura 61, na qual é possível observar a presença do espinterômetro, o isolador com 50% da superfície coberta e a ferragem de conexão.

A segunda forma de teste da aplicação do método visa uma maior proximidade com as condições de operação do objeto de estudo. Para isso foi retirado a camada condutiva no trecho que será contornado pelo arco, em um primeiro momento apenas do lado fase e em seguida apenas do lado terra.

Dessa vez o arco será representado por um centelhador metálico, o qual está

calibrado para que haja interrupção na tensão nominal do isolador.

Figura 61 – Montagem para o teste do método com arco via conexão metálica.



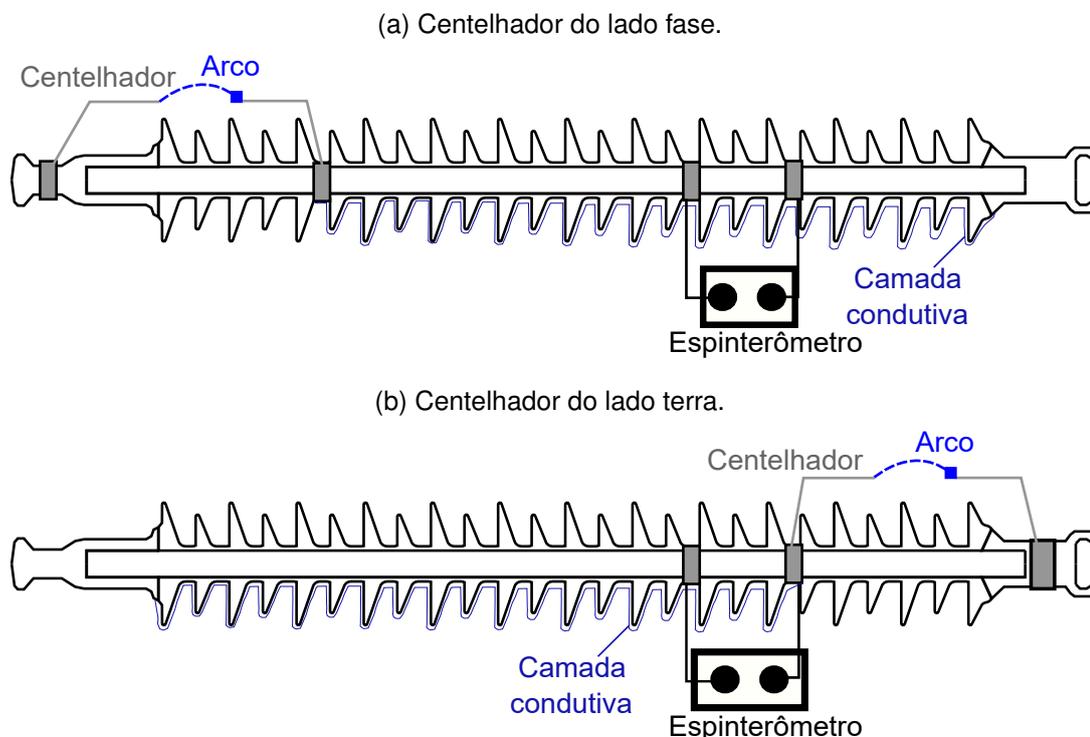
Fonte: O autor (2021).

A retirada de parte da camada condutiva aumenta a impedância total do sistema, pois seria o equivalente à região sem a camada estar operando no regime capacitivo com alta impedância e sem a existência de uma resistência paralela que leva ao aumento da corrente de fuga, conseqüentemente, sem a evaporação da umidade da camada, formação de bandas secas e arcos na mesma. Essa configuração permite que a tensão seja elevada sem que as propriedades da camada se deterioresem até o momento do arco.

O esquema apresentado na Figura 62 ilustra como o experimento é montado. Para este caso a tensão aplicada será de  $56,34 \text{ kV}$ , a tensão monitorada de  $7 \text{ kV}$  e os pontos  $P_1$  e  $P_2$  iguais aos utilizados nas simulações apresentadas na Seção 5.2.3.1. Em termos de montagem o ponto  $P_1$  fica entre as aletas 20 e 21, enquanto o ponto  $P_2$

se encontra entre as aletas 16 e 17.

Figura 62 – Ilustração das conexões para o teste do método com arco via centelhador.



Fonte: O autor (2021).

Para cada um dos casos apresentados na Figura 62 foram realizadas dez medições, nas quais, entre 2 ou 3 medições, a camada era novamente umedecida, garantindo a operação do sistema em regime resistivo.

Foram executadas dez medições, referentes as posições do espinterômetro apresentadas na Figura 62, porém com o isolador totalmente limpo. Esses experimentos tem a finalidade de verificar que o fato da presença do arco, isoladamente, não é condição suficiente para gerar a diferença de potencial monitorada entre  $P_1$  e  $P_2$ , sendo assim necessário a presença da camada condutiva.

Na Figura 63 é apresentada a montagem referente aos experimentos que utilizam o centelhador como arco para o teste do método. Nela é possível perceber a presença do centelhador utilizado, do espinterômetro e do isolador com a porção de 25% de sua superfície, no lado fase, sem a camada condutiva.

## A.2 RESULTADOS

Os resultados experimentais podem ser divididos em duas categorias: verificação do comportamento da distribuição de potencial na presença da camada

condutiva, e resultados dos testes do método com arco composto por uma conexão metálica e teste do método com arco ocasionado por um centelhador.

Figura 63 – Montagem para o teste do método com arco via ferragem metálica.



Fonte: O autor (2021).

### A.2.1 Verificação do Comportamento da Distribuição de Potencial

Inicialmente foram obtidas as curvas de distribuição de potencial para o caso sem e com a presença da camada condutiva. Esse experimento tem como objetivo assegurar o comportamento linear da distribuição de potencial, assim atendendo uma das aproximações do método. Na Tabela 10 são mostrados os resultados medidos utilizando do espinterômetro em conformidade com o exposto na seção 7.3.2 para o caso do isolador sem a presença da camada condutiva. As regiões de medição estão ilustradas na Figura 57.

O espinterômetro foi calibrado com cerca de  $5 \text{ kV}$ . É possível verificar que a região de medição 01 foi aquela na qual houve a interrupção do espinterômetro com

maior facilidade, enquanto a região de medição 02, apesar do número maior de aletas, foi a que precisou de um nível maior de tensão para que ocorresse a interrupção. Os resultados obtidos informam, conforme esperado, que, para o isolador sem poluição, existe uma concentração de potencial na extremidade do lado fase. Neste cenário o isolador se encontra na região de operação capacitiva.

Tabela 10 – Tensão de interrupção do espinterômetro medida no experimento em que o isolador não possui camada condutiva.

Medição	Espinterômetro [kV]	Região de Medição 01 [kV]	Região de Medição 02 [kV]	Região de Medição 03 [kV]
1	5,0	8,5	81,7	40,6
2	5,1	8,2	82,2	41,1
3	5,0	8,6	82,1	39,4
4	5,0	8,7	82,1	40,7
5	5,1	8,6	81,7	40,6
6	5,0	7,9	82,4	40,5
7	5,2	9,0	82,3	41,1
8	5,1	8,6	81,8	40,0
9	5,0	8,5	82,3	40,5
10	5,2	8,6	82,0	40,5
Média	5,07	8,58	82,09	40,55

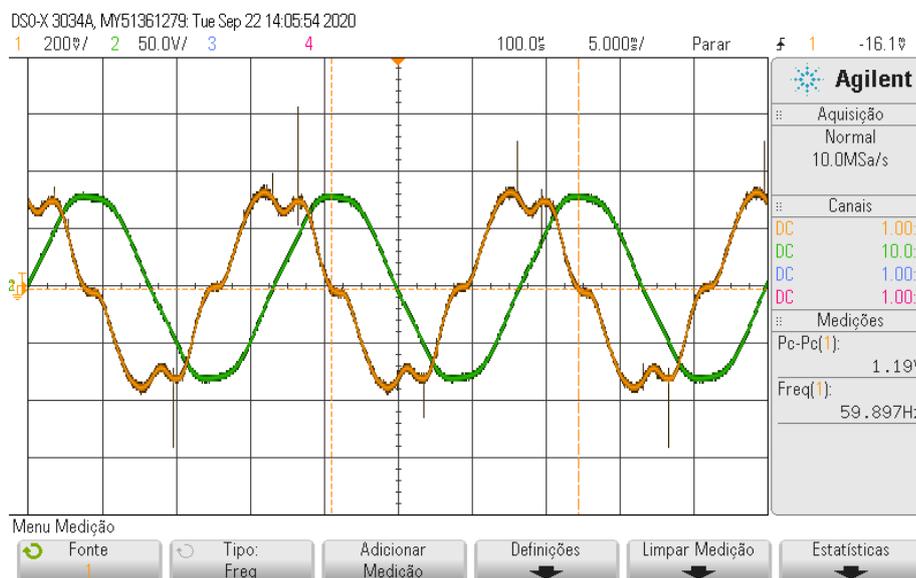
Fonte: O autor (2021).

Outra forma de verificar a operação do isolador na região capacitiva é verificando o defasamento entre a corrente de fuga e a tensão aplicada, conforme pode ser verificado na Figura 64.

Analisando as formas de onda apresentadas na Figura 64, é possível notar que elas estão defasadas entre si, de forma que a corrente está adiantada da tensão caracterizando o comportamento em operação capacitiva.

Nos experimentos com a presença da camada condutiva o espinterômetro foi ajustado para uma tensão de cerca de 3,78 *kV*. O motivo desse ajuste é o comportamento da camada condutiva que, quando submetida a tensões mais elevadas, formam bandas secas e arcos superficiais. Com o objetivo de evitar esses fenômenos, a tensão de interrupção foi ajustada, de modo a facilitar sua interrupção para tensões mais baixas. Esse ajuste não influencia na medição da distribuição de potencial do isolador.

Figura 64 – Formas de onda de corrente de fuga (onda 1) e tensão aplicada (onda 2) para o caso no qual o isolador não possui camada condutiva.



Fonte: O autor (2021).

Na Tabela 11 são apresentados os valores de tensão aplicada nos quais ocorreu a disrupção para o conjunto de medições na presença da camada condutiva.

Tabela 11 – Tensão de disrupção do espinterômetro medida no experimento em que o isolador possui camada condutiva.

Medição	Espinterômetro [kV]	Região de Medição 01[kV]	Região de Medição 02[kV]	Região de Medição 03[kV]	Região de Medição 04[kV]	Região de Medição 05[kV]
1	3,6	13,1	13,3	12,9	13,1	14,3
2	3,7	14,0	15,0	13,2	13,5	14,2
3	3,8	13,4	15,9	13,6	13,1	14,4
4	3,7	13,1	15,6	13,9	11,9	15,1
5	3,7	13,4	15,1	11,9	13,9	16,1
6	3,8	14,4	15,1	12,3	12,5	15,1
7	3,8	13,9	15,7	12,5	12,7	14,8
8	3,8	14,4	14,9	12,8	12,4	14,8
9	3,7	15,1	15,1	12,3	13,3	14,4
10	3,8	15,2	16,3	13,3	12,3	14,4
Média	3,78	13,96	15,12	12,84	12,9	14,6

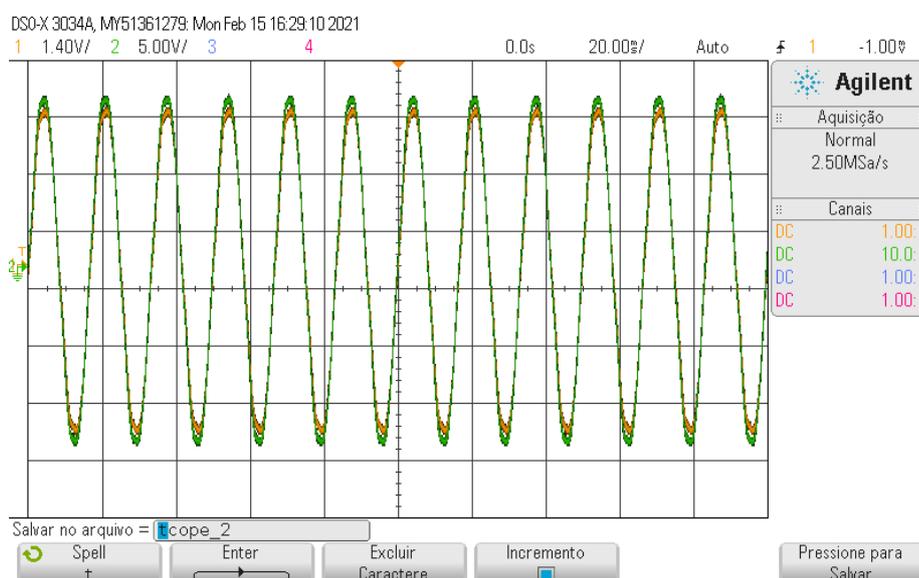
Fonte: O autor (2021).

Ao analisar a Tabela 11 se percebe que a tensão é mais distribuída do que no caso apresentado pela Tabela 10. Essa é uma característica de uma operação no

regime resistivo, conforme esperado. Nota-se uma concentração um pouco maior na região de medição 02, bem como nas regiões de medição 03 e 04 são encontrados valores menores de concentração de tensão elétrica.

É possível observar o comportamento resistivo através do defasamento da corrente de fuga e da tensão aplicada ao isolador, semelhante apresentado na Figura 64 para o caso capacitivo. Na Figura 65 são apresentadas as formas de onda da corrente de fuga e da tensão aplicada no cenário em que existe a presença de uma camada condutiva.

Figura 65 – Formas de onda de corrente de fuga (onda 1) e tensão aplicada (onda 2) para o caso no qual o isolador possui camada condutiva.



Fonte: O autor (2021).

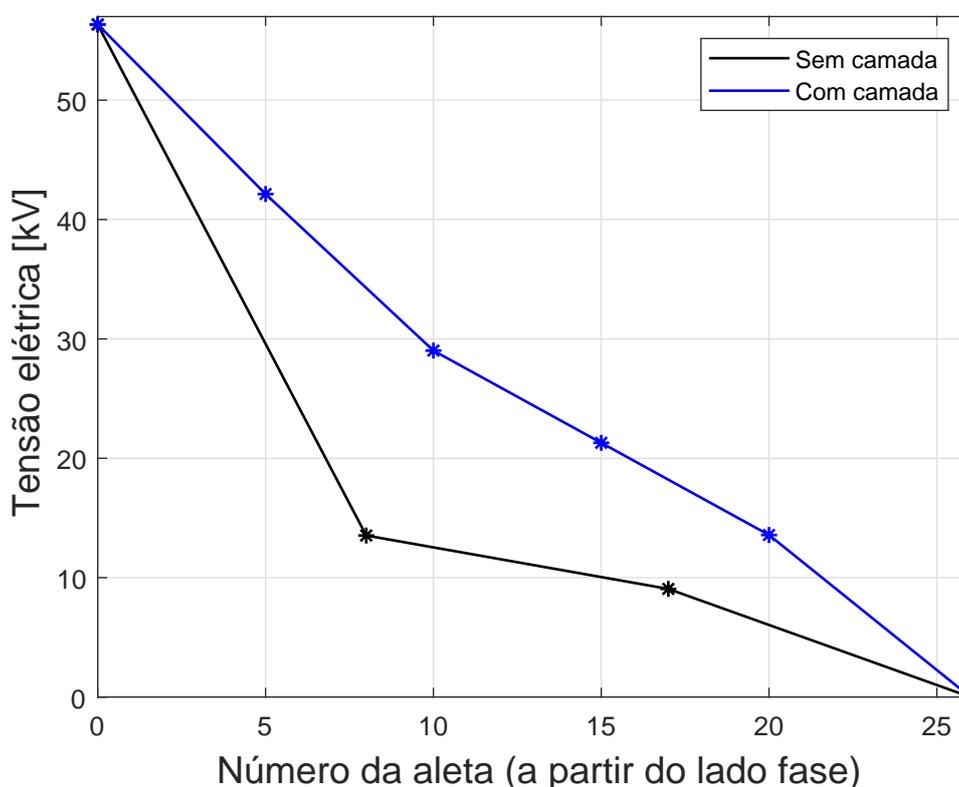
Observando a Figura 65 é possível notar que as curvas da corrente de fuga e da tensão aplicada estão em fase. Esse comportamento indica que o sistema está operando no regime resistivo, no qual a resistência da camada é tão menor que a impedância do isolador que a corrente de fuga está, predominantemente, na camada. Resultado esse que corrobora com a distribuição de potencial encontrada através das medições utilizando o espinterômetro.

Através das medições obtidas, e apresentadas nas Tabelas 10 e 11, é possível construir a curva de distribuição de potencial para cada um dos casos observados. Na Figura 66 são exibidas as duas curvas de distribuição de potencial, para o caso sem a camada e para o caso com a camada. É possível notar um comportamento quase linear no caso com a presença da camada condutiva. A curva de distribuição do caso

sem a camada apresenta uma concentração de cerca de 76% da região de medição 01 do respectivo caso, enquanto 24% da tensão no resto do isolador.

As curvas de distribuição obtidas indicam sim que, de fato, ocorre a migração para a região resistiva na forma como o experimento está sendo conduzido, resultando assim em uma distribuição de potencial linear.

Figura 66 – Distribuições de potencial obtida nos experimentos.



Fonte: O autor (2021).

## A.2.2 Testes Experimentais do Método

Inicialmente foram realizados os experimentos em conformidade com a Figura 60, na qual o isolador está coberto com uma camada que ocupa 50% da superfície do isolador e o arco é representado por uma conexão metálica. O espinterômetro foi ajustado para uma disrupção em cerca de  $3,78 \text{ kV}$  e dez medições foram realizadas para cada um dos casos, com a conexão metálica do lado fase e com a conexão metálica do lado terra. Na Tabela 12 são apresentadas as medições de ajuste do espinterômetro e de cada um dos testes citados.

Tabela 12 – Testes com toda camada presente e arco como conexão metálica.

Medição	Espinterômetro [kV]	Conexão Metálica no Lado Fase [kV]	Conexão Metálica no Lado Terra [kV]
1	3,9	7,8	8,3
2	3,7	7,8	8,3
3	3,8	7,6	8,4
4	3,9	7,8	8,2
5	3,8	8,2	8,4
6	3,9	8,3	8,0
7	3,9	8,4	8,1
8	3,5	8,1	8,5
9	3,5	8,0	8,4
10	3,8	8,0	8,4
Média	3,79	8,0	8,3

Fonte: O autor (2021).

Em seguida foram executados os experimentos em conformidade com a Figura 62, em que o isolador possui uma das extremidades sem a presença da camada condutiva, na qual o arco é representado através de um centelhador ajustado para que ocorra disrupção ao aplicar 56 *kV*. O objetivo desse experimento é testar o método com os valores, ou muito próximo, nominais de funcionamento do isolador, com o espinterômetro calibrado em cerca de 7 *kV* e dez medições para cada um dos casos. Nessa classe de experimentos foi verificado a atuação ou não do espinterômetro, visto que a tensão de descarga do centelhador não varia muito ficando entre 52 *kV* à 58 *kV*.

Nas Tabelas 13 e 14 são apresentados os resultados para o teste do método sem parte da camada e o arco representado pela disrupção de um centelhador metálico.

### A.3 CONCLUSÕES

Os resultados exibidos na Tabela 12 apresentam o comportamento conforme o esperado, bem como confirmam a flexibilidade de uso do método. Ambos os casos, conexão metálica do lado fase e conexão metálica do lado terra, resultaram em uma atuação do espinterômetro quando a tensão aplicada era próxima aos 8 *kV*, conforme previsto através do método. Os valores na Tabela 12 mostram que o método é flexível, visto que os mesmos são resultantes de adaptações realizadas para viabilizar o experimento.

Tabela 13 – Teste do método sem 25% da camada do lado fase e arco representado como centelhador.

Medição	Espinterômetro [kV]	Com camada condutiva	Sem camada condutiva
1	6,6	Atuou	Não atuou
2	6,5	Atuou	Não atuou
3	6,6	Atuou	Não atuou
4	6,5	Atuou	Não atuou
5	6,5	Atuou	Não atuou
6	6,5	Atuou	Não atuou
7	6,6	Atuou	Não atuou
8	6,7	Atuou	Não atuou
9	6,6	Atuou	Não atuou
10	6,5	Atuou	Não atuou
Média	6,56	—	—

Fonte: O autor (2021).

Tabela 14 – Teste do método sem 25% da camada do lado terra e arco representado como centelhador.

Medição	Espinterômetro [kV]	Com camada condutiva	Sem camada condutiva
1	6,3	Atuou	Não atuou
2	6,4	Atuou	Não atuou
3	6,5	Atuou	Não atuou
4	6,7	Atuou	Não atuou
5	6,4	Atuou	Não atuou
6	6,5	Atuou	Não atuou
7	6,4	Atuou	Não atuou
8	6,7	Atuou	Não atuou
9	6,5	Atuou	Não atuou
10	6,7	Atuou	Não atuou
Média	6,51	—	—

Fonte: O autor (2021).

Nas Tabelas 13 e 14 é possível notar que em todas as medições realizadas com a camada condutiva houve a disrupção do espinterômetro, seja com o centelhador do lado fase ou do lado terra. Os casos no qual o isolador foi testado limpo, sem a camada, o espinterômetro não atuou. Logo, é possível ver que apenas o arco sozinho não leva à sensibilização do instrumento, o que não é um problema se considerar que

em condições de operação o desenvolvimento do arco está intimamente relacionado a presença de uma camada condutiva.

Os resultados encontrados corroboram com as simulações apresentadas neste trabalho, indicando que os pontos de medição obtidos pelo método são capazes de identificar um arco superficial. Entretanto, os experimentos possuem uma série de limitações.

A representação da camada condutiva nas montagens não representa bem o fenômeno estudado, bem como sua elaboração não seguiu nenhuma normatização que garantisse a reprodutibilidade do experimento. Idealmente, os experimentos deveriam ser elaborados segundo normas e através da utilização de uma câmara de névoa a qual o isolador estaria submetido, essa é uma representação fiel ao fenômeno estudado, porém de difícil execução no laboratório utilizado dada as limitações de equipamento.

Outro ponto a ser salientado diz respeito ao não monitoramento das condições ambientais, em especial temperatura e umidade, no laboratório no momento dos experimentos. Essas condições influenciam na ocorrência da disrupção do espinterômetro e do centelhador, podendo gerar discrepâncias em relação aos valores obtidos.

Existe a influência do campo elétrico dado os cabos utilizados nas ligações do isolador com o espinterômetro e com o centelhador. Essa influência não foi quantificada, conseqüentemente é difícil prever qual o impacto que elas possuem nos ensaios realizados.

Por fim, constata-se que os experimentos servem como indicativo técnico de que o método desenvolvido realmente tem êxito na identificação de descargas superficiais em isoladores poliméricos para os casos estudados, porém, dado as limitações mencionadas, são de difícil reprodutibilidade e possuem pouca fidelidade com o fenômeno estudado.