



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA POLUIÇÃO BIOLÓGICA  
EM ISOLADORES DE VIDRO**

Proponente:

**Bruno Albuquerque Dias**

Campina Grande – PB

Março - 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA POLUIÇÃO BIOLÓGICA  
EM ISOLADORES DE VIDRO**

**BRUNO ALBUQUERQUE DIAS**

*Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Campina Grande como  
parte dos requisitos necessários para obtenção do  
grau de mestre em Engenharia Elétrica.*

Orientadores:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Prof. Tarso Vilela Ferreira, D. Sc.

Campina Grande – PB  
Março – 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

D541s      Dias, Bruno Albuquerque.  
              Simulação computacional da poluição biológica em isoladores de vidro /  
              Bruno Albuquerque Dias. – Campina Grande-PB, 2017.  
              79 f. : il. color.

              Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal  
              de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.

              "Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Tarso Vilela  
              Ferreira".

              Referências.

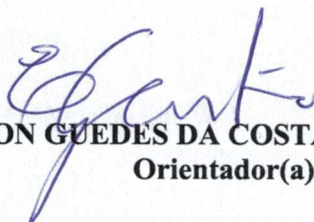
              1. Corrente de Fuga. 2. Isoladores de Vidro. 3. Linhas de Transmissão.  
              4. Poluição Biológica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Ferreira, Tarso Vilela.  
              III. Título.

CDU 621.31(043)

**"SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA POLUIÇÃO BIOLÓGICA EM ISOLADORES DE VIDRO"**

**BRUNO ALBUQUERQUE DIAS**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/03/2017**



**EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG**  
**Orientador(a)**

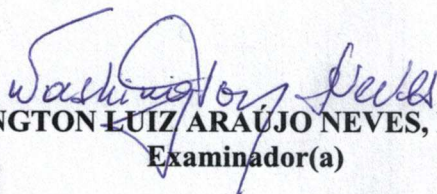
**TARSO VILELA FERREIRA, D.Sc., UFCG**  
**Orientador(a)**



**ANDRÉ DANTAS GERMANO, Dr., UFCG**  
**Examinador(a)**



**HELDER ALVES PEREIRA, Dr., UFCG**  
**Examinador(a)**



**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG**  
**Examinador(a)**

**CAMPINA GRANDE - PB**

# AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, em primeiro lugar, pela minha vida, pela saúde da minha família e pelo suporte e força nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, José Dias e Maria de Fátima Albuquerque, por todo o esforço que tiveram para me proporcionar uma boa educação, que dentre todas as dificuldades sempre me proporcionaram o melhor estudo possível.

Aos professores Edson Guedes da Costa e Tarso Vilela Ferreira pela ajuda em todos os momentos, orientando-me pelo melhor caminho e mostrando sempre satisfação em fazer parte do crescimento de seus alunos.

Aos meus irmãos, amigos e familiares, pelo incentivo e pelos momentos de alegria e descontração que me proporcionaram. Também à minha namorada, Maria Tereza, pela colaboração em toda minha vida acadêmica.

Aos amigos do “LAT – Pós” pelo convívio e ajuda diária.

Enfim, agradeço a todas as pessoas com as quais tive a oportunidade e o privilégio de conviver durante o mestrado, que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção do profissional que sou hoje.

O autor deseja externar agradecimento ao CNPq, Capes e Copele, pelo provimento da bolsa de estudos no âmbito do mestrado.

O autor também deseja externar agradecimento à Eletronorte pelo suporte financeiro durante o Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Soluções para eliminação de limo e outros materiais característicos da região amazônica para isoladores de subestações da Regional de Transmissão do Pará” (Contrato 4500084727 Eletronorte/CPqD/UFGA/UFPA/UFPA/UFPA/PaqTc-PB), aos parceiros na pesquisa, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações, Universidade Federal do Pará, Fundação Parque Tecnológico da Paraíba, e pessoalmente aos colegas pesquisadores envolvidos.

*“O período de maior ganho em  
conhecimento e experiência é o período  
mais difícil da vida de alguém.”*

Dalai Lama.

## RESUMO

O acúmulo de poluentes na superfície dos isoladores, que compõem as linhas de transmissão, permite a formação de uma camada de substâncias que, sob incidência de névoa, chuva ou orvalho, produzem soluções condutoras. Na região norte do Brasil, muitos casos de poluição biológica são caracterizados como limo, associação de microalgas e fungos, a resistência dielétrica da superfície do isolador, nestes casos, é reduzida, causando falhas no sistema elétrico. Para investigar o efeito dessa poluição sobre os isoladores, o presente trabalho apresenta um modelo computacional que relaciona o aspecto visual do limo no isolador (intensidade, forma e local) com a sua corrente de fuga obtida por simulação e correlaciona eficiência da simulação com experimentos em laboratório. Os objetos de teste utilizados foram isoladores de disco de vidro, limpos e poluídos com limo. Os isoladores contaminados foram retirados da subestação de Guamá, Pará, Brasil e os experimentos realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, na Paraíba. As simulações computacionais utilizam o Método dos Elementos Finitos e, assim como as medições laboratoriais, foram realizadas para diferentes condições de umidade, uma vez que essa variável tem influência significativa na condutividade do limo. A simulação se mostrou eficiente e os resultados apresentados mostram que é possível estimar a corrente de fuga desse tipo de isolador sob diferentes condições de umidade e diferentes níveis de poluição

**Palavras-chave:** corrente de fuga, isoladores de vidro, linhas de transmissão, poluição biológica.

## ABSTRACT

The accumulation of pollutants on surface of insulators allows the formation of a layer of substances that, with mist, rain or dew, produces conductive solutions. The surface dielectric strength, in these cases, is reduced, causing failures in electrical system. In the northern region of Brazil, many cases of biological pollution are characterized as slimes, association of microalgae and fungi. To investigate the effect of this pollution on the insulators, the present work presents a computational model that relates the visual aspect of slime in the insulator (intensity, shape and location) with its leakage current obtained by simulation and correlates efficiency of the simulation with laboratory experiments. Test objects used were glass disk insulators, cleaned and polluted with slime. The contaminated insulators were removed from the Guamá Substation, Pará, Brazil and the tests performed at the High Voltage Laboratory of Federal University of Campina Grande in Paraíba, Brazil. Computational simulations using Finite Element Method and, as well as the laboratory measurements, were performed for different humidity conditions since this variable has a significant influence on slime conductivity. The simulation proved to be efficient and the presented results show that it is possible to estimate leakage current of this type of insulator under different humidity conditions and different levels of pollution.

**Keywords:** biological pollution, glass insulators, leakage current, transmission lines.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Isolador de vidro. ....	21
Figura 2.2: Equipamentos contaminados: (a) Ferragem, (b) Ferragem de disjuntor, (c) Isolador e (d) Coluna de isolador cerâmico. ....	22
Figura 2.3: Efeitos indesejáveis dos biofilmes em isoladores poliméricos. ....	22
Figura 2.4: Fotos das cianofíceas encontradas na subestação Guamá: (a) <i>Trebouxia sp.</i> , (b) <i>Scytonema sp.</i> , (c) <i>Gloeocapsa, sp.</i> , (d) <i>Tolypothrix sp.</i> ....	23
Figura 2.5: Etapas de discretização de um isolador cerâmico. ....	25
Figura 2.6: Interface COMSOL - Isolador 2D.....	26
Figura 4.1: Isolador limpo. ....	32
Figura 4.2: Fotografia dos isoladores com limo retirados da SE Guamá: (a)ISO1; (b) ISO2, (c) ISO3, (d) ISO4, (e) ISO5 e (f) ISO6. ....	33
Figura 4.3: Câmara de névoa (a) ilustração (b) fotografia.....	35
Figura 4.4: Montagem para aquisição de corrente de fuga.....	35
Figura 4.5: Representação da variação da umidade durante ensaio. ....	36
Figura 4.6: Isolador de vidro simulado.....	37
Figura 4.7: Variação da contaminação por limo na superfície do isolador. ....	38
Figura 4.8:Etapas de discretização de um isolador cerâmico. ....	41
Figura 4.9: Fluxograma da metodologia empregada. ....	42
Figura 5.1: Corrente de fuga do isolador limpo e saturado. ....	44
Figura 5.2: Corrente de fuga do isolador limpo e úmido.....	44
Figura 5.3: Corrente de fuga do isolador limpo e seco.....	45
Figura 5.4: Corrente de fuga do isolador contaminado e saturado .....	46
Figura 5.5:Corrente de fuga do isolador contaminado e úmido. ....	46
Figura 5.6: Corrente de fuga de isolador contaminado e seco.....	47
Figura 5.7: Corrente de fuga do isolador contaminado e saturado .....	48
Figura 5.8: Corrente de fuga do isolador contaminado e úmido. ....	48
Figura 5.9: Corrente de fuga isolador contaminado e seco.....	49
Figura 5.10: Corrente de fuga do isolador contaminado e saturado.....	50
Figura 5.11: Corrente de fuga do isolador contaminado e úmido. ....	50
Figura 5.12: Corrente de fuga isolador contaminado e seco.....	51

Figura 5.13: Comparação entre valores máximos de corrente de fuga.....	52
Figura 5.14: Simulação isolador saturado. ....	53
Figura 5.15: Simulação isolador úmido.....	54
Figura 5.16: Simulação isolador seco.....	55
Figura 5.17: Corrente de fuga do isolador simulado. ....	56
Figura 5.18: Isolador limpo (a) parte superior, (b) parte inferior e (c) desenho esquemático. ....	58
Figura 5.19: Correlação entre correntes de fuga isolador limpo e saturado. ....	58
Figura 5.20: Correlação entre correntes de fuga isolador limpo e úmido. ....	59
Figura 5.21: Correlação entre correntes de fuga isolador limpo e seco.....	59
Figura 5.22: Isolador contaminado (a) parte superior, (b) parte inferior e (c) desenho esquemático. ....	60
Figura 5.23: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e saturado. ....	61
Figura 5.24: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e úmido. ...	61
Figura 5.25: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e seco. ....	62
Figura 5.26: Isolador contaminado (a) parte superior, (b) parte inferior e (c) desenho esquemático. ....	63
Figura 5.27: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e saturado. ....	63
Figura 5.28: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e úmido. ...	64
Figura 5.29: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e seco. ....	64
Figura 5.30: Isolador contaminado (a) parte superior, (b) parte inferior.....	65
Figura 5.31: Correlação entre correntes de fuga isolador 6 (a) modelagem utilizada na simulação e (b) saturado. ....	66
Figura 5.32: Correlação entre correntes de fuga isolador 6 (a) modelagem utilizada na simulação e (b) úmido.....	68
Figura 5.33: Correlação entre correntes de fuga isolador 6 (a) modelagem utilizada na simulação e (b) seco.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Desligamentos por quilômetro de linha de transmissão. ....	16
Tabela 3.1: Relação dos trabalhos citados na Revisão Bibliográfica. ....	31
Tabela 4.1: Constantes atribuídas aos materiais presentes na simulação. ....	40
Tabela 5.1: Coeficiente de determinação $R^2$ obtido para cada caso analisado. ....	70

## LISTA DE SIGLAS

CPqD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações.
DDNS	Densidade do Depósito de Não Solúvel.
DDSE	Densidade do Depósito de Sal Equivalente.
EDX	Espectroscopia Dispersiva com Energia de Raios-X.
EFIL	Espectroscopia de Fluorescência Induzida por Laser
Eletronorte	Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A.
LAT	Laboratório de Alta Tensão.
MEF	Método dos Elementos Finitos.
MEVA	Microscopia Eletrônica de Varredura Ambiental
N <sub>2</sub>	Gás Nitrogênio.
PV	Parcela Variável.
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande.
UFPA	Universidade Federal do Pará.

# LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Condutividade Elétrica.
$\epsilon$	Permissividade elétrica.
$\vec{D}$	Densidade de campo elétrico.
$\vec{E}$	Intensidade de campo elétrico.
$\vec{J}$	Densidade de corrente elétrica
$\vec{J}_D$	Densidade de corrente de deslocamento
$\vec{J}_e$	Densidade de corrente exterior.

# SUMÁRIO

<b>1. Introdução .....</b>	<b>15</b>
1.1 Contextualização do Assunto .....	16
1.2 Motivação .....	17
1.3 Objetivos .....	18
1.4 Metodologia.....	18
1.5 Estrutura do Trabalho .....	19
<b>2. Fundamentação Teórica.....</b>	<b>20</b>
2.1 Isoladores de Vidro .....	20
2.2 Biofilmes .....	21
2.3 Métodos dos Elementos Finitos.....	23
2.4 Comsol Multiphysics® .....	26
2.5 Coeficiente de Determinação .....	27
<b>3. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>28</b>
3.1 Estado da Arte .....	28
<b>4. Material e Métodos .....</b>	<b>32</b>
4.1 Material .....	32
4.2 Métodos .....	34
<b>5. Resultados.....</b>	<b>43</b>
5.1 Ensaio de Tensão Aplicada.....	43
5.2 Simulações de Corrente de Fuga .....	52
5.3 Comparação entre Medição e Simulação de Corrente de Fuga.....	56
<b>6. Conclusão.....</b>	<b>71</b>
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	72
<b>Referências .....</b>	<b>73</b>
<b>Anexo .....</b>	<b>73</b>

# 1. INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica está diretamente relacionado à qualidade de vida e ao crescimento industrial da sociedade. Assim, a continuidade da operação do setor elétrico e a qualidade da energia são essenciais no mundo moderno. As linhas de transmissão são responsáveis pelo transporte da energia elétrica e, desse modo, são consideradas partes importantes de um sistema elétrico.

A continuidade de operação do setor elétrico é garantida por meio de manutenções e métodos de prevenção de falhas nos elementos que compõem as linhas, com destaque para os isoladores.

Uma das principais causas de mau funcionamento dos isoladores e consequente interrupção do funcionamento das linhas elétricas é a poluição, fator de grande preocupação para empresas de energia elétrica. Uma das razões para a falha dos isoladores é a poluição que se deposita na sua superfície, combinada com neblina, chuva ou orvalho, forma-se uma camada de umidade que se torna condutora, tendo como consequência a redução da suportabilidade elétrica.

Existem duas formas principais de poluição, que podem acarretar falhas em isoladores, são elas, a poluição instantânea e a poluição pré-depositada.

A poluição instantânea se refere a uma contaminação de alta condutividade que se deposita rapidamente sobre superfícies isoladoras, tornando-se a superfície susceptível a descargas disruptivas num tempo curto, menor que uma hora e, em seguida, retorna a um estado de baixa condutividade. Um caso particular de poluição instantânea são as fezes de pássaros. Essa poluição forma um caminho altamente condutivo que pode provocar descargas disruptivas, independentemente da geometria e das características do isolador.

A poluição pré-depositada é subdividida em poluição condutora (que é permanentemente condutor) como exemplo: partículas condutoras metálicas, sais solúveis e ácidos e poluição inerte, classificada como hidrofílica ou hidrofóbica, como exemplo: caulim, argila e óleo.

A poluição, em geral, pode promover uma degradação momentânea, ou permanente, das características elétricas dos isoladores, resultando em mudanças significativas na sua operação natural e causando falhas.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ASSUNTO

As falhas em isolamentos elétricos são as principais causas das interrupções no fornecimento de energia aos consumidores, assim, o desempenho dos isolamentos elétricos está diretamente relacionado aos isoladores (NIGRI, 1999). Adicionalmente, índices apresentados por Monticelli e Garcia (2003) indicaram que grande parte dos desligamentos ocorridos em linhas de transmissão são ocasionados por falhas em isoladores, como pode ser observado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Desligamentos por quilômetro de linha de transmissão.

Componentes	Desligamentos (%)	
	<230 kV	≥230 kV
Isoladores	46,4	63,2
Cabos	19,6	9,7
Cabos para-raios	3,6	7,4
Estruturas	16,3	10,1
Ferragens	0,8	1,8
Outras Causas	13,2	7,8

Fonte: MONTICELLI & GARCIA, 2003.

As falhas em isoladores causam perdas de faturamento, multas severas devido à indisponibilidade das linhas, além dos impactos na parcela variável (PV), parcela a ser deduzida da receita da concessionária em função da não prestação adequada do serviço público de transmissão (ANEEL, 2016). As agências regulamentadoras também costumam aplicar multas pela falta de manutenção das linhas e subestações, inclusive pelo aspecto visual inadequado causado pela incidência da poluição.

Neste trabalho será dada ênfase à poluição pré-depositada, em particular, a poluição de origem biológica. Na região Norte do Brasil, tem-se como causa de falhas a associação de microalgas e fungos (definidos como limo), que se caracteriza como um tipo de poluição pré-depositada, inerte e hidrofílica. O limo quando depositado na superfície do isolador, forma uma camada de condutividade variável e fortemente dependente da umidade.

As atividades desenvolvidas neste trabalho fazem parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Soluções para Eliminação de Limo e Outros Materiais Característicos da Região Amazônica para Isoladores de Subestações da Regional de Transmissão do Pará” coordenado pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD) e desenvolvido por uma equipe multidisciplinar de pesquisadores pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Universidade Federal do Pará (UFPA) e empresa Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A (Eletronorte).



## 1.2 MOTIVAÇÃO

O limo, como elemento poluidor de isoladores, tem larga incidência e tem sido a causa de inúmeras falhas, como falha, entende-se qualquer alteração física ou química no estado de um componente ou instalação, não causando o término de sua habilidade em desempenhar a função requerida, porém podendo, a curto ou longo prazo, acarretar sua indisponibilidade.

Além disso, as contaminações de isoladores de vidro, de porcelana ou poliméricos, assim como, isolamentos de outros equipamentos, requerem manutenção e limpeza diária. A não atuação das equipes de manutenção pode colocar pessoas em risco e aumentar a possibilidade de falha. Contudo a manutenção de equipes de manutenção é honerosa, principalmente se se têm linhas de grandes distâncias e grandes e inúmeras subestações.

Pelo exposto, é primordial estudar as formas de mitigação ou retardamento do crescimento do limo, proporcionando um aumento na confiabilidade, segurança e redução de custo.

A pesquisa desenvolvida criou um modelo computacional que relaciona o aspecto visual do limo no isolador (intensidade, forma e local) com a sua corrente de fuga obtida por simulação. Buscando assim um modelo que reproduza em ambiente computacional o fenômeno de corrente de fuga que ocorre nos isoladores em campo.

A pesquisa consiste em um trabalho inicial de um objetivo maior que é possibilitar a criação de padrão de inspeção que permita analisar fotografias em que se compare a área da cobertura superficial da poluição nos isoladores com simulações computacionais e que a partir das simulações seja possível estimar a amplitude da corrente de fuga sem a necessidade de medição da corrente de fuga. Reduzindo a exposição ao risco de equipes de manutenção e a redução no quantitativo de equipes de inspeção.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 OBJETIVO GERAL

Propor um modelo computacional que relacione o aspecto visual do limo no isolador (intensidade, forma e local) com a sua corrente de fuga obtida por simulação.

### 1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar simulações computacionais com um modelo de isolador;
- Analisar a influência do crescimento da camada do limo no isolador de 0% a 100%, em uma taxa de 10%, nos sinais de corrente de fuga dos isoladores;
- Analisar a influência da umidade (seco, úmido e saturado) nos sinais de corrente de fuga dos isoladores;
- Avaliar a eficiência do processo (metodologia e física) da simulação por meio da aplicação do coeficiente de determinação  $R^2$ .

## 1.4 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho está dividido em etapas. Inicialmente, realiza-se um estudo detalhado dos assuntos necessários ao entendimento da pesquisa. A segunda etapa consiste em uma revisão bibliográfica, leitura de trabalhos publicados e identificação do estado da arte na literatura.

Posteriormente serão apresentados isoladores de vidro, cedidos pela Eletronorte, material utilizado nesta pesquisa e a metodologia empregada, ensaios de tensão aplicada em câmara de névoa para realizar a aquisição da corrente de fuga dos isoladores em diferentes condições de umidade. Simulações de isoladores limpos e contaminados são realizadas com o objetivo de replicar o ensaio em ambiente computacional. Por fim, será realizada uma comparação entre as simulações e os ensaios, seguida pela análise dos resultados obtidos e considerações finais.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 apresenta-se a Fundamentação Teórica. No Capítulo 3, a Revisão Bibliográfica é descrita, com os trabalhos mais relevantes relacionados ao tema da pesquisa. Os materiais e os métodos utilizados são abordados no Capítulo 4, seguido pelo Capítulo 5, no qual são analisados e comentados os Resultados. No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões, seguidas pelas sugestões de trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

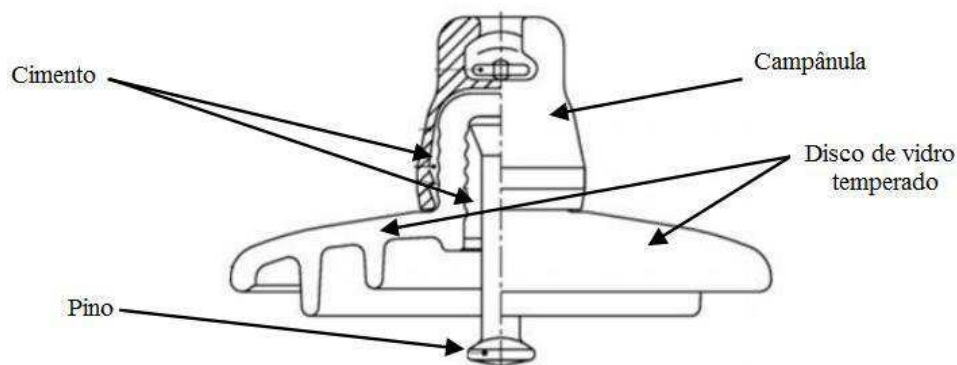
Neste capítulo são descritos os principais tópicos que fundamentam o entendimento da pesquisa, iniciando-se por isoladores de vidro, suas características construtivas e as principais vantagens e desvantagens. Também se descrevem os organismos que compõem os biofilmes de limo e seus efeitos nos isoladores. Em seguida, descreve-se o método dos elementos finitos, apresenta-se o ambiente computacional utilizado para realização da pesquisa e, por fim, apresenta-se o coeficiente de determinação utilizado na comparação dos resultados experimentais com os simulados.

### 2.1 ISOLADORES DE VIDRO

Os isoladores têm as funções de suportar mecanicamente condutores e isolar regiões de potenciais elétricos distintos. Em boas condições operacionais, os isoladores apresentam corrente de fuga pequena, isto é, apresentam perdas baixas e baixo risco de descargas. As solicitações de natureza elétrica a que um isolador deve suportar são a tensão nominal, sobretensões em frequência industrial, surtos de sobretensão de manobra e sobretensões de origem atmosférica (VOSLOO *et al.* 2008).

Especificamente, os isoladores de vidro possuem uma vida útil considerada longa, podendo operar por mais de 40 anos (YANAGUIZAWA, 2007). Em termos construtivos, o isolador de vidro é constituído por uma campânula metálica, disco de vidro temperado, pino metálico e argamassa de cimento aluminoso, conforme mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Isolador de vidro.



Fonte: SANTA TEREZINHA, 2016.

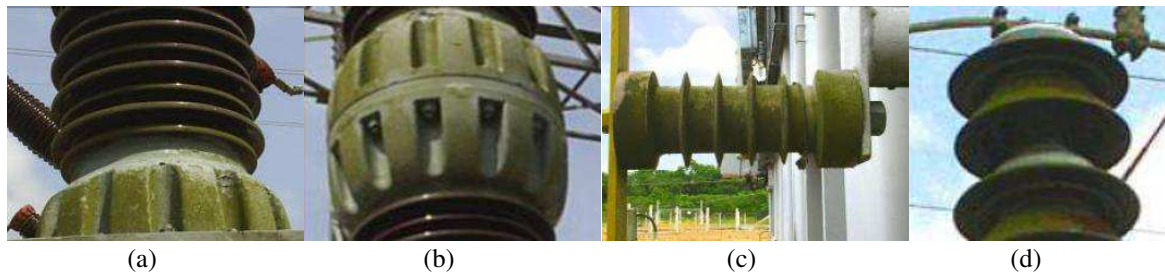
Dentre as características positivas do vidro temperado, tem-se: resistência a danos por radiação ultravioleta, alta rigidez dielétrica, alta resistência à compressão e estilhaçamento quando danificado, permitindo assim a identificação imediata de unidades defeituosas. Como desvantagens, isoladores de vidro apresentam peso elevado e são atrativos ao vandalismo, pois estilhaçam quando alvejados.

Mais informações sobre isoladores de vidro temperado, suas características elétricas e mecânicas, ensaios e seu processo de fabricação podem ser obtidas em Ferreira (2007), Fuchs, (1977), Gorur *et al.* (1999) e Silva (2008).

## 2.2 BIOFILMES

Regiões com clima quente e úmido possuem grande incidência de contaminadores biológicos, também chamados de biofilmes, comumente formados por fungos, algas, limo, líquens e combinações destes. Em porcelanas, vidros e polímeros constituintes de equipamentos elétricos, eles causam comprometimento da capacidade de isolamento, o que pode conduzir a eventuais falhas no sistema. Além disso, quando presentes nas partes metálicas dos equipamentos, os biofilmes causam má impressão visual, que costuma ser causa de multas por parte das agências reguladoras. Na Figura 2.2 são apresentadas fotografias de equipamentos de uma subestação com incidência de biofilmes.

Figura 2.2: Equipamentos contaminados:  
 (a) ferragem, (b) ferragem de disjuntor, (c) isolador e (d) coluna de isolador cerâmico.

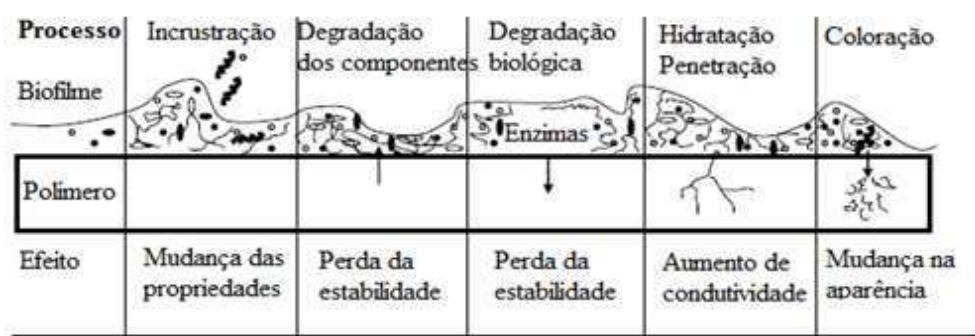


Fonte: MELLO et al, 2008a.

### 2.2.1 EFEITOS INDESEJÁVEIS DOS BIOFILMES

Biofilmes consistem em associações entre diferentes tipos de organismo. Contêm populações mistas de bactérias, fungos, protozoários, e, se as condições permitirem, organismos ainda mais elevados na cadeia alimentar, como larvas. Os biofilmes são compostos principalmente por água (80-95%) e representam uma forma muito complexa de vida microbiana (FLEMMING, 1998). Em isolamentos elétricos eles podem causar danos relacionados ao aspecto visual e mecânico devido à concentração de material orgânico que reduz a hidrofobicidade, aumenta a condutividade elétrica e causam a corrosão do isolador. Os efeitos indesejáveis dos biofilmes podem ser observados na Figura 2.3.

Figura 2.3: Efeitos indesejáveis dos biofilmes em isoladores poliméricos.



Fonte: Adaptado de FLEMMING, 2010.

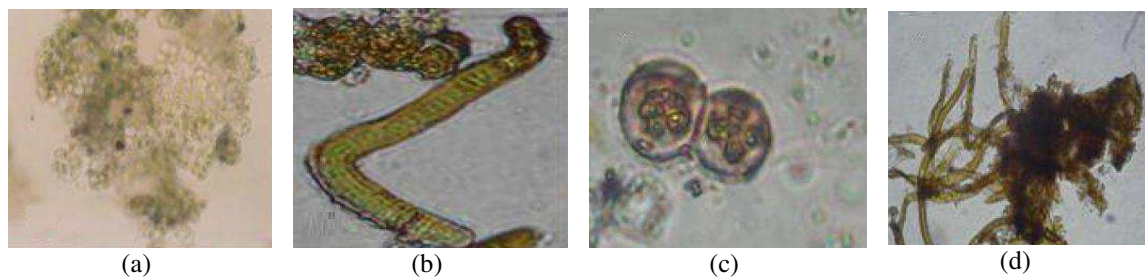
### 2.2.2 LIMO

“Limo” é um termo coloquial que designa biofilmes compostos de cianobactérias ou cianofíceas, juntamente com fungos. As cianofíceas são organismos unicelulares, coloniais ou filamentosos, autotróficos, que usam como fonte de alimento

a energia solar e nutrientes inorgânicos, como: amônia, nitrato e fosfato solúvel. Nas partes periféricas do conteúdo interior das células, concentram-se os pigmentos que podem conferir as algas a coloração característica verde azulada (ESKINAZI-LEÇA *et al.* 2004).

As cianofíceas possuem uma característica que lhes proporciona uma vantagem em relação aos demais seres vivos: na falta de nitrogênio fixado (amônia, nitrito e nitrato), elas podem obter esse elemento químico aproveitando o gás nitrogênio ( $N_2$ ) da atmosfera. Essa característica lhes confere grande adaptabilidade em ambientes aéreos (MELLO *et al.* 2008b). Algumas das espécies mais comuns na composição do limo da região em estudo podem ser visualizadas na Figura 2.4.

Figura 2.4: Fotos das cianofíceas encontradas na subestação Guamá:  
(a) *Trebouxia sp.*, (b) *Scytonema sp.*, (c) *Gloeocapsa, sp.*, (d) *Tolypothrix sp.*



Fonte: MELLO *et al.*, 2008b.

A composição e a estrutura do limo variam em relação ao local no qual ele se instala. Em superfícies ásperas (ou porosas), a composição do limo é caracterizada por cianofíceas filamentosas produtoras de muco, exemplificada na Figura 2.4(b). Em superfícies mais polidas, como o vidro, ou a porcelana, dos isoladores, ocorre o domínio das cianofíceas e clorofíceas cocóides, exemplificada na Figura 2.4(c).

O isolador com limo somente apresenta valor elevado de corrente de fuga quando o limo está vivo. O isolador poluído com limo morto apresenta condições de operação semelhantes a um isolador limpo, adicionalmente, o limo pode permanecer seco por um longo período, mas após serem molhados, voltam a crescer e se reproduzir.

## 2.3 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos (MEF) é uma técnica numérica utilizada para obter soluções de equações diferenciais parciais, nos casos em que é impossível, ou extremamente complicado, de se obter uma solução analítica exata

(NORRIE & VRIES, 1978). O método tem sua origem no campo da análise estrutural. Embora o tratamento matemático anterior do método tenha sido fornecido por Richard Courant, em 1943, o método não foi aplicado a problemas de eletromagnetismo até 1968 (SADIKU, 1989).

Na Engenharia Elétrica, o MEF começou a ser utilizado quando Andersen (1977) apresentou uma das primeiras experiências com cálculo de campos elétricos utilizando elementos finitos. O autor escreveu um programa na linguagem Fortran, no qual definiu uma região retangular exemplificando um elemento resistivo com permissividade, condutividade e valores de potencial definido. O resultado obtido foi comparado com o potencial teórico, apresentando valores adequados. O autor concluiu que o programa apresentou grande potencial, mas era impossibilitado devido à pequena capacidade computacional disponível na época.

Com o avanço da tecnologia, o método tornou-se amplamente utilizado para simulação de componentes e equipamentos, não apenas em termos de grandezas elétricas, mas também com aplicações em diversas outras grandezas físicas (SILVESTER & FERRARI, 1983).

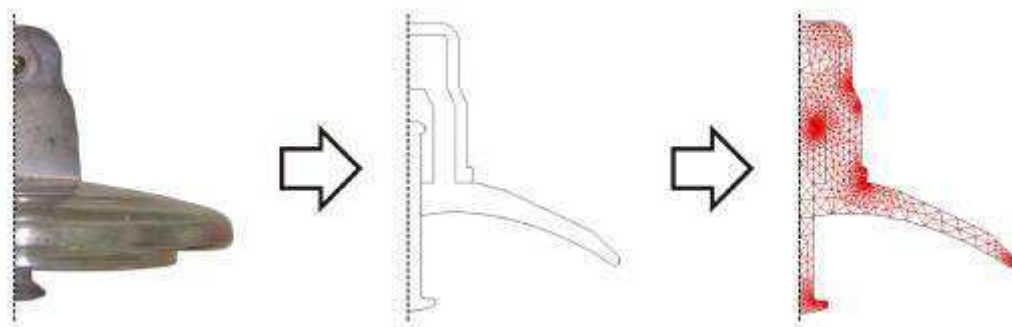
Segundo Sadiku (2004), a utilização de elementos finitos em um problema qualquer envolve, basicamente, quatro etapas. Todavia, o uso prático do MEF impõe a adição de uma quinta etapa que será descrita a seguir juntamente com as demais.

### 2.3.1 DISCRETIZAÇÃO

Consiste na representação abstrata da região, equipamento ou corpo que se deseja analisar, e na subdivisão desta representação em um número finito de elementos. Os elementos subdivididos podem ser de uma forma geométrica qualquer, tais como triângulos, retângulos e quadriláteros. Pode-se também misturar formas distintas, entretanto, para reduzir o esforço computacional, é preferível utilizar a mesma forma geométrica para todos os elementos (SADIKU, 2004). Na Figura 2.5 pode-se observar as etapas de discretização de um isolador de vidro temperado.



Figura 2.5: Etapas de discretização de um isolador cerâmico.



Fonte: FERREIRA, 2007.

### 2.3.2 EQUACIONAMENTO DOS ELEMENTOS

Nesta etapa, é feita a definição de um modelo equacional, com o intuito de reger fisicamente os elementos. A escolha do modelo deve ser feita baseada no problema físico analisado. Após a escolha do modelo físico a ser adotado, são calculadas as matrizes de coeficientes para cada um dos elementos (SADIKU, 2004).

### 2.3.3 JUNÇÃO DOS ELEMENTOS

Após definir o modelo físico do problema, deve-se realizar a junção de todos elementos da região que se deseja analisar. Todas as matrizes de coeficientes são utilizadas para a criação da matriz global de coeficientes. Assim, a equação matricial resultante da combinação das equações matriciais dos elementos representa um sistema de equações (SADIKU, 2004). Segundo Ferreira (2007), este sistema ainda não é solucionável, pois possui mais incógnitas do que equações, assim, para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno.

### 2.3.4 SOLUÇÃO DO SISTEMA

Após aplicar as devidas condições de contorno, o sistema de equações representado na equação matricial global pode ser então solucionado através de métodos numéricos tradicionais. A solução do sistema fornecerá os valores numéricos correspondentes de cada nó do sistema (SADIKU, 2004).

### 2.3.5 VISUALIZAÇÃO

Os ambientes computacionais de simulação baseados no MEF devem dispor de ferramentas visuais e numéricas de representação, permitindo identificar todas as implicações da análise. Apesar de apresentar soluções aproximadas, a exatidão do MEF pode ser melhorada com o refinamento da malha. Existe um nível ótimo de

refinamento que proporciona uma solução mais próxima da realidade com um esforço computacional razoável.

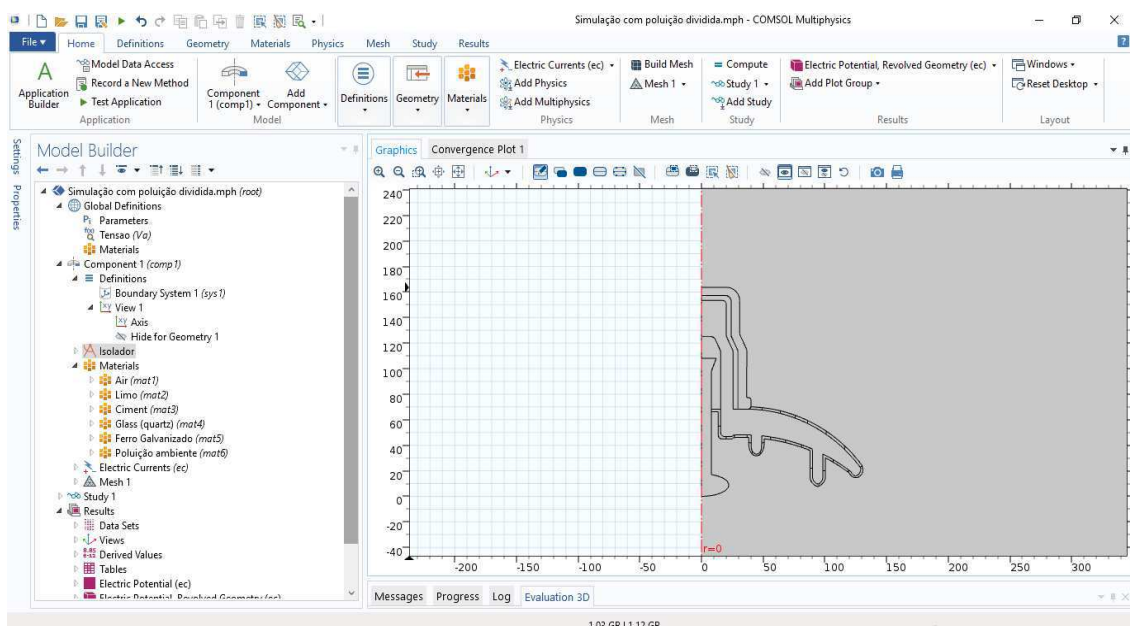
## 2.4 COMSOL MULTIPHYSICS®

O Comsol Multiphysics® é um ambiente computacional desenvolvido com o objetivo de modelar, projetar e analisar problemas que podem ser solucionados por meio de equações diferenciais, como por exemplo, as equações de Maxwell.

O Comsol permite a visualização das soluções das mais variadas formas, entre elas: gráficos, mapas de cores e a representação da solução por linhas equipotenciais. Além dessas características, o *software* ainda possui módulos que servem para que as equações que o compõem se encontrem de forma organizada, separadas pelas áreas a quais o programa abrange (BARROS, 2015).

Na Figura 2.6, pode ser visualizada a interface do COMSOL 5.2 utilizada para modelar o isolador.

Figura 2.6: Interface COMSOL - Isolador 2D.



Fonte: Próprio autor.

## 2.5 COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO

Parâmetro amplamente empregado em estudos de engenharia, o coeficiente de determinação é uma medida de análise de um modelo selecionado, varia entre 0 e 1, indicando, o quanto, o modelo consegue reproduzir os valores de observações em estudo (COX, 1972). A forma de calcular esse parâmetro está mostrada na equação (2.1)

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (2.1)$$

em que  $SSE$  é o somatório da diferença dos quadrados entre o sinal em estudo e o sinal modelo, e  $SST$  é o somatório da diferença dos quadrados entre o sinal em estudo e a média deste sinal (ARAÚJO, 2012).

O coeficiente  $R^2$  foi aplicado na pesquisa, com o objetivo de quantificar a aderência entre as curvas obtidas por meio dos ensaios de tensão aplicada e as curvas obtidas por meio de simulações, indicando, entre 0 e 1, o quanto o modelo simulado em ambiente computacional consegue reproduzir os sinais observados nas aquisições.

No próximo capítulo será realizada uma revisão bibliográfica, leitura de trabalhos publicados e identificação do estado da arte na literatura.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre as pesquisas mais relevantes na área de poluição biológica em isoladores, das técnicas para identificação da poluição e do efeito que poluição biológica causa na operação dos isoladores.

#### 3.1 ESTADO DA ARTE

Coowar e Hoole (1988) analisaram cadeias de isoladores cerâmicos, apresentando poluição biológica, de uma área florestal localizada em Papua Nova Guiné, com alta umidade e chuvas frequentes. Os autores analisaram a tensão de descarga disruptiva das cadeias secas e molhadas, tensão necessária para acarretar o rompimento do dielétrico curto-circuitando as ferragens do isolador, revelando que, quando secas, as unidades contaminadas tinham características semelhantes das não contaminadas. No entanto, quando molhadas, a tensão de descarga disruptiva das unidades contaminadas era reduzida para menos de um terço do valor de referência.

Naito *et al.* (1990) não obtiveram resultados análogos aos de Coowar e Hoole (1988). Os autores analisaram isoladores cerâmicos retirados de linhas de transmissão do Paraguai, México e Nova Zelândia, contendo poluição por líquens. Analisaram a tensão de descarga disruptiva dos equipamentos e a densidade do depósito de sal equivalente (DDSE), e concluíram que líquens, exclusivamente, não eram capazes de provocar descarga disruptiva, exceto se a espessura da camada de poluição fosse alta e houvesse superposição de outros poluentes salinos. Segundo os autores, líquens apresentavam baixo efeito na variação da tensão de descarga disruptiva, resultado que tem sido largamente questionado por meio de pesquisas conduzidas desde então.

Na contribuição da forma de identificação e análise da poluição biológica de forma microscópica, McAfee *et al.* (1997) realizaram escaneamento microscópico, difração de raios-X, análise de espectro de energia de dispersão e foto-microscopia em isoladores de porcelana que foram retirados de linhas de transmissão nos Estados Unidos. Entre as conclusões dos autores, destacam-se que a poluição biológica era formada basicamente por microalgas; e que a concentração é maior nas regiões abaixo

das aletas (sombreadas). Contribuindo assim no entendimento de como a poluição começava a se propagar sobre a superfície do isolador.

Adicionalmente, Wallström e Karlsson (2004) investigaram a poluição biológica presente em isoladores retirados de sistemas elétricos da Tanzânia, Sri Lanka e Suécia. Os autores corroboraram com resultados de McAfee *et al.* (1997), concluindo que a poluição nos isoladores era composta basicamente por microalgas verdes e filamentos de fungos. Complementarmente, os autores propuseram um novo método para determinar se a superfície do isolador estava livre de poluição biológica ou não. O método era baseado na microscopia eletrônica de varredura ambiental (MEVA) com espectroscopia dispersiva com energia de raios-X (EDX).

Gubanski *et al.* (2000) avaliaram isoladores de diferentes tipos, sob poluição biológica composta predominantemente de microalgas, fungos e líquens. Os autores determinaram que a parte inferior das aletas era a área preferencial para o desenvolvimento da poluição devido à baixa incidência de radiação solar. Constataram também que as algas poderiam permanecer secas por um longo período, mas após serem molhadas, voltavam a crescer e se reproduzir.

Dando continuidade à pesquisa, Derrfalk e Gubanski (2004) apresentaram um método para quantificar o nível de poluição biológica em isoladores por meio de análise de imagens. Os autores realizaram testes de tensão de descarga disruptiva com os isoladores molhados e observaram que, isoladores com 10%-20% da superfície coberta, apresentaram uma tensão de descarga disruptiva 30% menor em relação a isoladores limpos. Posteriormente, os isoladores foram fotografados sob iluminação adequada para análise das imagens. Ao final, uma rotina foi utilizada para classificar automaticamente as imagens e estimar a área do isolador que estava coberta por limo. Segundo os autores, a técnica poderia ser aplicada para isoladores em campo, bem como para identificar outros tipos de poluição. No entanto, a aplicação do método em campo dependeria de condições adequadas de iluminação dos isoladores.

Vários trabalhos abordaram a necessidade de utilização de misturas de aditivos químicos como controle e proteção contra ataques microbiológicos, Amin e Salman (2006) analisaram isoladores poliméricos e explanaram seus benefícios e malefícios em relação aos isoladores cerâmicos. Com base no material utilizado na composição dos isoladores poliméricos, avaliaram seu envelhecimento e descreveram os fatores responsáveis pela degradação biológica: algas, fungos e limo. Propuseram que a

proteção contra o ataque microbiológico seria a mistura de aditivos químicos, como por exemplo, a aplicação do retardante de chamas à base de hidrato de zinco e boro.

Mello *et al.* (2008a) coletaram e analisaram amostras de poluentes típicos da floresta amazônica em equipamentos do sistema elétrico. Foram encontradas mais de dez espécies de algas, embora os autores tenham determinado que o principal componente da poluição consistisse de algas da classe *Cyanophyceae* e fungos. Os autores encontraram uma relação direta entre a corrente de fuga e a quantidade de limo vivo, confirmando a necessidade de lavagem dos equipamentos e de aplicação de soluções para controle da velocidade de crescimento. Dando continuidade ao trabalho anterior Mello *et al.* (2009), determinaram ainda que hipoclorito em concentrações superiores a 25% era eficaz para controlar a velocidade de crescimento do limo em ferragens e estruturas de concreto.

Estudos realizados na Colômbia, com isoladores cerâmicos e poliméricos, limpos e poluídos, contaminados por agentes biológicos típicos de regiões tropicais, foram apresentados em dois trabalhos: León *et al.* (2014) estudaram um tipo de mofo denominado *Aspergillus niger* que se apresentava como pontos escuros que se proliferavam sob clima quente e úmido. Os autores comprovaram que o mofo provocava um aumento da corrente de fuga de 14%. Rojas *et al.* (2015) estudaram a influência do crescimento da alga *Chlorella vulgaris* e observaram um aumento da corrente de fuga de 80% em isoladores cerâmicos. Nos isoladores poliméricos, a corrente de fuga aumentava, em média, 60%. Os autores ressaltaram ainda a necessidade de se verificar, em trabalhos futuros, se o poluente era capaz de penetrar na superfície dos isoladores poliméricos.

As contribuições mais relevantes dos trabalhos destacados na revisão bibliográfica, para idealização desta dissertação, encontram-se elencadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Relação dos trabalhos citados na Revisão Bibliográfica.

Ano	Pesquisadores	Contribuição
1988	COOWAR & HOOLE	Constataram que a tensão de descarga disruptiva de cadeias contaminadas molhadas é reduzida para menos de um terço do valor de referência.
1990	NAITO <i>et al.</i>	Concluíram que líquens, exclusivamente, não são capazes de provocar descarga disruptiva, exceto se a espessura da camada de poluição for alta e houver superposição de outros poluentes.
1997	MCAFFE <i>et al.</i>	Constataram que a poluição biológica em isoladores é formada basicamente por microalgas; e a concentração é maior nas regiões abaixo das aletas.
2000	GUBANSKI <i>et al.</i>	Constataram que as microalgas podem permanecer secas por um longo período, mas após serem molhadas, voltam a crescer e se reproduzir.
2004	DERNFALK & GUBANSKI	Apresentam um método para quantificar o nível de poluição biológica em isoladores por meio de análise de imagens, possibilitando classificar automaticamente as imagens, e estimar a área do isolador que está coberta.
2004	WALLSTRÖM & KARLSSON	Propuseram um novo método para determinar se a superfície de um isolador está livre de poluição biológica e constataram que a poluição biológica em isoladores é composta basicamente por microalgas verdes e filamentos de fungos.
2006	AMIN & SALMAN	Destacam a eficácia da aplicação do retardante de chamas à base de hidrato de zinco e boro para suplantar o crescimento de poluentes biológicos em isoladores.
2008	MELLO <i>et al.</i>	Encontraram uma relação direta entre a corrente de fuga e a quantidade de limo vivo, confirmando a necessidade de lavagem dos equipamentos e de aplicação de soluções para controle da velocidade de crescimento.
2009	MELLO <i>et al.</i>	Observaram uma correlação positiva entre a intensidade da corrente de fuga e o conteúdo do limo. Concluíram também que hipoclorito em concentrações superiores a 25% é eficaz para controlar a velocidade de crescimento do limo em ferragens e estruturas de concreto.
2014	LEON <i>et al.</i>	Comprovaram que um tipo de mofo denominado <i>Aspergillus niger</i> provoca um aumento da corrente de fuga em isoladores cerâmicos e poliméricos de 14%.
2015	ROJAS <i>et al.</i>	Constataram que o crescimento da alga <i>Chlorella vulgaris</i> , causa aumento da corrente de fuga de 80% em isoladores cerâmicos e de 60% em isoladores poliméricos.
2017	DIAS	Apresentou um modelo capaz de estimar por meio de simulações utilizando o método dos elementos finitos a corrente de fuga de um isolador poluído biologicamente, baseado na área de cobertura da poluição na superfície do isolador.

Fonte: Próprio autor.

Com base na revisão bibliográfica, observa-se que várias publicações abordaram os efeitos de diversos tipos de poluição biológica compostas majoritariamente de microalgas e fungos. As pesquisas analisaram métodos de detecção da poluição, formas de controle e mitigação do poluente, e ainda o impacto em termos do valor da descarga disruptiva e da corrente de fuga do isolador. Entretanto, a implementação de simulações que possam reproduzir como a contaminação biológica influi na operação de isoladores é uma área pouco explorada. O capítulo 4, apresentado a seguir, trata dos materiais e os métodos empregados na realização da pesquisa.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e os métodos empregados nas simulações e medições em laboratório.

### 4.1 MATERIAL

Os objetos de teste, utilizados nos experimentos, foram seis isoladores de vidro contaminados, cedidos pela Eletronorte, e um isolador de vidro em bom estado, pertencente ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG. Antes de ser ensaiado, o isolador retirado do almoxarifado do LAT foi lavado com água desmineralizada e seco com toalhas de papel, de forma a oferecer um valor referência de operação. O isolador descrito pode ser visualizado na Figura 4.1.

Figura 4.1: Isolador limpo.



(a)

(b)

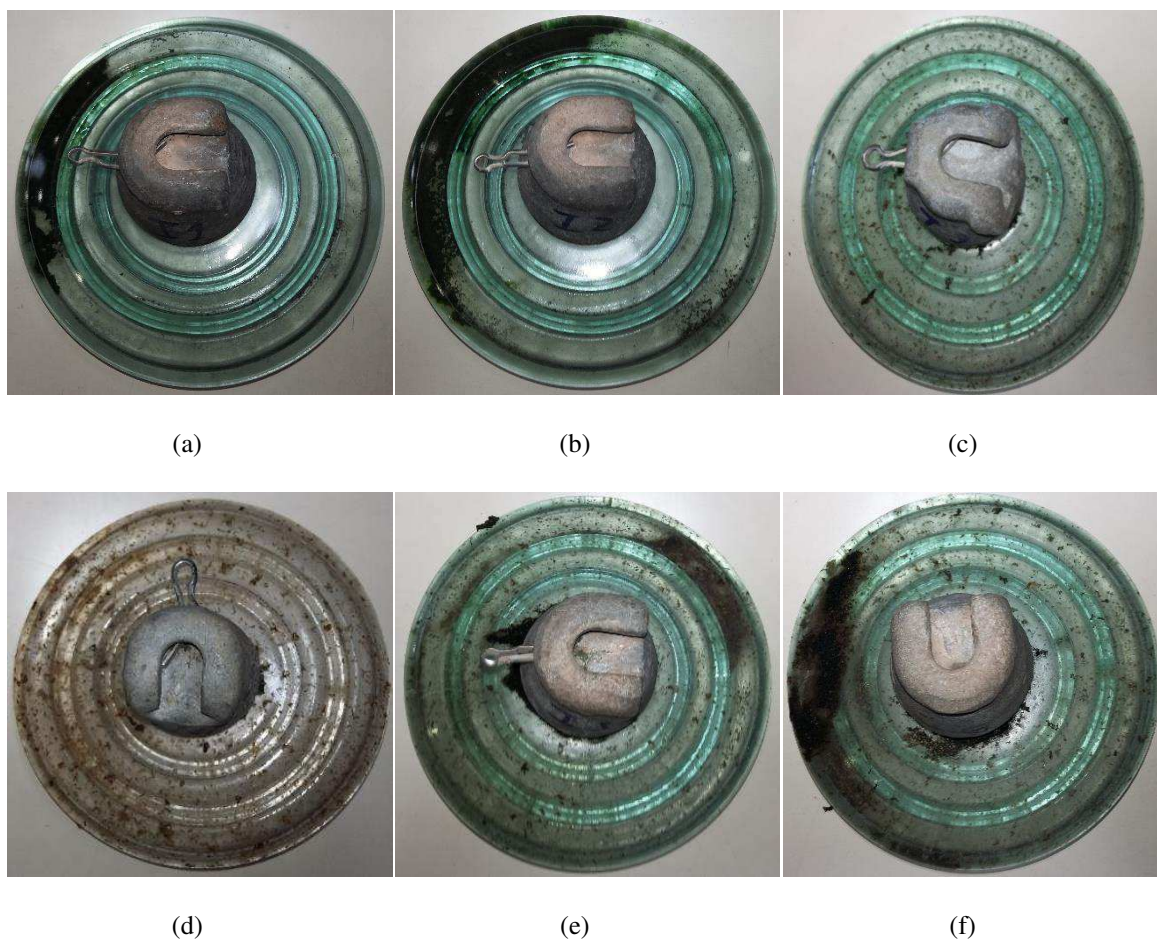
(c)

Fonte: Próprio autor.

Os isoladores contaminados foram retirados da Subestação de Guamá, situada em Belém, Pará, durante duas visitas técnicas, realizadas em 30 de março e 04 de agosto de 2016. Os isoladores contaminados, bem como as suas regiões cobertas por limo, podem ser observados na Figura 4.2.



Figura 4.2: Fotografia dos isoladores com limo retirados da SE Guamá:  
(a)ISO1; (b) ISO2, (c) ISO3, (d) ISO4, (e) ISO5 e (f) ISO6.



Fonte: Próprio autor.

O limo encontrado nos isoladores contaminados possuía características que variavam com a umidade do local em que os isoladores estavam instalados. Assim, foram consideradas três diferentes condições desde o limo saturado até limo seco:

- i. A condição de saturação do limo: ocorre durante ou imediatamente após a incidência da chuva, quando o limo fica encharcado com água. Essa condição é caracterizada pela observação de pequenos filetes de água presentes no objeto de teste.
- ii. A condição que visa representar o limo em um ambiente com elevada umidade relativa do ar, característico da região amazônica, é a condição de úmido. Essa condição é caracterizada pela observação de uma consistência úmida e compacta da amostra, mas sem a presença de filetes de água.

- iii. Finalmente, tem-se a condição que visa representar o limo em um ambiente seco, como resultante da exposição direta ao sol. Essa condição é caracterizada pela observação de uma consistência compacta da amostra, mas sem perder umidade quando pressionada com um tecido higroscópico.

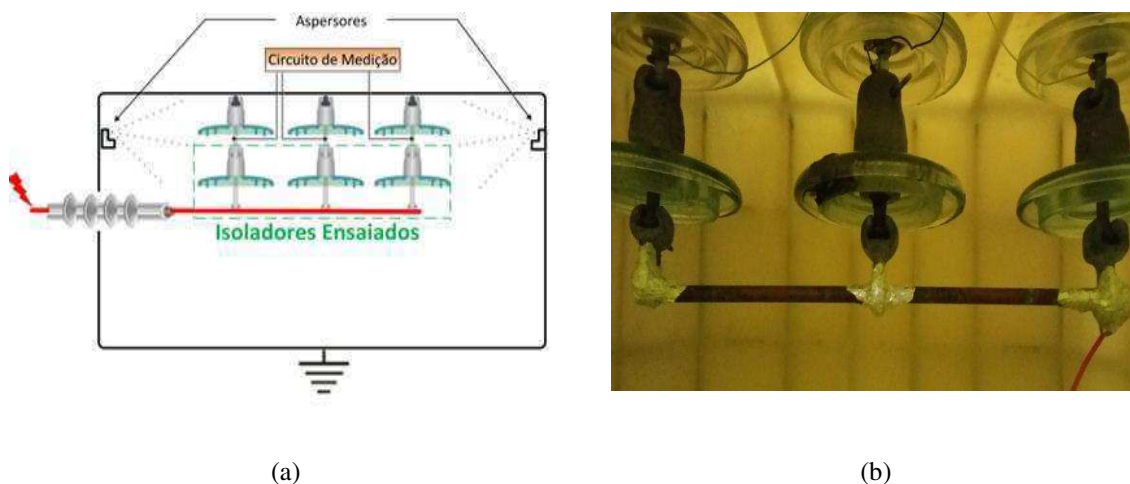
## 4.2 MÉTODOS

Com o objetivo de propor uma metodologia que permitisse analisar o comportamento da corrente elétrica em isoladores contaminados por limo foram realizados ensaios de tensão aplicada em câmara de névoa dos isoladores em diferentes condições de umidade. Em paralelo, foram desenvolvidas simulações com o objetivo de replicar o ensaio em ambiente computacional. E, por fim, os resultados obtidos foram comparados por meio de coeficiente de determinação. As metodologias das atividades desenvolvidas durante a pesquisa são apresentadas a seguir.

### 4.2.1 ENSAIO DE TENSÃO APLICADA

O ensaio de tensão aplicada foi realizado nas dependências do LAT/UFMG com o objetivo de realizar a aquisição da corrente de fuga tanto do isolador limpo quanto dos isoladores contaminados. Para realização do ensaio, inicialmente os isoladores foram posicionados no interior de uma câmara de névoa com o objetivo de analisar as três condições de umidade possíveis (saturado, úmido e seco). A câmara de névoa possui dimensões de 1,2 m x 1,0 m x 1,0 m e comporta até três isoladores para ensaios simultâneos. Névoa limpa é gerada por meio de aspersores, que estão presentes no interior da câmara, e dispostos de modo a evitar a incidência direta da névoa sobre os isoladores, conforme a norma IEC 60507 (1991). A representação da câmara de névoa é apresentada na Figura 4.3(a) e o arranjo montando na Figura 4.3(b).

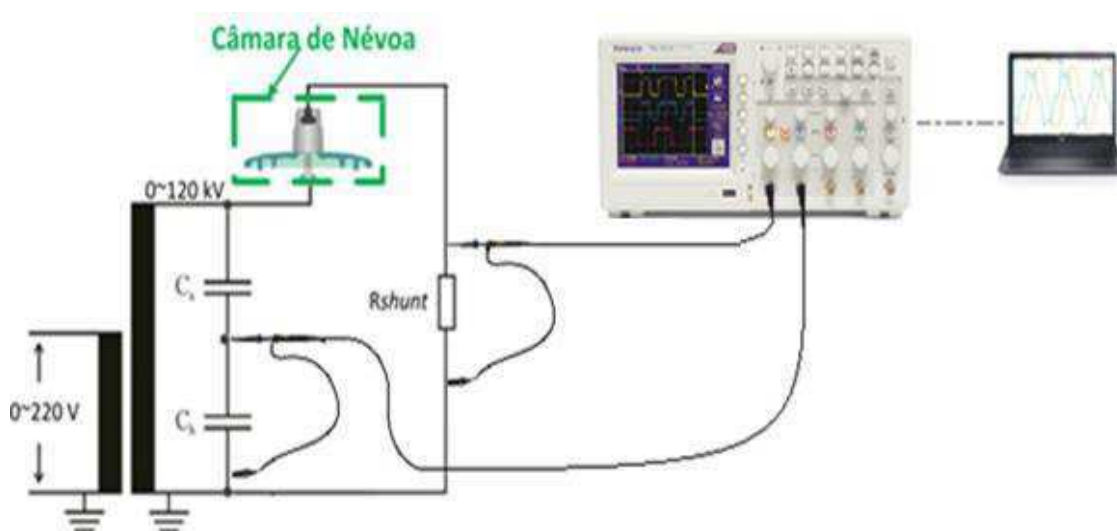
Figura 4.3: Câmara de névoa (a) ilustração (b) fotografia



Fonte: (a)NÓBREGA, 2016, (b) próprio autor.

Para aquisição dos sinais da corrente de fuga, obtidos por meio do ensaio de tensão aplicada, um arranjo experimental foi montado, composto por uma mesa de controle, transformador elevador de tensão (0-120 kV), divisor capacitivo, objeto de teste em série com resistor *shunt* de resistência 1,1 k $\Omega$  e osciloscópio digital conectado a um computador. A representação da montagem para medição da corrente de fuga é apresentada na Figura 4.4.

Figura 4.4: Montagem para aquisição da corrente de fuga.



Fonte: NÓBREGA, 2016.

As aquisições dos sinais da corrente de fuga foram realizadas em três momentos distintos, conforme pode ser observado na Figura 4.5. Após realizados ensaios com a

câmara de névoa não energizada verificou-se que a aplicação de 5 minutos da névoa, representa a condição de saturado, pois a umidade no interior da câmara fica em torno de 87%; 5 minutos após a remoção da névoa, a umidade oscila em valores próximos de 78%, representando a condição de úmido; e uma hora após a remoção da névoa, tem-se a condição de seco, pois a umidade no interior da câmara assume valores próximos de 58%.

Figura 4.5: Representação da variação da umidade durante ensaio.



Fonte: Próprio autor.

Os isoladores permaneceram energizados durante toda a realização do experimento.

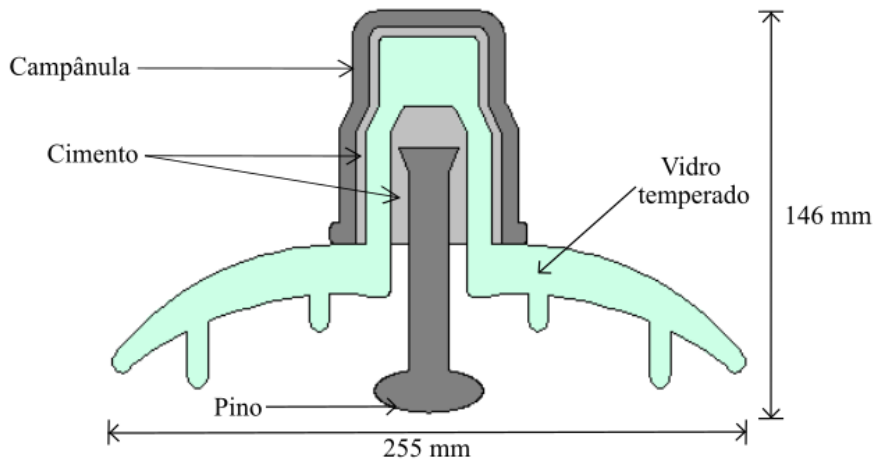
#### 4.2.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

##### a) Modelo do isolador

As simulações foram realizadas no ambiente Comsol Multiphysics®. E foram idealizadas e geradas para que se pudesse compreender os mecanismos relacionados aos efeitos da contaminação por limo na operação de isoladores de vidro, em especial na sua corrente de fuga.

Para tanto, foi determinado o domínio geométrico do objeto de teste (isolador de vidro), 2D com simetria de revolução. O isolador de vidro modelado em 2D é apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Isolador de vidro simulado.



Fonte: Próprio autor.

No segundo momento do processo de simulação, utilizou-se o módulo *Electrical Currents* com o objetivo de obter a densidade de corrente no isolador. Considerando neste momento a simulação de um sistema estacionário por questões didática e de simplicidade, a densidade de corrente pode ser obtida por meio da forma pontual da lei de Ohm (COMSOL<sup>®</sup>, 2016) conforme equação (4.1).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} + \vec{J}_e, \quad (4.1)$$

em que,  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material,  $\vec{E}$  é a intensidade de campo elétrico e  $\vec{J}_e$  é a densidade de corrente exterior.

No caso em estudo, a tensão aplicada no objeto de teste é senoidal e varia ao longo do tempo, assim, torna-se necessária a realização do estudo em função do tempo, o que pode ser obtido por meio da ferramenta *time dependent*. Nesse caso, a densidade de corrente possuirá uma componente dependente do tempo, denominada, densidade de corrente de deslocamento,  $\vec{J}_D$  (SADIKU, 2004), conforme equação (4.2).

$$\vec{J}_D(t) = \frac{\partial \vec{D}(t)}{\partial t}. \quad (4.2)$$

Assim, a equação (4.3), que apresenta a densidade de corrente em função do tempo será:

$$\vec{J}(t) = \sigma \vec{E}(t) + \frac{\partial \vec{D}(t)}{\partial t} + \vec{J}_e(t), \quad (4.3)$$

em que, densidade de campo elétrico  $\vec{D}$  pode ser expressa como o produto de  $\vec{E}$  por uma constante  $\epsilon$  (permissividade elétrica). Sendo essa constante definida pelas propriedades elétricas do material, conforme apresentado na equação (4.4).

$$\vec{D}(t) = \epsilon \vec{E}(t). \quad (4.4)$$

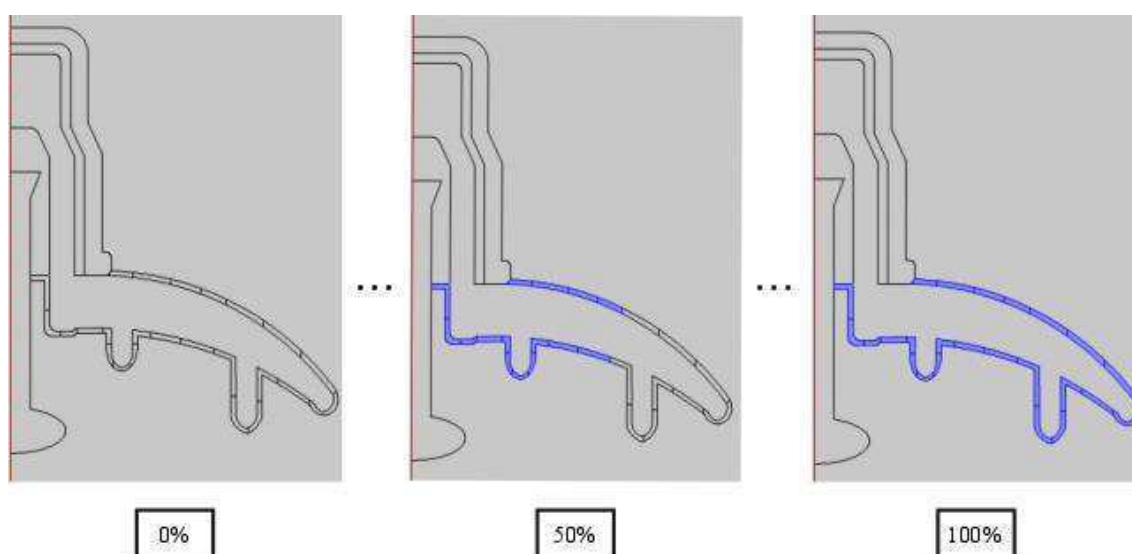
Logo, constata-se a partir da equação (4.3) e da equação (4.4), que dois parâmetros essenciais para a simulação são a permissividade elétrica e a condutividade elétrica.

#### b) Representação da camada de poluição

Considerando que a contaminação por limo é não uniforme e que é extremamente difícil que um isolador em campo opere absolutamente limpo (seja pela ausência de limo ou outros tipos de poluentes), pode-se considerar que quando o isolador não estiver poluído com limo, outros tipos de poluição ambiente estarão presentes, as quais em geral possuem valores de permissividade elétrica e condutividade elétrica reduzidos. Suas propriedades elétricas, assim como as do limo, variam de acordo com a umidade estudada.

Mello *et al.* (2009) mostraram que nos isoladores o limo se fixa inicialmente no pino e campânula (regiões com maior rugosidade), espalhando-se posteriormente para o corpo isolante. Como a presença do limo nas regiões metálicas não impacta na corrente de fuga, as simulações realizadas para diferentes níveis de poluição, analisaram o efeito do crescimento da poluição na superfície isolante apenas. Com o intuito de representar nas simulações as conclusões dos estudos observados por Mello *et al.* (2009), foram consideradas três condições de umidade possíveis (seco, úmido, saturado) e uma taxa de crescimento de 10% da superfície recoberta por limo, sentido ferragem-corpo isolante, situação análoga ao que ocorre na prática. Conforme apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7: Variação da contaminação por limo na superfície do isolador.



Fonte: Próprio autor.

#### c) Propriedades dos materiais

No ambiente do Comsol Multiphysics<sup>®</sup>, após a modelagem do objeto de teste, é necessário inserir as constantes físicas que caracterizam cada material do sistema a ser simulado. O ar que envolve o isolador foi especificado com uma permissividade relativa de  $\epsilon_r = 1$  e condutividade baixa,  $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-15}$  S/m. O ferro apresentou valores de permissividade relativa e condutividade elétrica elevados de  $\epsilon_r = 1,0 \cdot 10^5$  e  $\sigma = 5,98 \cdot 10^7$  S/m (RAHMAN, 2010). O vidro foi especificado com as seguintes constantes, permissividade relativa,  $\epsilon_r = 7,5$  e condutividade elétrica,  $\sigma = 1,0 \cdot 10^{-8}$  S/m ambas fornecidas pelo próprio *software* de simulação. O cimento apresentou valores de permissividade relativa e condutividade elétrica, respectivamente, de  $\epsilon_r = 6$  e  $\sigma = 5,30 \cdot 10^{-4}$  S/m (RAHMAN, 2010).

Para todos os casos a poluição foi modelada como uma camada de 2,0 mm sobre a superfície de todo o isolador (Mello *et al.* 2009). A poluição ambiente, que envolve o isolador, foi especificada com permissividade relativa de  $\epsilon_r = 3$ , na condição de seca,  $\epsilon_r = 10$ , na condição de úmida e  $\epsilon_r = 50$ , na condição de saturada. Em termos de condutividade, a poluição ambiente apresentou valores de condutividade de  $\sigma = 1,2 \cdot 10^{-4}$  S/m, na condição de seca,  $\sigma = 1,5 \cdot 10^{-4}$  S/m, na condição de úmida e  $\sigma = 5,0 \cdot 10^{-4}$  S/m, na condição de saturada (ARSHAD, 2015). O limo foi especificado com permissividade relativa de  $\epsilon_r = 9$ , na condição de seco,  $\epsilon_r = 25$ , na condição de úmido e  $\epsilon_r = 80$ , na condição de saturado. Em termos de condutividade, o limo apresentou valores de condutividade de  $\sigma = 1,17 \cdot 10^{-3}$  S/m, na condição de seco,  $\sigma = 3,25 \cdot 10^{-3}$  S/m, na condição de úmido e  $\sigma = 6,67 \cdot 10^{-3}$  S/m, na condição de saturado (CPqD, 2016).

A medição dos parâmetros elétricos do limo, utilizados na camada de poluição simulada, foram obtidos através de ensaios realizados pelo CPqD.

As propriedades dos materiais utilizados para a modelagem do isolador contaminado em estudo são apresentadas conforme Tabela 4.1.



Tabela 4.1: Constantes atribuídas aos materiais presentes nas simulações.

Material	Permissividade Relativa	Condutividade Elétrica (S/m)
Ar	1,00	$1,00 \times 10^{-15}$
Ferro Galvanizado <sup>(1)</sup>	$1,00 \times 10^5$	$5,98 \times 10^7$
Vidro Temperado	7,5	$1,00 \times 10^{-8}$
Cimento Portland <sup>(1)</sup>	6	$5,30 \times 10^{-4}$
Poluição ambiente (seco) <sup>(2)</sup>	3	$1,20 \times 10^{-4}$
Poluição ambiente (úmido) <sup>(2)</sup>	10	$1,50 \times 10^{-4}$
Poluição ambiente (saturado) <sup>(2)</sup>	50	$5,00 \times 10^{-4}$
Limo (seco) <sup>(3)</sup>	9	$1,17 \times 10^{-3}$
Limo (Úmido) <sup>(3)</sup>	25	$3,25 \times 10^{-3}$
Limo (Saturado) <sup>(3)</sup>	80	$6,67 \times 10^{-3}$

Fonte:<sup>(1)</sup>RAHMAN (2010),<sup>(2)</sup>ARSHAD (2015), <sup>(3)</sup>CPqD (2016) e demais retirados de COMSOL Multiphysics®.

#### d) Condições de contorno

Após a inserção das constantes dos materiais, o sistema ainda não é solucionável, pois possui incógnitas que dependem da física do estudo. Assim, para diminuir o número de incógnitas, aplicam-se as condições de contorno. Dentre as condições de contorno, destacam-se a energização do terminal inferior, com uma tensão de 15 kV. Enquanto o terminal superior foi conectado ao terra, considerando assim o isolador sob condições normais de operação. Aplicou-se as constantes físicas do ar na região ao redor do isolador. Essa região deve ser grande o suficiente para minimizar o seu efeito na distribuição dos campos ao longo do modelo analisado.

Aos limites da região que delimita o ar, é atribuída a condição de contorno que assume zero corrente externa e fontes eletromagnéticas, representando assim um espaço aberto isolado (MORAES, 2016).

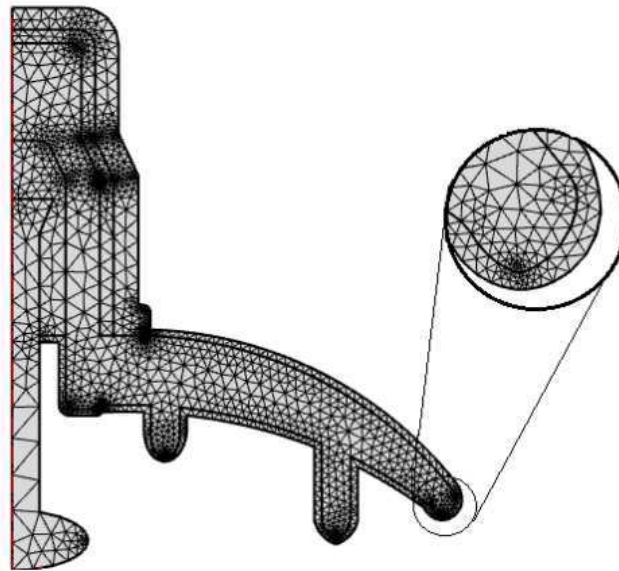
#### e) *Meshing*

Finalmente, depois de realizados os passos anteriores com a importação da estrutura do modelo, especificação das propriedades dos materiais e condições de contorno, todo o domínio foi discretizado em elementos triangulares durante o processo de *meshing*. Para melhorar a precisão dos resultados de simulação, foi realizado um



refinamento do *meshing* na região de interesse através do aumento do número de elementos da malha ao longo da superfície do isolador. O refinamento que resulta em um tamanho de elemento reduzido pode ser visto a partir do *meshing* concentrado ao longo da superfície do isolador, tal como ilustrado na Figura 4.8. Nos procedimentos adotados sempre se buscou a escolha do número de elementos da malha equilibrado, já que um número menor de elementos da malha poderia reduzir a exatidão dos resultados da simulação, enquanto que elementos excessivos poderiam conduzir a um alto custo computacional. Assim, durante todo o desenvolvimento das simulações, o número de elementos otimizado, que proporcionasse um tempo de cálculo mais rápido sem comprometer a precisão do resultado, foi buscado.

Figura 4.8: Etapas de discretização de um isolador cerâmico.



Fonte: Próprio autor.

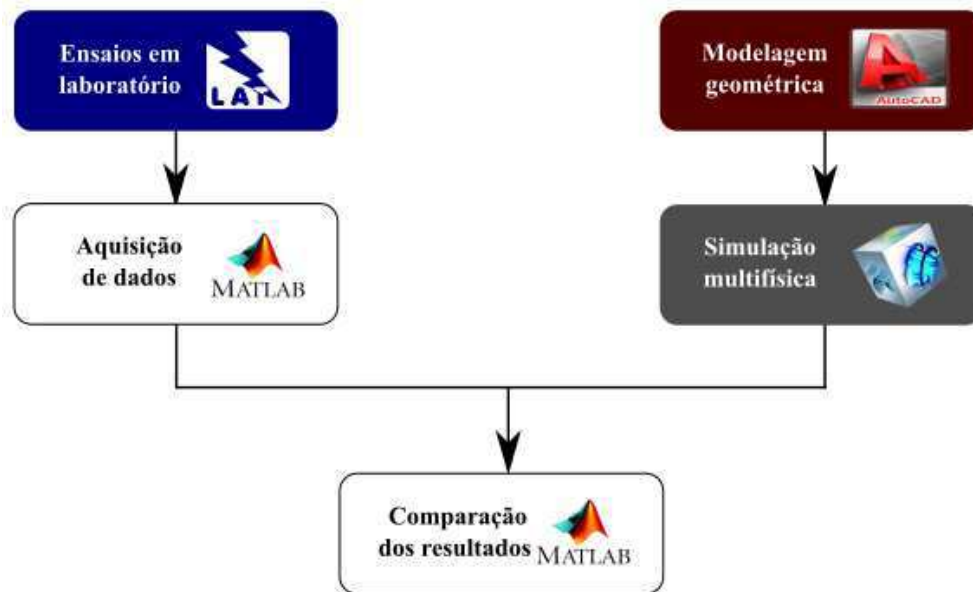
#### 4.2.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Após realizados ensaios e simulações, os dados obtidos foram exportados para o Matlab<sup>®</sup>. Os dados adquiridos nos ensaios, sinais de tensão e de corrente, foram utilizados para analisar o comportamento dos isoladores sob efeito da poluição. Os resultados das simulações, foram utilizados para reproduzir o efeito que ocorre na prática.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações foram utilizadas para avaliar a eficiência do processo da simulação. Para tanto o coeficiente  $R^2$  foi aplicado, com o objetivo de quantificar a aderência entre as curvas obtidas por meio de

medições e as curvas obtidas por meio de simulações, indicando, entre 0 e 1, o quanto o modelo consegue reproduzir os valores observados. Um fluxograma detalhado da sequência dos procedimentos e *softwares* utilizados pode ser observado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Fluxograma da metodologia empregada.



Fonte: Próprio autor.

O material e os métodos apresentados neste capítulo foram empregados, fornecendo resultados de importância significativa para a pesquisa desenvolvida. Os resultados serão apresentados e comentados no próximo capítulo.

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos experimentos e nas simulações. Inicialmente, têm-se os resultados das aquisições dos sinais de corrente de fuga em laboratório seguidos pelas simulações de corrente de fuga realizadas para o isolador em diferentes níveis de poluição e diferentes condições de umidade. Finalmente, os sinais referentes aos ensaios e simulações são comparados por meio do coeficiente de determinação  $R^2$ .

### 5.1 ENSAIOS DE TENSÃO APLICADA

Para realizar aquisições dos sinais de corrente de fuga, foram realizados ensaios de tensão aplicada para sete isoladores, sendo um isolador limpo e seis isoladores contaminados por limo. Após realizados os ensaios, notou-se que alguns isoladores apresentaram padrões semelhantes de correntes de fuga, tanto em termos de amplitude quanto em termos de forma de onda. Assim, optou-se por dividir os resultados em quatro grupos, listados a seguir.

- Grupo I: Isolador limpo;
- Grupo II: ISO1, ISO2 e ISO5;
- Grupo III: ISO3 e ISO4;
- Grupo IV: ISO6.

Os resultados apresentados nas próximas seções são referentes ao primeiro isolador de cada grupo.

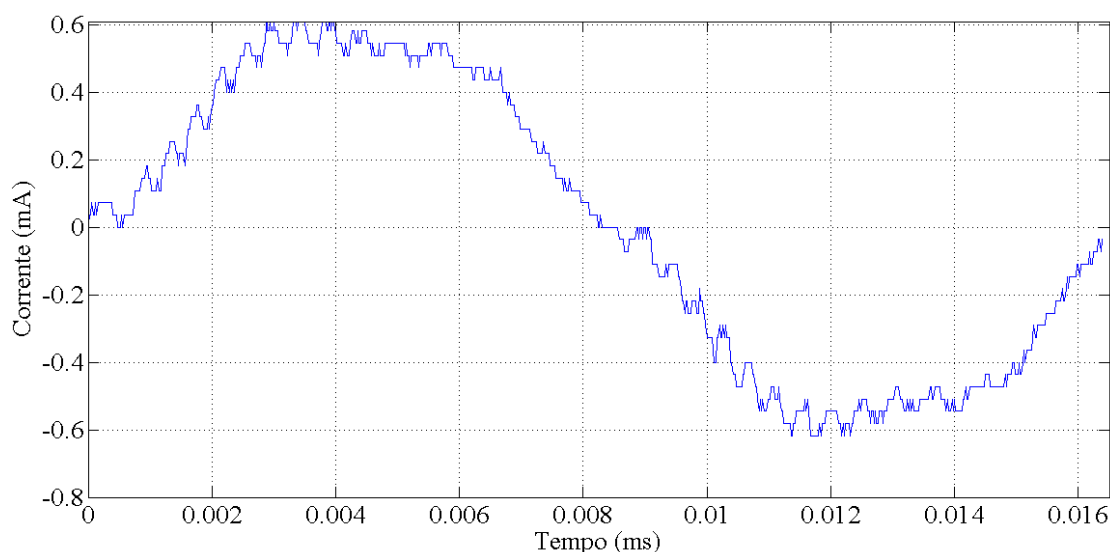
#### 5.1.1 GRUPO I

Conforme pode ser visto na seção 4.2.1, as aquisições dos sinais de corrente de fuga foram realizadas obedecendo o seguinte procedimento: após a aplicação de 5 minutos da névoa, representando a condição de saturado; 5 minutos após a remoção da névoa, representando a condição de úmido; e uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco.

O isolador saturado foi submetido à tensão aplicada de 15 kV e sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi

de 87%. Após processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.1, foi obtido e o valor de pico de 0,61 mA foi determinado.

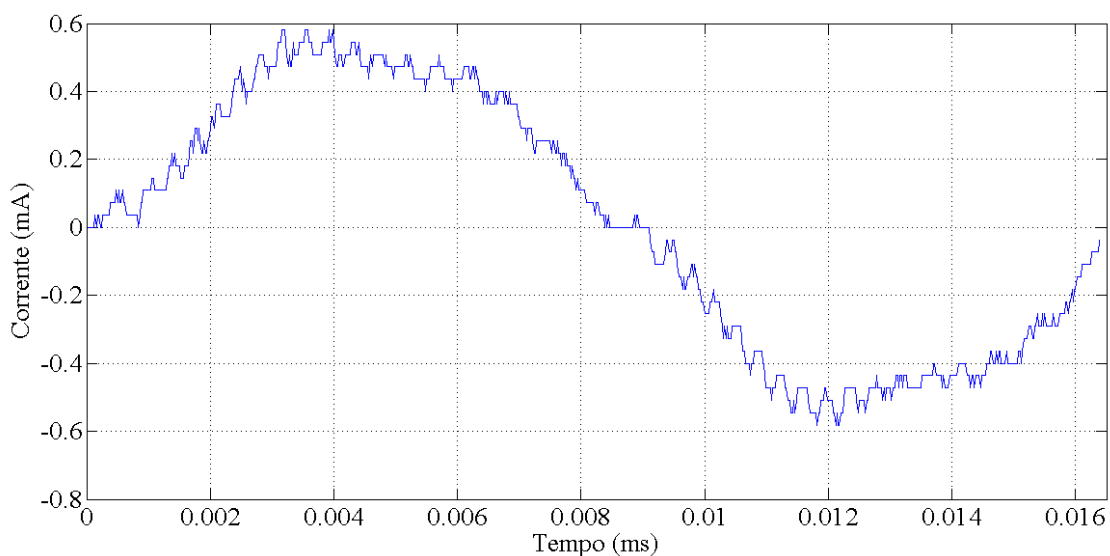
Figura 5.1: Corrente de fuga do isolador limpo e saturado.



Fonte: Próprio autor.

Na condição de úmido, após 5 minutos da remoção da névoa, realizou-se uma nova aquisição do sinal de corrente de fuga do isolador limpo submetido a tensão aplicada de 15 kV. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 78%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.2, foi obtido e o valor de pico de 0,58 mA foi determinado.

Figura 5.2: Corrente de fuga do isolador limpo e úmido.

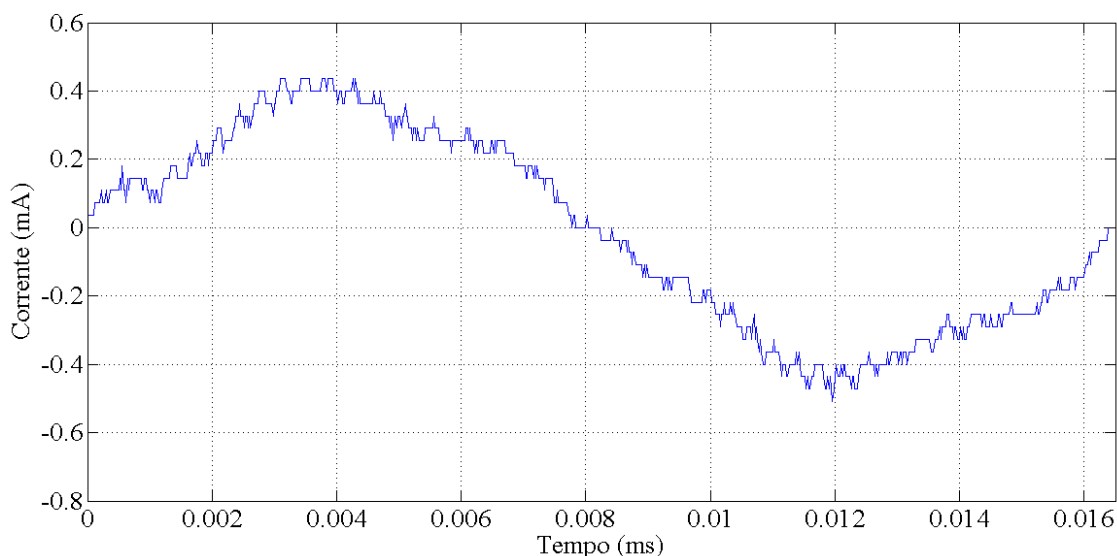


Fonte: Próprio autor.

Uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco, os sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara

foi de 58%. O gráfico da corrente de fuga, Figura 5.3, foi obtido e o valor de pico de 0,43 mA foi determinado.

Figura 5.3: Corrente de fuga do isolador limpo e seco.



Fonte: Próprio autor.

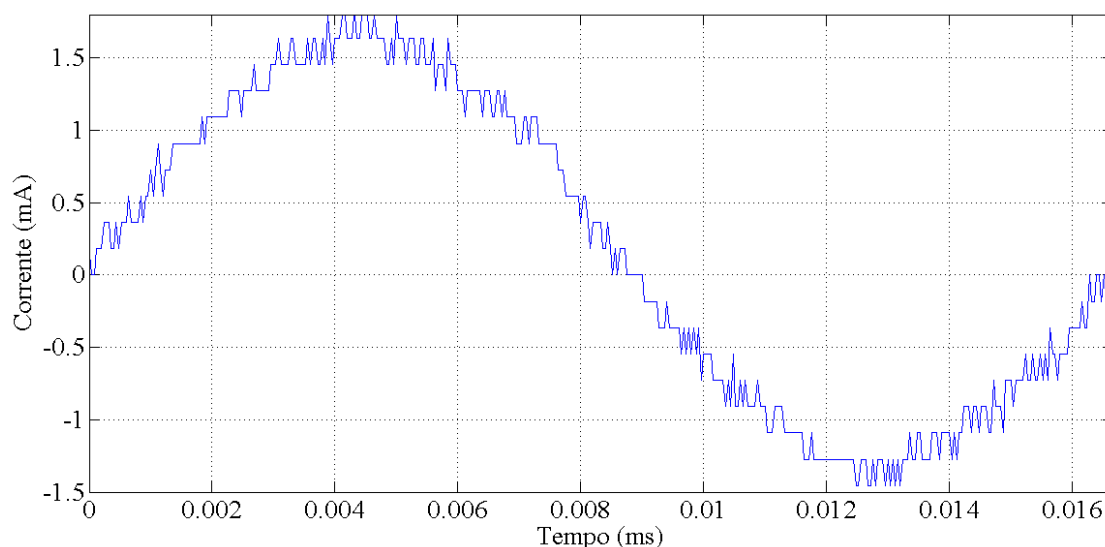
Quando se analisa os gráficos e os valores de pico da corrente de fuga, observa-se que a corrente de fuga aumentou com a elevação da umidade. Em valores percentuais a corrente de fuga aumentou 34% com o aumento de seco para úmido e 5% de úmido para saturado.

### 5.1.2 GRUPO II

Seguindo a metodologia de ensaio, descrita na seção 4.2.1, a aquisição dos sinais de corrente de fuga foram realizadas obedecendo o seguinte procedimento: após a aplicação de 5 minutos da névoa, representando a condição de saturado; 5 minutos após a remoção da névoa, representando a condição de úmido; e uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco.

O isolador saturado foi submetido à tensão aplicada de 15 kV e sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 87%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.4, foi obtido e o valor de pico de 1,82 mA foi determinado.

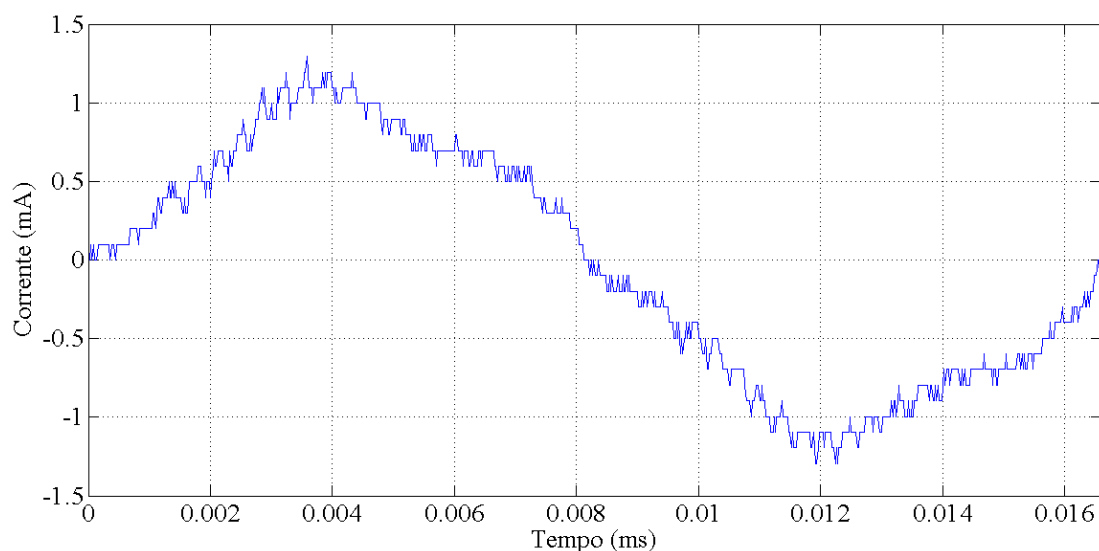
Figura 5.4: Corrente de fuga do isolador contaminado e saturado



Fonte: Próprio autor.

Na condição de úmido, após 5 minutos da remoção da névoa, realizou-se uma nova aquisição do sinal de corrente de fuga do isolador contaminado submetido à tensão aplicada de 15 kV. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 78%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.5, foi obtido e o valor de pico de 1,25 mA foi determinado.

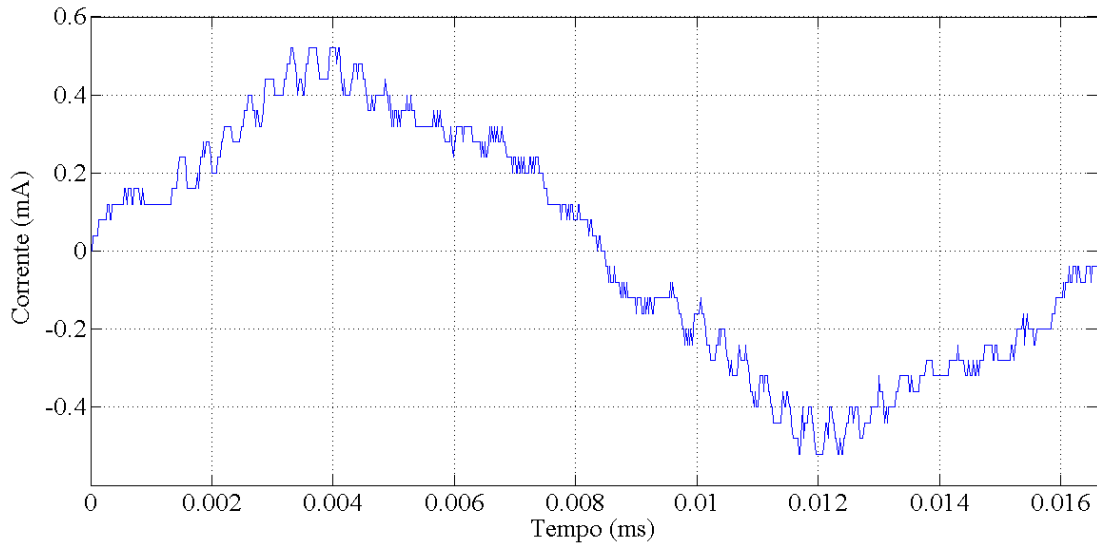
Figura 5.5: Corrente de fuga do isolador contaminado e úmido.



Fonte: Próprio autor.

Uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco. Os sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 58%. O gráfico da corrente de fuga, Figura 5.6, foi obtido e o valor de pico de 0,52 mA foi determinado.

Figura 5.6: Corrente de fuga de isolador contaminado e seco.



Fonte: Próprio autor.

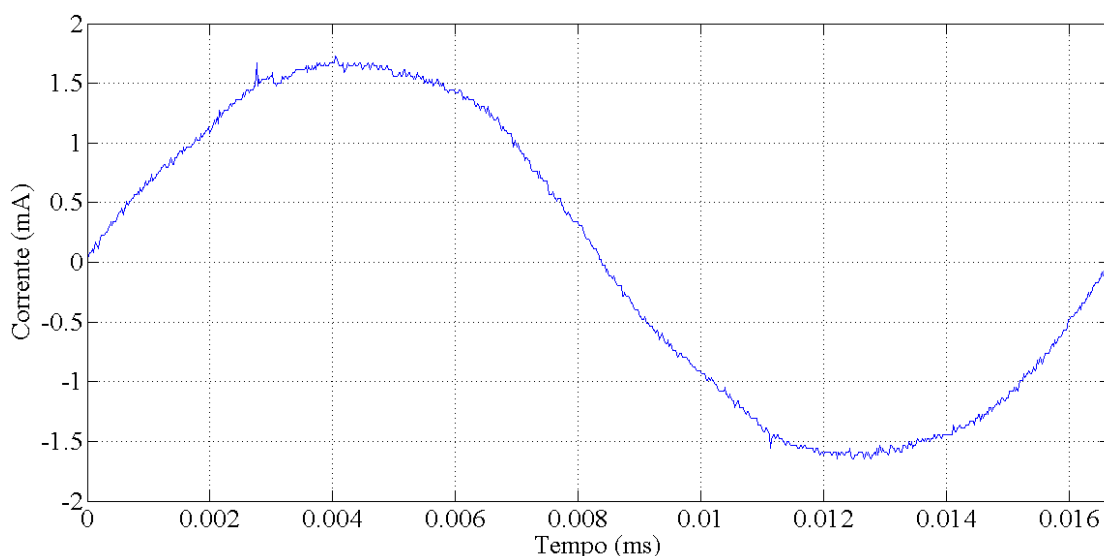
Quando se analisa os gráficos e os valores de pico da corrente de fuga, observa-se que a corrente de fuga aumentou com a elevação da umidade. Em valores percentuais a corrente de fuga aumentou 140% com o aumento de seco para úmido e 45,6% de úmido para saturado.

### 5.1.3 GRUPO III

Conforme metodologia de ensaio apresentada na seção 4.2.1, a aquisição dos sinais de corrente de fuga foram realizadas obedecendo o seguinte procedimento: após a aplicação de 5 minutos da névoa, representando a condição de saturado; 5 minutos após a remoção da névoa, representando a condição de úmido; e uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco.

O isolador saturado foi submetido à tensão aplicada de 15 kV e sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 87%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.7, foi obtido e o valor de pico de 1,73 mA foi determinado.

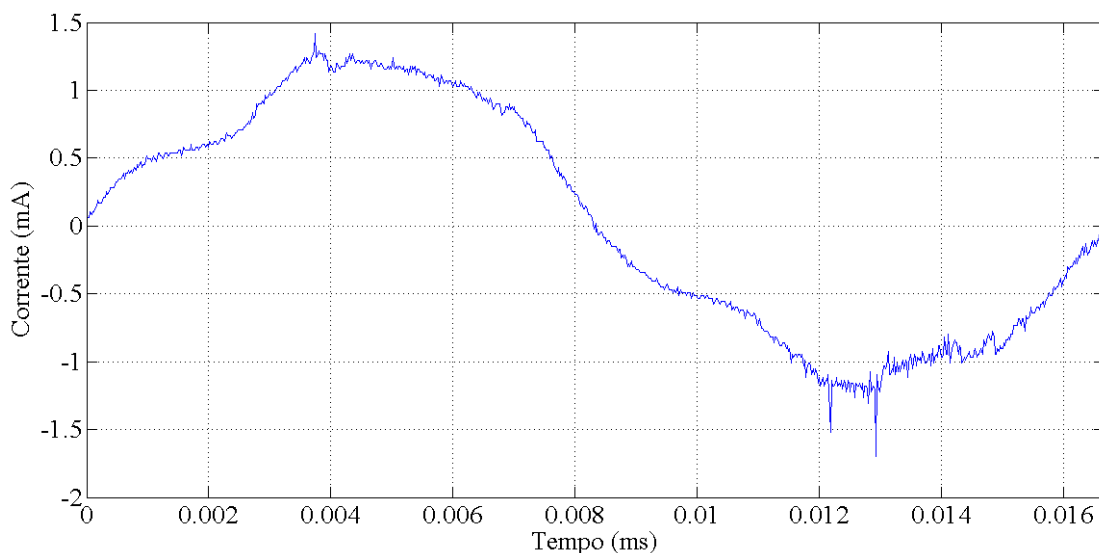
Figura 5.7: Corrente de fuga do isolador contaminado e saturado



Fonte: Próprio autor.

Na condição de úmido, após 5 minutos da remoção da névoa, realizou-se uma nova aquisição do sinal de corrente de fuga do isolador contaminado submetido à tensão aplicada de 15 kV. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 78%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.8, foi obtido e o valor de pico de 1,29 mA foi determinado.

Figura 5.8: Corrente de fuga do isolador contaminado e úmido.

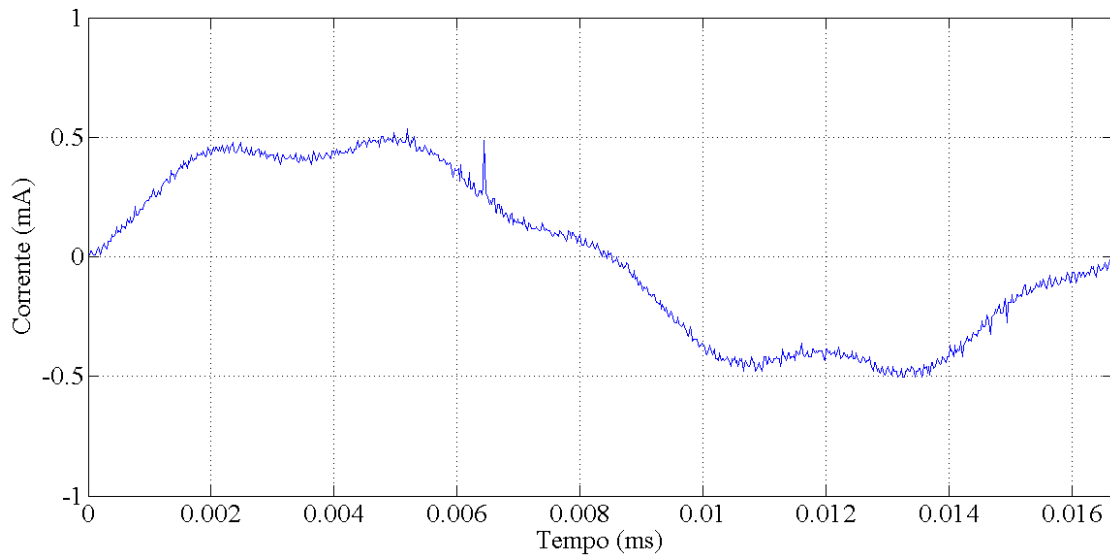


Fonte: Próprio autor.

Uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco. Os sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 58%. O gráfico da corrente de fuga, Figura 5.9, foi obtido e o valor de pico de 0,52 mA foi determinado.



Figura 5.9: Corrente de fuga isolador contaminado e seco.



Fonte: Próprio autor.

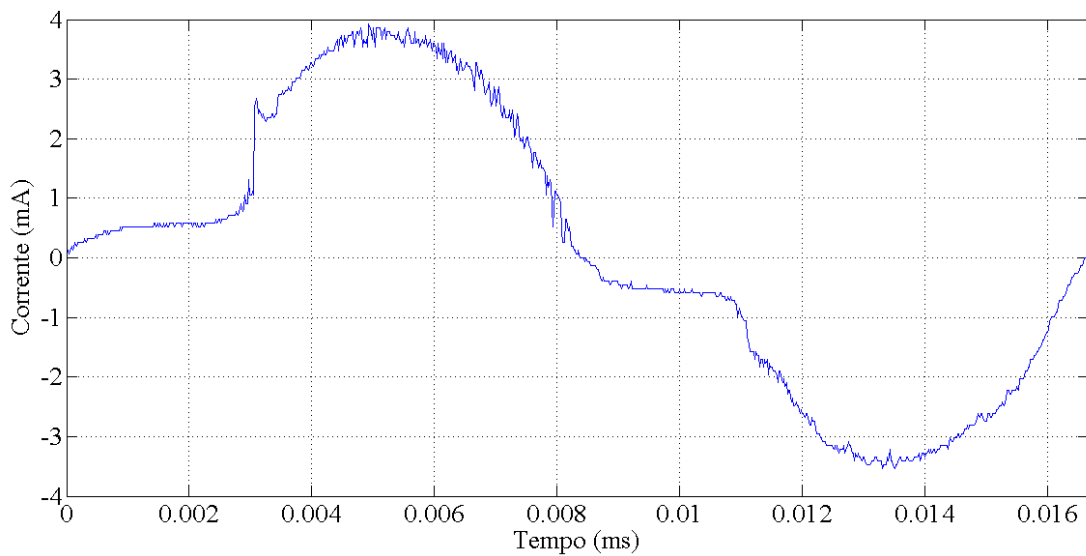
Quando se analisa os gráficos e os valores de pico da corrente de fuga, observa-se que a corrente de fuga aumentou com a elevação da umidade. Em valores percentuais a corrente de fuga aumentou 148% com o aumento de seco para úmido e 34% de úmido para saturado.

#### 5.1.4 GRUPO IV

Seguindo a metodologia de ensaio, na seção, a aquisição dos sinais de corrente de fuga foram realizadas obedecendo o seguinte procedimento: após a aplicação de 5 minutos da névoa, representando a condição de saturado; 5 minutos após a remoção da névoa, representando a condição de úmido; e uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco.

O isolador saturado foi submetido à tensão aplicada de 15 kV e sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 87%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.10, foi obtido e o valor de pico de 3,93 mA foi determinado.

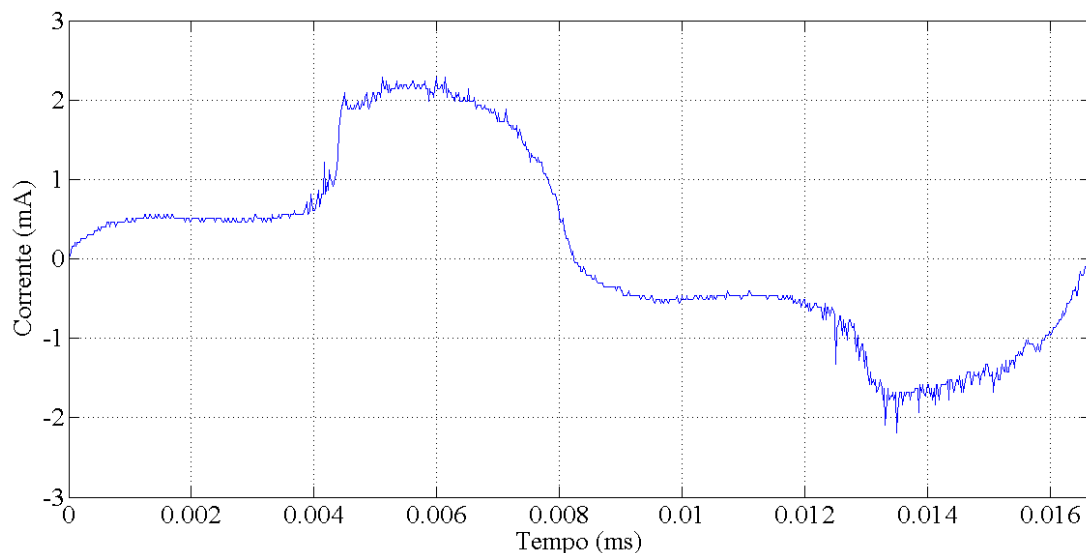
Figura 5.10: Corrente de fuga do isolador contaminado e saturado.



Fonte: Próprio autor.

Na condição de úmido, após 5 minutos da remoção da névoa, realizou-se uma nova aquisição do sinal de corrente de fuga do isolador contaminado submetido à tensão aplicada de 15 kV. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 78%. Após o processamento, o gráfico da corrente de fuga, Figura 5.11, foi obtido e o valor de pico de 2,29 mA foi determinado.

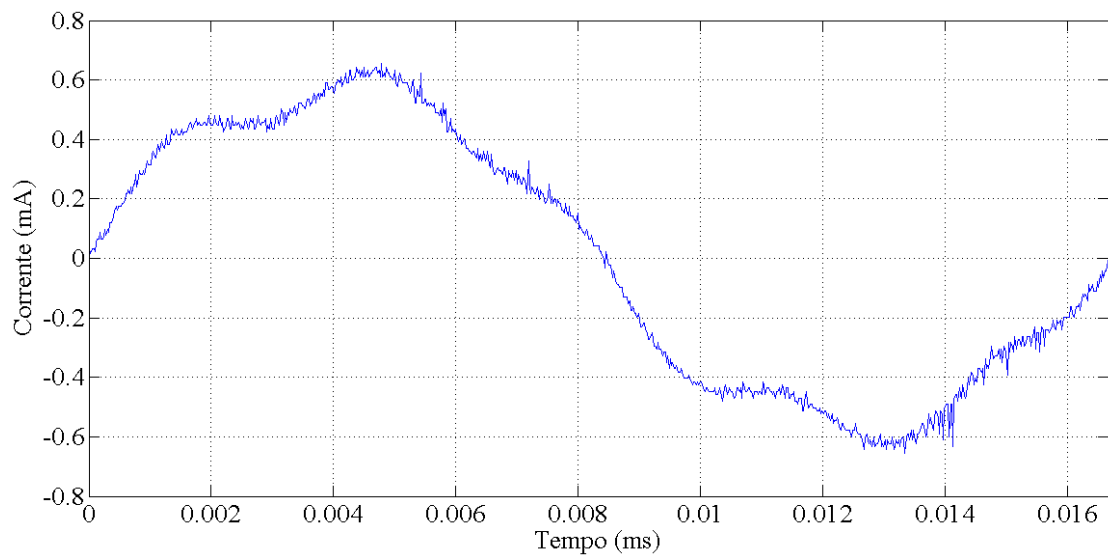
Figura 5.11: Corrente de fuga do isolador contaminado e úmido.



Fonte: Próprio autor.

Uma hora após a remoção da névoa, representando a condição de seco. Os sinais de corrente de fuga foram adquiridos. A umidade relativa medida no interior da câmara foi de 58%. O gráfico da corrente de fuga, Figura 5.12, foi obtido e o valor de pico de 0,65 mA foi determinado.

Figura 5.12: Corrente de fuga isolador contaminado e seco.



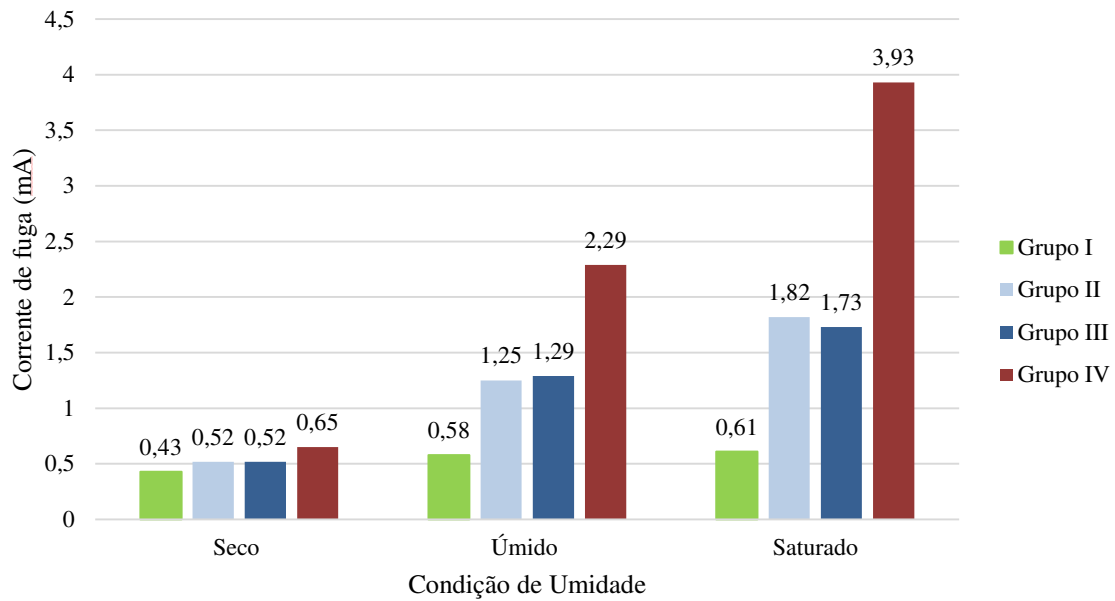
Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa os valores de pico das aquisições de corrente de fuga, observa-se que a corrente de fuga aumentou com a elevação da umidade. Em valores percentuais a corrente de fuga aumentou 252% com o aumento de seco para úmido e 71% de úmido para saturado.

Constatou-se a partir dos resultados obtidos, que o isolador 6, pertencente ao Grupo IV, apresentou o estado mais crítico e que isso se deve tanto à influência do limo quanto ao estado de degradação do isolador.

Uma análise comparativa dos valores de pico das correntes de fuga em cada condição de umidade é apresentada na Figura 5.13. Constata-se que quando seco o limo não influencia significativamente a corrente de fuga do isolador, porém quando úmido ou saturado o limo reduz consideravelmente a rigidez dielétrica superficial do isolador, em valores, constata-se que a corrente de fuga aumentou 295% comparando-se o isolador limpo com o isolador mais poluído na condição de úmido e 544% comparando-se o isolador limpo com o mais poluído na condição de saturado. Assim, pode-se constatar a influência do limo nos isoladores contaminados em todas as condições de umidade. Percebe-se também que os resultados obtidos, estão de acordo com resultados das pesquisas de León *et al* (2014) e Rojas *et al* (2015), que investigaram a influência da poluição biológica na corrente de fuga de isoladores.

Figura 5.13: Comparação entre valores máximos de corrente de fuga.



Fonte: Próprio autor.

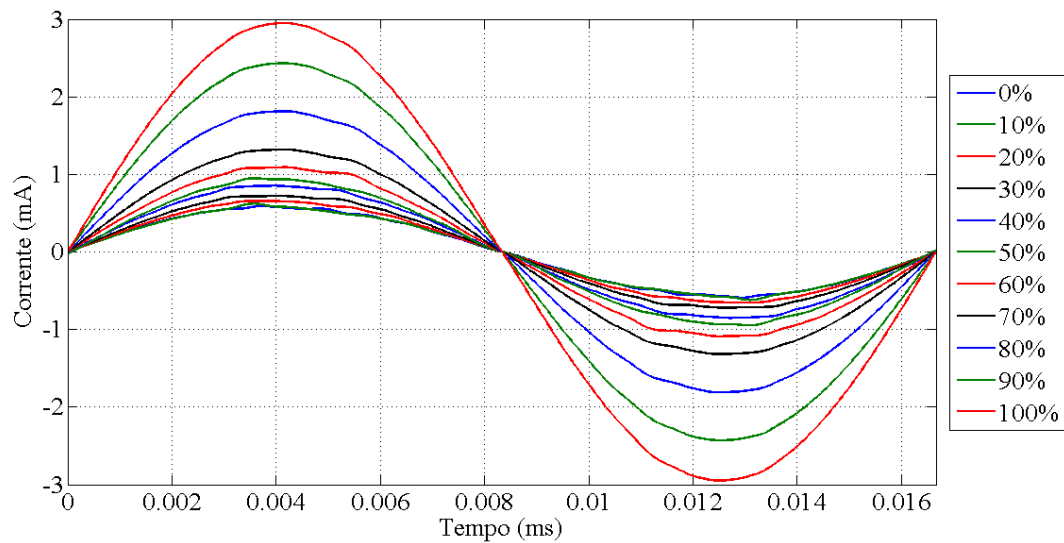
## 5.2 SIMULAÇÕES DE CORRENTE DE FUGA

Conforme pode ser visto na metodologia apresentada na seção 4.2.2. As simulações foram realizadas para diferentes níveis de poluição e analisaram o efeito da poluição na superfície do isolador, nas três condições de umidade possíveis (seco, úmido, saturado) a uma taxa de crescimento de 10%, sentido ferragem corpo isolante.

### 5.2.1 ISOLADOR SATURADO

Na inserção das propriedades dos materiais, utilizou-se os valores para a poluição ambiente e limo saturados, conforme Tabela 4.1. Os sinais de corrente de fuga do isolador saturado, variando-se a camada de limo a uma taxa de crescimento de 10%, sentido ferragem corpo isolante, são apresentados na Figura 5.14.

Figura 5.14: Simulação isolador saturado.



Fonte: Próprio autor.

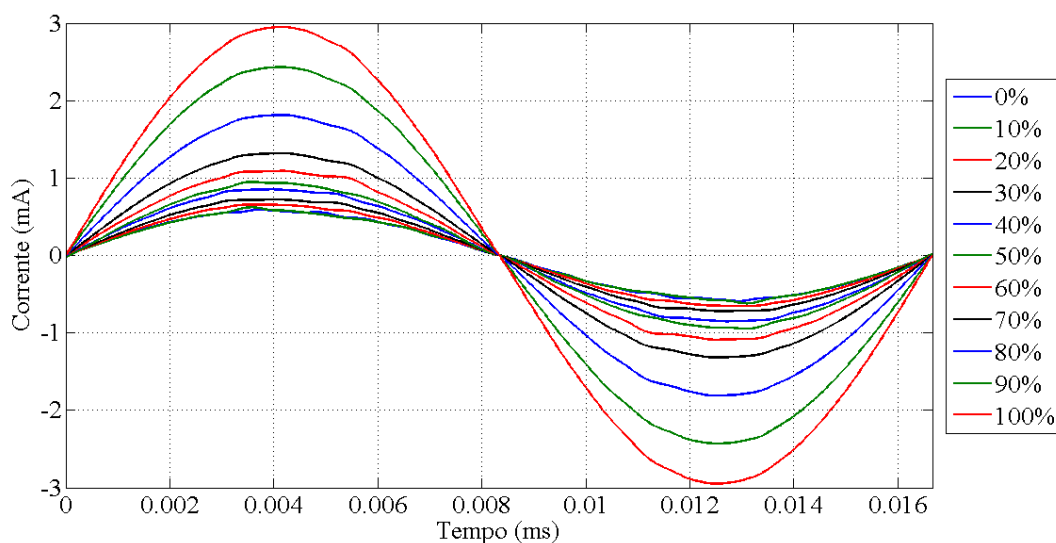
Os resultados mostraram que foi possível simular uma camada de poluição com espessura de 2 mm, variando-se o crescimento da camada de poluição. No trabalho foi apresentado e analisado os efeitos da camada variando de 0% a 100%, em uma taxa de 10%. Os resultados comprovaram que a metodologia e a física escolhida estão adequadas e representaram com fidelidade os sinais de corrente de fuga de um isolador saturado.

Quando se analisa os gráficos e os valores de pico das simulações de corrente de fuga, observa-se que a corrente se eleva conforme a camada de limo cresce. Observa-se também que a variação da área coberta que proporcionou a maior elevação foi entre 80% e 90%, de 2,02 mA a 2,96 mA correspondendo a um aumento de 46,5%.

### 5.2.2 ISOLADOR ÚMIDO

Na inserção das propriedades dos materiais, utilizou-se os valores para a poluição ambiente e limo úmidos, conforme Tabela 4.1. Os sinais de corrente de fuga do isolador úmido, variando-se a camada de limo a uma taxa de crescimento de 10%, sentido ferragem corpo isolante, são apresentados na Figura 5.15.

Figura 5.15: Simulação isolador úmido.



Fonte: Próprio autor.

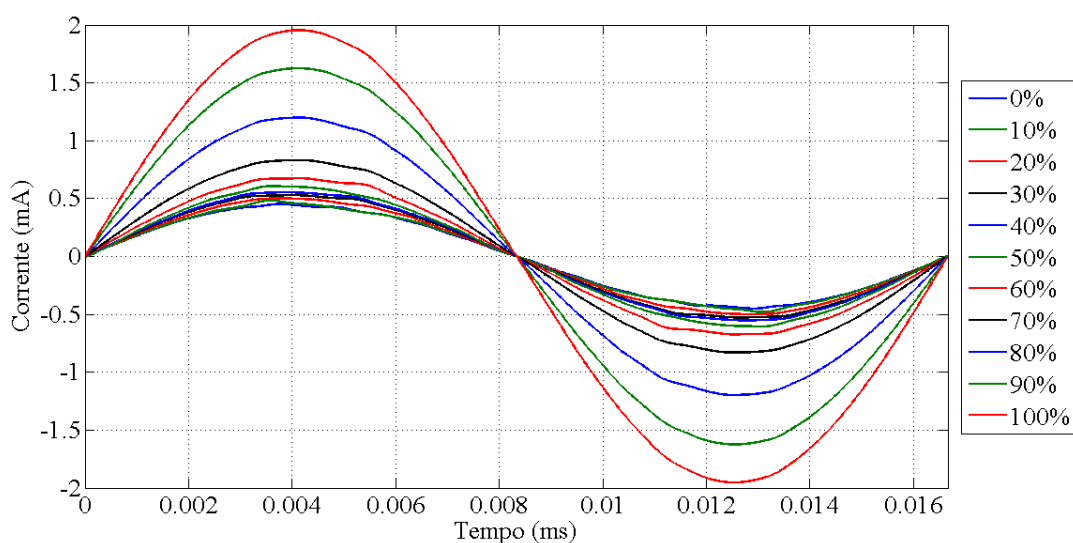
Os resultados mostraram que foi possível simular uma camada de poluição com espessura de 2 mm, variando-se o crescimento da camada de poluição. No trabalho foi apresentado e analisado os efeitos da camada variando de 0% a 100%, em uma taxa de 10%. Os resultados comprovaram que a metodologia e a física escolhida estão adequadas e representaram com fidelidade os sinais de corrente de fuga de um isolador úmido.

Quando se analisa os gráficos e os valores de pico das simulações de corrente de fuga, observa-se que a corrente se eleva conforme a camada de limo cresce. Observa-se também que a variação da área coberta que proporcionou a maior elevação foi entre 70% e 80%, de 1,31 mA a 1,81 mA correspondendo a um aumento de 38,1%.

### 5.2.3 ISOLADOR SECO

Na inserção das propriedades dos materiais, utilizou-se os valores para a poluição ambiente e limo secos, conforme Tabela 4.1. Os sinais de corrente de fuga do isolador seco, variando-se a camada de limo a uma taxa de crescimento de 10%, sentido ferragem corpo isolante, são apresentados na Figura 5.16.

Figura 5.16: Simulação isolador seco.



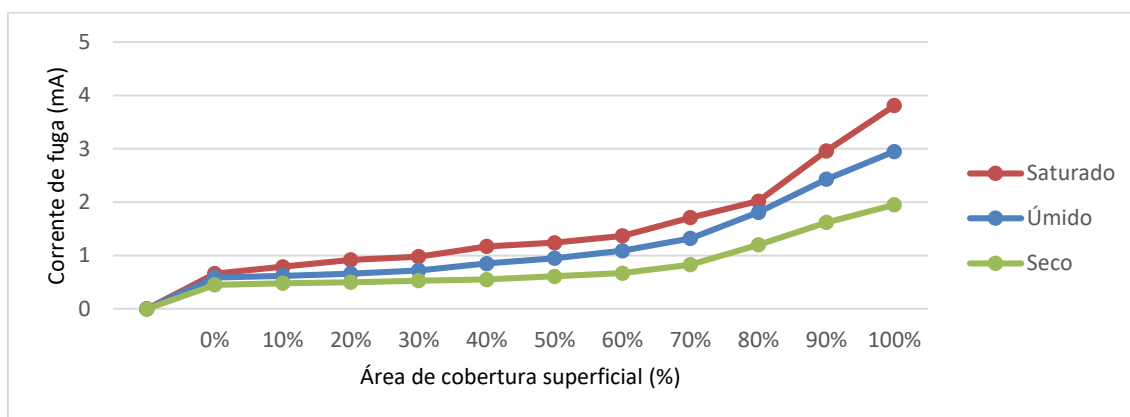
Fonte: Próprio autor.

Os resultados mostraram que foi possível simular uma camada de poluição com espessura de 2 mm, variando-se o crescimento da camada de poluição. No trabalho foi apresentado e analisado os efeitos da camada variando de 0% a 100%, em uma taxa de 10%. Os resultados comprovaram que a metodologia e a física escolhida estão adequadas e representaram com fidelidade os sinais de corrente de fuga de um isolador seco.

Quando se analisa os gráficos e os valores de pico das simulações de corrente de fuga observa-se que a corrente se eleva conforme a camada de limo. Observa-se também que a variação da área coberta que proporcionou a maior elevação foi entre 70% e 80%, de 0,83 mA a 1,19 mA correspondendo a um aumento de 43%.

Um gráfico que demonstra a elevação da corrente de fuga devido ao crescimento da poluição nas três condições de umidades estudadas pode ser observado na Figura 5.17.

Figura 5.17: Corrente de fuga do isolador simulado.



Fonte: Próprio autor.

Constata-se a partir do gráfico analisado que até 60% de área coberta, a corrente de fuga apresenta pequena variação, quando comparada com a corrente de fuga a partir de 60%. Para as três condições de umidade, a variação de 70% a 80% apresentou o maior crescimento da corrente de fuga, média de 42%.

Constatou-se também que com a elevação da umidade de seco para úmido a corrente de fuga aumentou em média 45%, considerando-se todos os percentuais de área coberta. Isso ocorre porque o limo seco possui pouca água em sua composição, quando comparado ao limo úmido. Por outro lado, a elevação da umidade de úmido para saturado causou o aumento médio da corrente de fuga de 27%, o que representa um aumento menor em relação ao anterior pois, neste caso, o limo já se encontra úmido.

Apresentados os resultados de simulação, pode-se concluir que o modelo representa adequadamente o fenômeno de corrente de fuga que ocorre na prática, é possível perceber que, tanto a condição ambiente, a qual o isolador está submetido, quanto a quantidade de poluição depositada na superfície isolante influenciam diretamente no desempenho do isolador.

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DE CORRENTE DE FUGA

Conforme pode ser visto na metodologia apresentada na seção. Após realizados os ensaios e simulações, os dados obtidos foram exportados para o Matlab<sup>®</sup>. Os dados adquiridos nos ensaios, sinais de tensão e corrente, foram utilizados para analisar o comportamento dos isoladores sob efeito da poluição. Os resultados das simulações, sinais de corrente, foram utilizados para reproduzir o efeito que ocorre na prática.



As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações foram utilizadas para avaliar a eficiência do processo da simulação, para tanto o coeficiente  $R^2$  foi aplicado, com o objetivo de quantificar a aderência entre as curvas obtidas por meio de medições e as curvas obtidas por meio de simulações, indicando, entre 0 e 1, o quanto o modelo consegue reproduzir os valores observados. Determinou-se adequado para essa pesquisa, valores de  $R^2$  superiores a 0,9.

Na seção a seguir são apresentados os resultados obtidos para os quatro grupos utilizados.

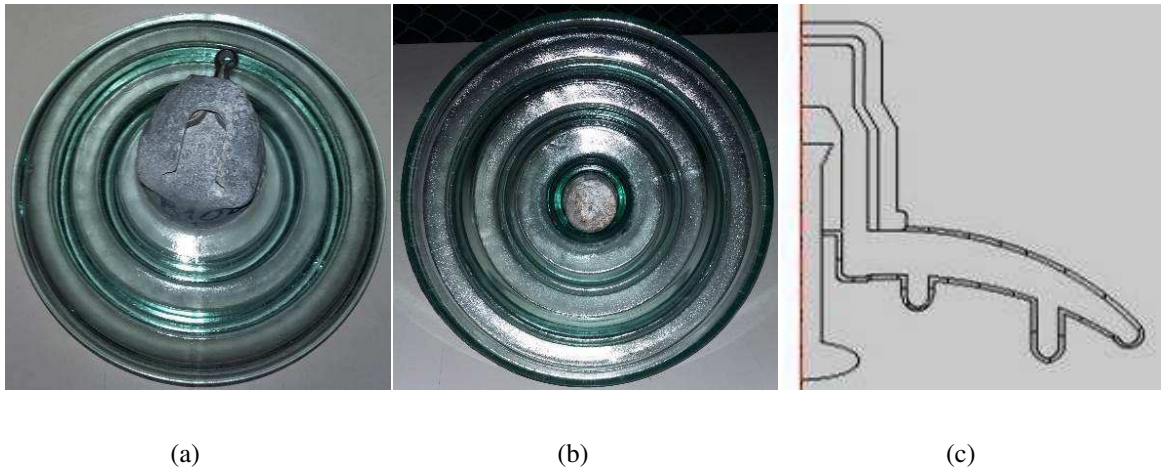
- Grupo I: Isolador limpo;
- Grupo II: ISO1, ISO2 e ISO5;
- Grupo III: ISO3 e ISO4;
- Grupo IV: ISO6.

Os resultados apresentados nas próximas seções são referentes ao primeiro isolador de cada grupo.

### 5.3.1 GRUPO I

Os resultados obtidos para o isolador limpo são apresentados: na Figura 5.18 (a) é possível observar a parte superior do isolador e na Figura 5.18 (b) é possível observar a parte inferior do mesmo. Considerando que é extremamente difícil que um isolador em campo opere totalmente limpo, a simulação foi executada a partir da modelagem correspondente à Figura 5.18 (c), em que a poluição ambiente foi emulada por uma camada de 2 mm exterior à superfície do isolador.

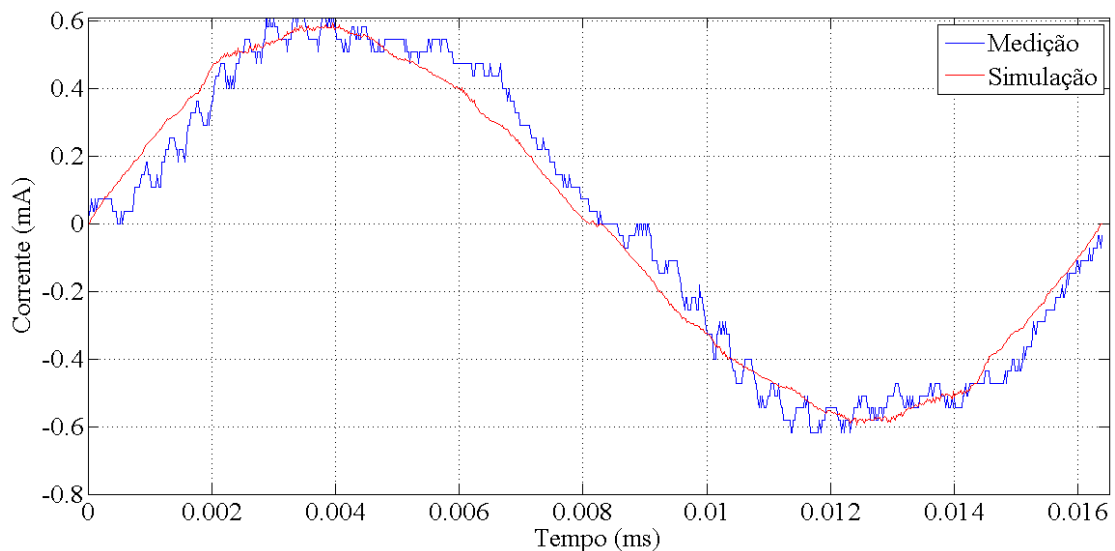
Figura 5.18: Isolador limpo (a) parte superior, (b) parte inferior e (c) desenho esquemático.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso do isolador limpo e saturado, são apresentadas na Figura 5.19. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9721$ .

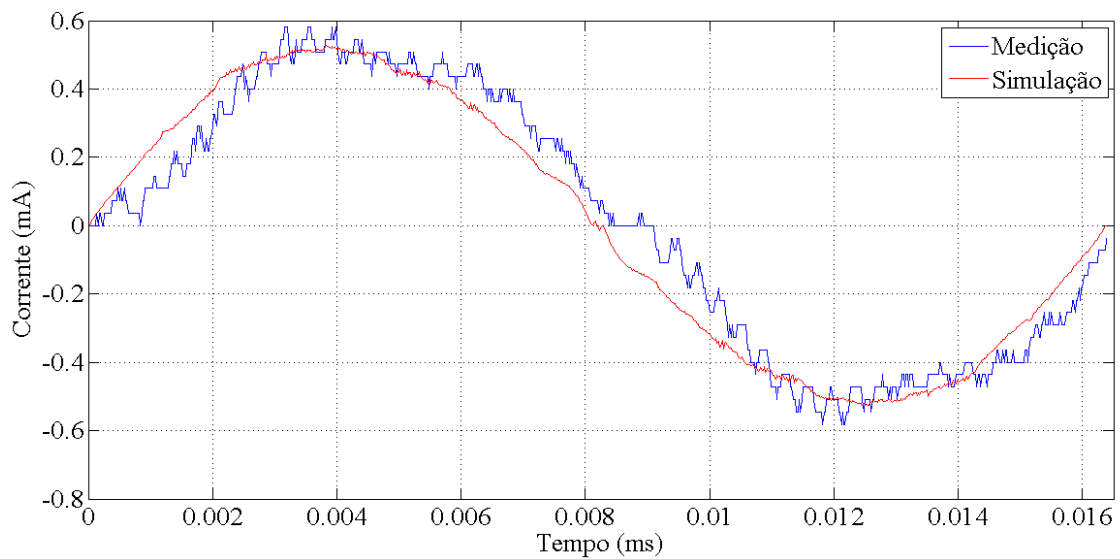
Figura 5.19: Correlação entre correntes de fuga isolador limpo e saturado.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso do isolador limpo e úmido são apresentadas na Figura 5.20. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9520$ .

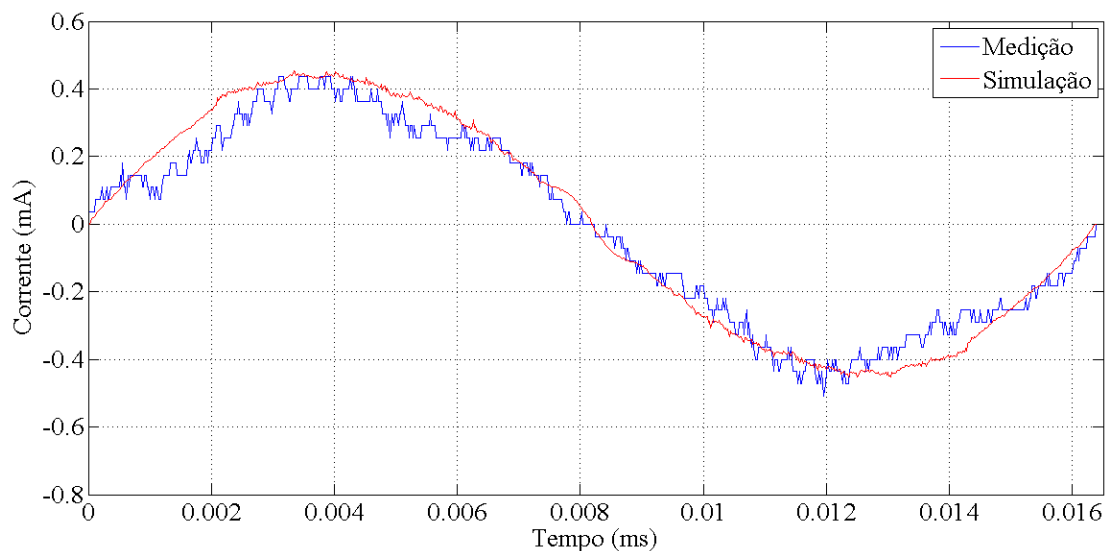
Figura 5.20: Correlação entre correntes de fuga isolador limpo e úmido.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso do isolador limpo e seco são apresentadas na Figura 5.21. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9574$ .

Figura 5.21: Correlação entre correntes de fuga isolador limpo e seco.



Fonte Próprio autor.

Constata-se a partir dos valores de  $R^2$  obtidos, que o método de estimação de corrente de fuga foi eficiente para o caso do isolador limpo.

### 5.3.2 GRUPO II

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os isoladores contaminados com limo, pertencentes ao grupo II. Na Figura 5.22(a) e na Figura 5.22(b) é possível observar a parte superior e inferior do isolador contaminado com limo. A simulação em ambiente computacional foi executada a partir da modelagem correspondente à Figura 5.22(c), em que a parte destacada em azul corresponde à superfície contaminada com limo em 60% da superfície do isolador. Esse valor foi escolhido pois apresentou maiores valores de  $R^2$  para todos os casos de umidade analisados.

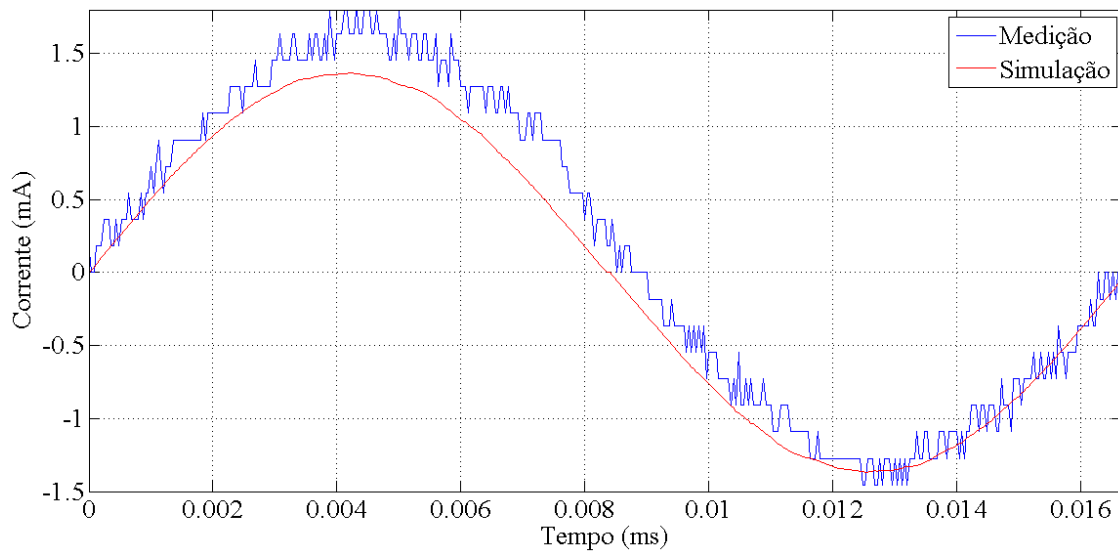
Figura 5.22: Isolador contaminado (a) parte superior, (b) parte inferior e (c) desenho esquemático.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso dos isoladores do grupo II saturados são apresentadas na Figura 5.23. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9250$ .

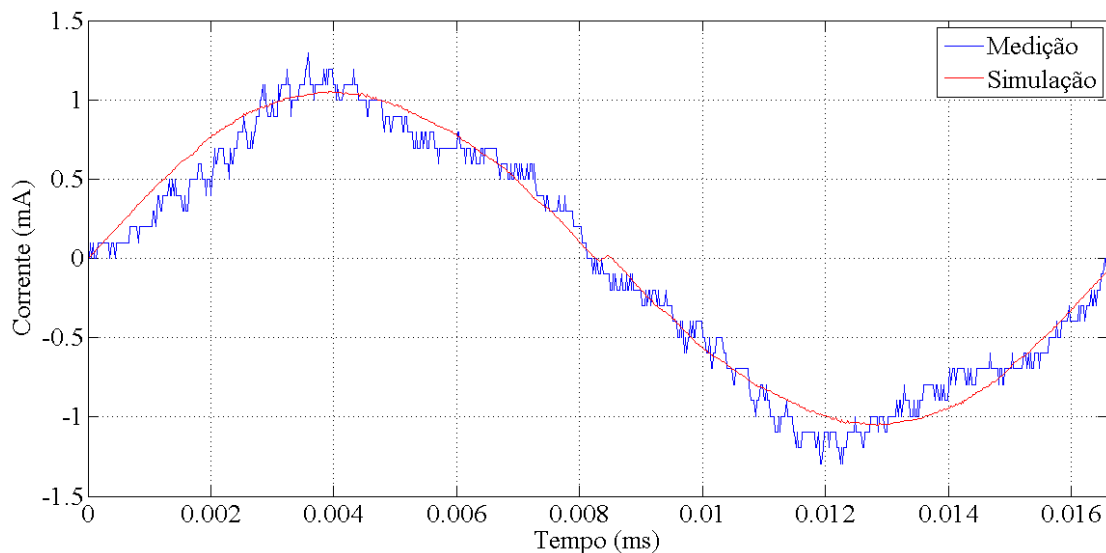
Figura 5.23: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e saturado



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso dos isoladores do grupo II úmidos são apresentadas na Figura 5.24. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9716$ .

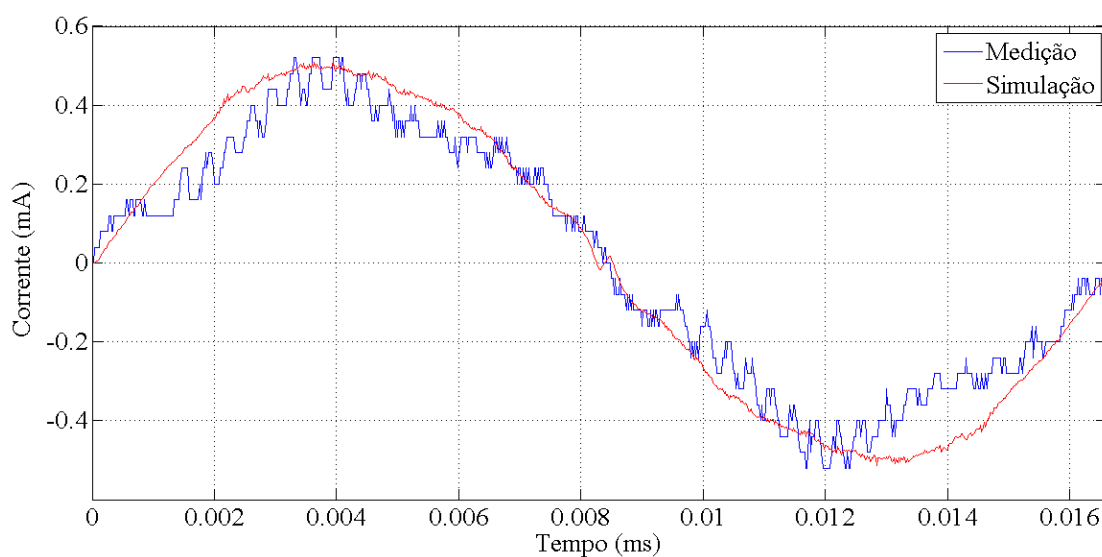
Figura 5.24: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e úmido.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso dos isoladores do grupo II secos são apresentadas na Figura 5.25. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9314$ .

Figura 5.25: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e seco.



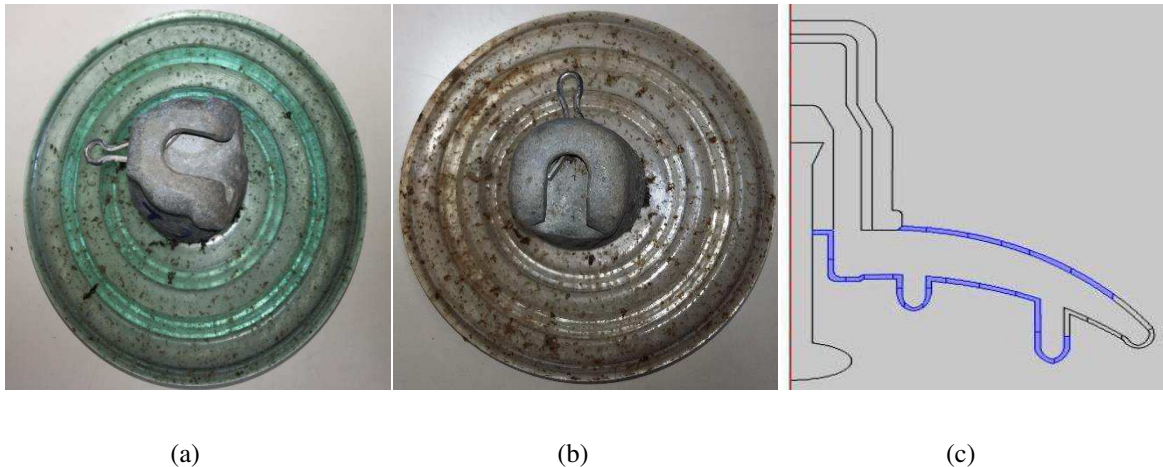
Fonte: Próprio autor.

Constata-se a partir dos valores de  $R^2$  obtidos que o método de estimação de corrente de fuga foi eficiente para o caso dos isoladores do grupo II.

### 5.3.3 GRUPO III

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os isoladores contaminados com limo, pertencentes ao grupo III. Na Figura 5.26(a) e na Figura 5.26(b) é possível observar os isoladores contaminados com limo. A simulação em ambiente computacional foi executada a partir da modelagem correspondente à Figura 5.26(c), em que a parte destacada em azul corresponde à superfície contaminada com limo em 70% da superfície do isolador. Esse valor foi escolhido pois apresentou maiores valores de  $R^2$  para todos os casos de umidade analisados.

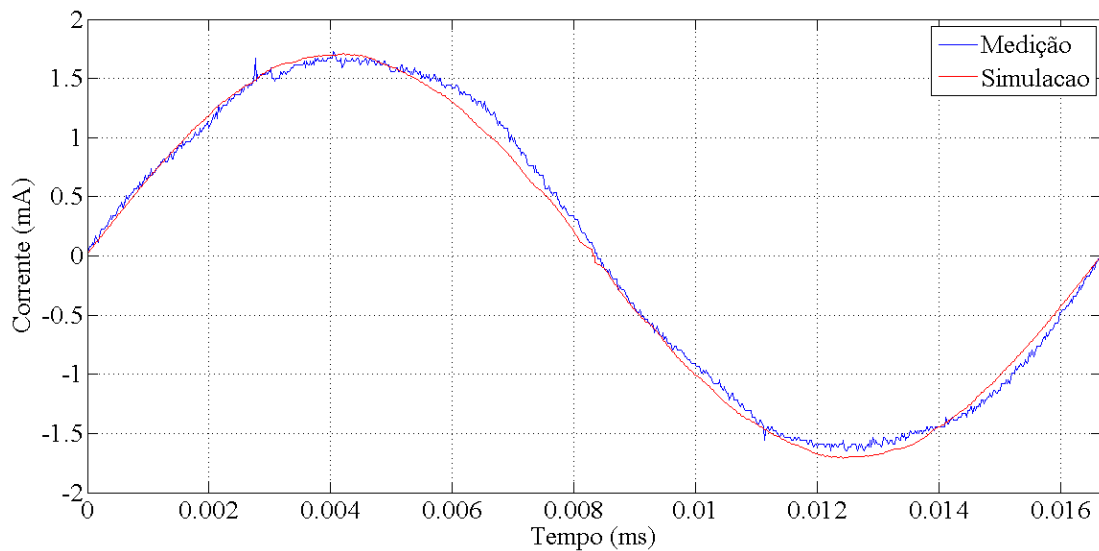
Figura 5.26: Isolador contaminado (a) parte superior, (b) parte inferior e (c) desenho esquemático.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações, para o caso dos isoladores do grupo III saturados são apresentadas na Figura 5.27. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9951$ .

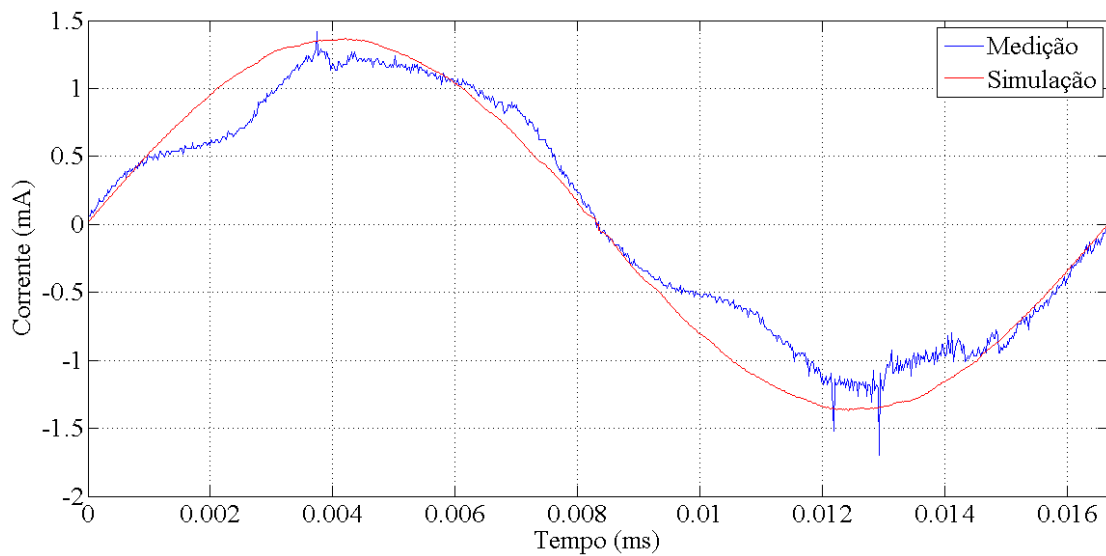
Figura 5.27: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e saturado.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações, para o caso dos isoladores do grupo III úmidos, são apresentadas na Figura 5.28. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9365$ .

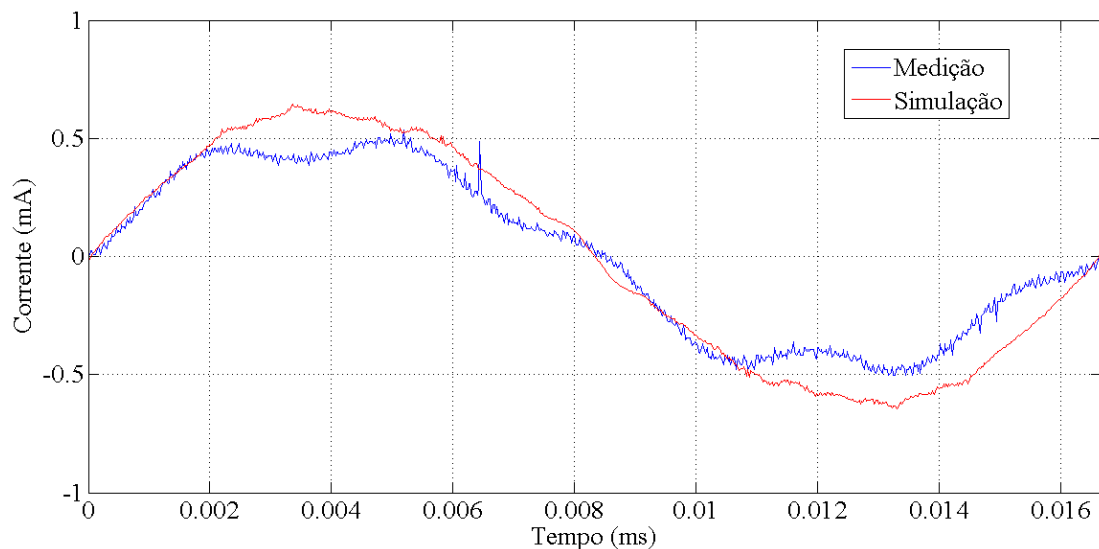
Figura 5.28: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e úmido.



Fonte: Próprio autor.

As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações, para o caso dos isoladores do grupo III secos, são apresentadas na Figura 5.29. O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,8794$ .

Figura 5.29: Correlação entre correntes de fuga isolador contaminado e seco.



Fonte: Próprio autor.

Constata-se, a partir dos valores de  $R^2$  obtidos, que o método de estimação de corrente de fuga foi eficiente para o caso dos isoladores do grupo III, com exceção da condição de seco.



#### 5.3.4 GRUPO IV

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os isoladores contaminados com limo, pertencentes ao grupo IV. Na Figura 5.30(a) e na Figura 5.30(b) é possível observar a parte superior e inferior do isolador contaminado com limo pertencente ao grupo IV.

Figura 5.30: Isolador contaminado (a) parte superior, (b) parte inferior.



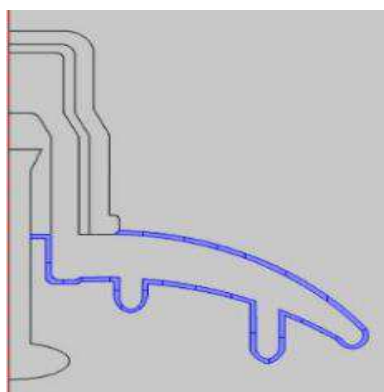
(a)

(b)

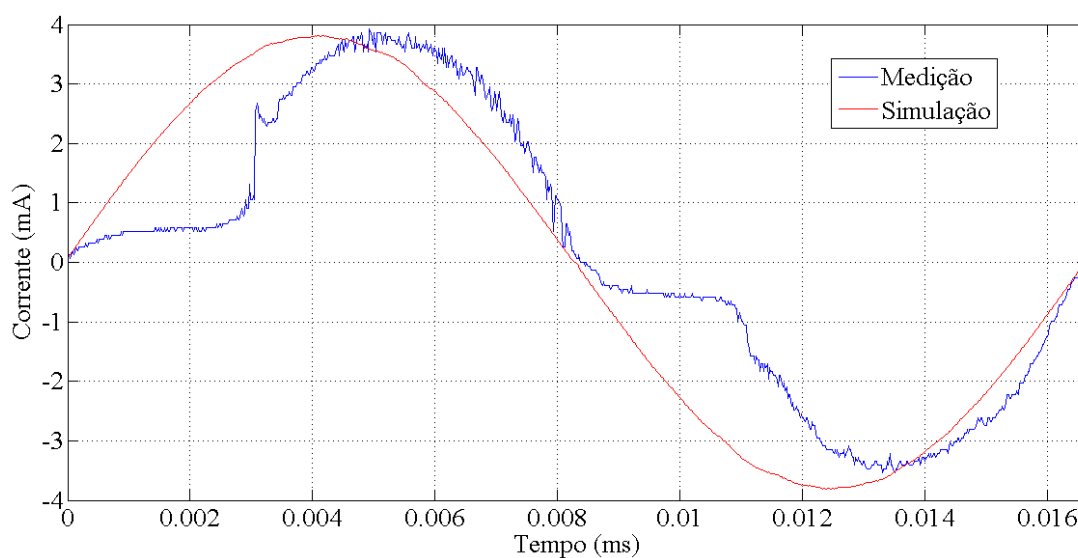
Fonte: Próprio autor.

A simulação em ambiente computacional para o isolador do grupo IV saturado foi executada a partir da modelagem correspondente à Figura 5.31(a) em que a parte destacada em azul corresponde a superfície contaminada com limo em 100% da superfície do isolador. Esse valor foi escolhido pois apresentou maiores valores de  $R^2$  para o caso do isolador saturado. As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações para o caso do isolador do grupo IV saturado, são apresentadas na Figura 5.31(b). O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2= 0,7512$ .

Figura 5.31: Correlação entre correntes de fuga isolador 6  
(a) modelagem utilizada na simulação e (b) saturado.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

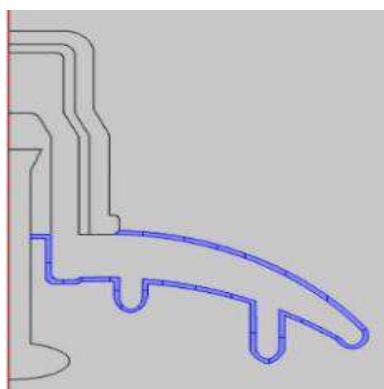
Na Figura 5.31 (b) foi constatado um efeito da distorção em que se apresenta uma forte não linearidade da corrente de fuga. Este fenômeno não ocorreu de forma tão acentuada nas medições anteriores com por pode ser observado nas Figuras 5.23, 5.24, 5.27 e 5.28. Quando se analisam ou se comparam as Figuras 5.22 (a), 5.26 (a) e 5.30(a), constata-se que para o caso IV a área coberta pelo limo é bem superior e que associada a umidade na condição saturada promoveu o efeito da não linearidade na corrente de fuga. As pesquisas realizadas por Gorur *et al.* (1999) também relatam aumento da corrente de fuga com as presenças de poluição e umidade.

As modelagens simuladas ainda não representam os efeitos não lineares da corrente de fuga com os altos índices de poluição e de umidade. Nos isoladores modelados anteriormente existiam regiões não preenchidas por limo, diferente desse caso. A região não contaminada com limo garante uma camada sem poluição, ou seja,

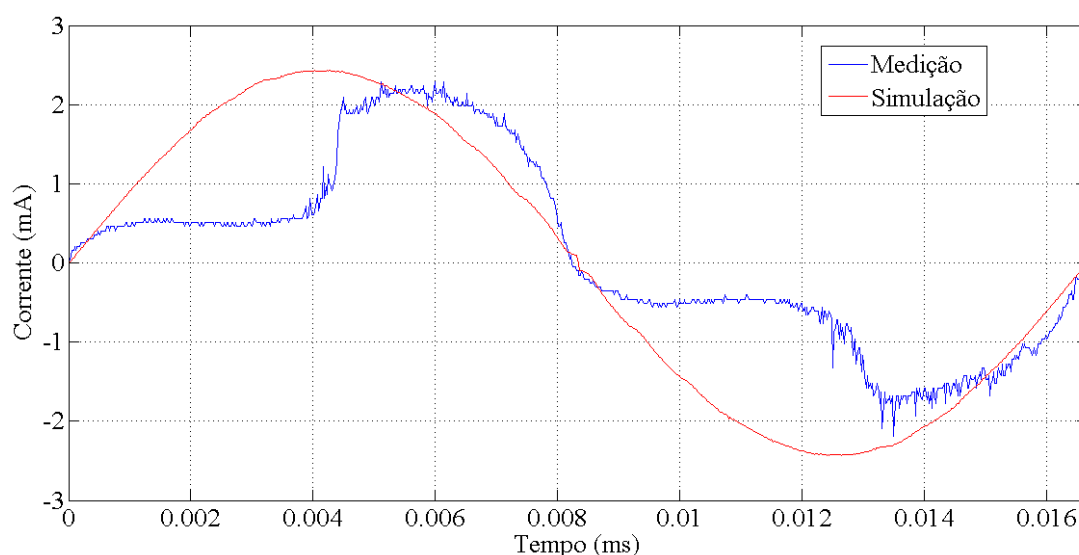
sem a influência do limo. Essa camada apresenta comportamento linear e de alta capacidade de isolamento, reduzindo níveis de corrente de fuga e garantindo linearidade entre a corrente e a tensão.

A simulação em ambiente computacional para o isolador do grupo IV úmido foi executada a partir da modelagem correspondente à Figura 5.32(a), em que a parte destacada em azul corresponde à superfície contaminada com limo em 100% da superfície do isolador. Esse valor foi escolhido pois apresentou maiores valores de  $R^2$  para o caso do isolador úmido. As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas simulações, para o caso do isolador do grupo IV úmido, são apresentadas na Figura 5.32(b). O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,2808$ .

Figura 5.32: Correlação entre correntes de fuga isolador 6  
(a) modelagem utilizada na simulação e (b) úmido.



(a)



(b)

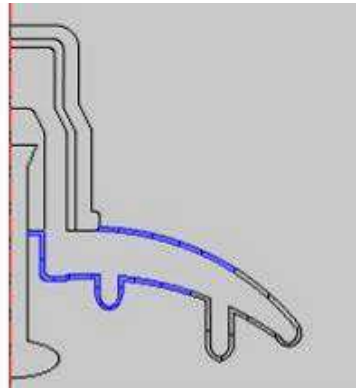
Fonte: Próprio autor.

As mesmas constatações realizadas em relação as distorções da forma de onda na Figura 5.31 (b), podem ser atribuídas também à esse caso, pois constata-se da mesma forma uma forte não linearidade da corrente de fuga. As distorções apresentadas nas formas de ondas da corrente de fuga do ensaio difere da forma de onda obtida por simulação, o que justifica o valor não adequado obtido para o coeficiente de determinação, isso ocorre pois as modelagens simuladas ainda não representam os efeitos não lineares da corrente de fuga com os altos índices de poluição e de umidade.

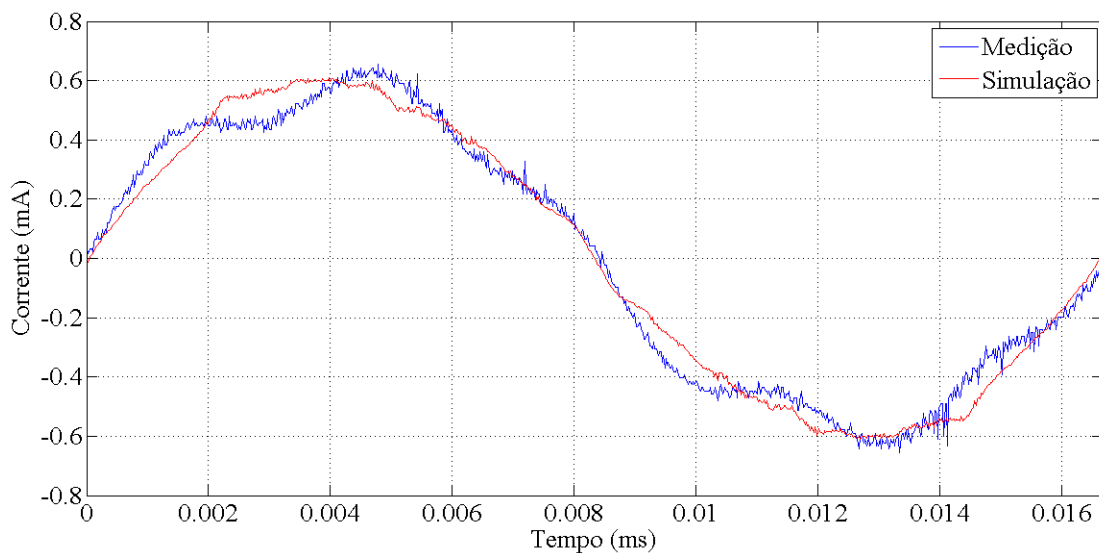
A simulação em ambiente computacional para o isolador do grupo IV seco foi executada a partir da modelagem correspondente à Figura 5.33(a) em que a parte destacada em azul corresponde à superfície contaminada com limo em 60% da superfície do isolador. Esse valor foi escolhido pois apresentou maiores valores de  $R^2$  para o caso do isolador seco. As amostras dos sinais obtidos nos ensaios e nas

simulações para o caso do isolador do grupo IV seco, são apresentadas na Figura 5.33(b). O coeficiente  $R^2$  foi empregado para avaliar a eficiência do processo da simulação, o que resultou no valor de  $R^2 = 0,9803$ .

Figura 5.33: Correlação entre correntes de fuga isolador 6  
(a) modelagem utilizada na simulação e (b) seco.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos para o grupo IV, pode-se concluir que o método de estimação da corrente de fuga não conseguiu representar em simulação os sinais de corrente de fuga obtidos em laboratório, tal fato pode ser atribuído ao estado de degradação do isolador, pois além de poluído o isolador apresentou pino corroído e cimento danificado, assim a corrente de fuga sofreu influência de mecanismos adicionais que se manifestaram, como descargas parciais e descargas corona que ocorrem devido ao estado de degradação do isolador. Na Tabela 5.1 pode-se avaliar os resultados, para todos os casos.

Tabela 5.1: Coeficiente de determinação  $R^2$  obtido para cada caso analisado.

Condição de Umidade	$R^2$			
	Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV
Saturado	0,9721	0,9250	0,9951	0,7512
Úmido	0,9520	0,9716	0,9365	0,2808
Seco	0,9574	0,9314	0,8794	0,9803

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que o método de estimação da corrente de fuga apresentou em sua maioria coeficientes de determinação superiores a 0,9, considerados adequados, com exceção do isolador pertencente ao grupo IV e do Grupo III na condição “seco”. Os coeficientes de determinação  $R^2$  referentes ao grupo IV não apresentaram valores adequados, pois as distorções apresentadas nas formas de ondas da corrente de fuga do ensaio difere da forma de onda obtida por simulação, isso ocorre pois as modelagens simuladas ainda não representam os efeitos não lineares da corrente de fuga com os altos índices de poluição e de umidade.

O isolador 6 apresenta alto grau de poluição, corrosão nas ferragens e cimento danificado, o que não foi modelado na simulação utilizada, pois considera-se o isolador em bom estado de operação. Logo, seria necessário a realização de novos estudos em relação à inserção de defeitos no isolador simulado, de forma a aprimorar o método para estes casos.

O Capítulo 6, apresentado a seguir, trata da conclusão e das considerações finais relacionadas à pesquisa.

## 6. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi propor um modelo computacional para a estimação de corrente de fuga de isoladores contaminados por limo, esse objetivo foi alcançado a partir do desenvolvimento de simulações em ambiente computacional que permitiram obter a corrente de fuga para diferentes condições de umidade e intensidades de área de contaminação sob a superfície isolador.

Os resultados mostraram que foi possível variar o crescimento da camada de poluição em todos os níveis. Foi possível simular uma camada de poluição com espessura de 2 mm. No trabalho foi apresentado e analisado os efeitos da camada variando de 0% a 100% sobre a superfície do isolador, em uma taxa de 10%.

A eficiência do processo (metodologia e física) da simulação foi avaliada por meio da aplicação do coeficiente de determinação  $R^2$  que quantificou a aderência entre os sinais de corrente de fuga obtidos, por meio de experimentos e simulações.

Na comparação constatou-se que o coeficiente de determinação  $R^2$  foi superior a 0,92, quando se têm isolador limpo e isoladores contaminados com limo. A exceção consistiu em um caso no Grupo III e o isolador 6, pertencente ao Grupo IV, o qual, além de poluído com limo, apresenta estado de degradação elevado.

Constatou-se um efeito da distorção da corrente de fuga no caso mais crítico de poluição, tal fator é atribuído a alta condutividade do limo que causa a não linearidade entre os sinais de corrente de fuga e de tensão aplicada no isolador.

Os resultados das simulações norteiam a possibilidade de estimar valores de corrente de fuga de isoladores em campo através da comparação da área da cobertura superficial da poluição nos isoladores, possibilitando a criação de uma nova técnica de inspeção não invasiva.

Por fim, foi possível constatar que os valores das correntes de fuga obtidos nas simulações concordam com os valores obtidos em pesquisas, realizadas por outros autores. Sendo possível verificar que existe, novamente, uma correlação entre a corrente de fuga e a quantidade de limo depositada na superfície dos isoladores em diferentes condições de umidade.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa trabalhos relacionados ao tema foram submetidos para publicação e encontram-se listados no anexo.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nas próximas etapas da pesquisa, propõe-se:

- Analisar simulações em 3D baseadas em fotografias de um isolador real contaminado com limo de forma a aprimorar o método desenvolvido nesta pesquisa no auxílio do desenvolvimento de uma ferramenta de tomada de decisão;
- Realizar estudos relacionados aos efeitos de ionização dos isoladores causados pelo limo e por outros mecanismos de degradação do isolador e verificar como esses efeitos influenciam na distorção dos sinais de correntes de fuga;
- Associar a simulação da corrente de fuga e medição da corrente de fuga em laboratório a outras técnicas de inspeção, tais como a medição de ruído ultrassônico e ruídos eletromagnéticos, com o objetivo da determinação do intervalo ótimo de lavagem dos isoladores.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIN, M.; SALMAN, M. Aging of polymeric insulators (an overview). **Reviews on Advanced Materials Science**, v. 13, n. 2, p. 93–116, 2006.

ANDERSEN, O. W. **Finite element solution of complex potential electric fields**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 96, n. 4, p. 1156–1161, 1977.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa N°729 de 28 de Junho de 2016**. Disponível na internet via URL: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2016729.pdf>. Acesso em janeiro de 2017.

ARAUJO, J. F. **Análise Comparativa de Técnicas de Estimação de Harmônicos em Sistemas de Potência**. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

ARSHAD; NEKAHI, A; MCMEEKIN, S.G.; FARZANEH, M. **Effect of Pollution Severity Distribution along a Polymeric Insulator**. IEEE International Conference on the Properties and Application of Dielectric Materials, p. 612–615, 2015.

BARROS, R. M. R. **Determinação dos Esforços Eletromecânicos em Transformadores de Pôtença Causados por Correntes de *Inrush* Utilizando Simulações Multifísicas**. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

COLLIN, R. E. **Foudations for Microwave Engineering**, 2. ed., IEEE Press, 924 p. 2001.

COMSOL. **AC/DC Module User's Guide**, © COPYRIGHT 1994–2016 by COMSOL AB. All rights reserved.

COOWAR, P.; HOOLE, P. R. P. **Discharge Characteristics of Alga-ContaminatedString Insulators in the Tropics**. Electric Power Systems Research, v. 15, p. 215–218, 1988.

COX, D. R. **Regression models and llife tables (with discussion)** J. R. Ststist. Soc.

B34, 187-220, 1972.

DERNFALK, A.; GUBANSKI, S. **Techniques for estimation of biological contamination on insulators using image analysis**. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, p. 659–662, 2004.

DOMINGUES, E. S. **Improved Condition Monitoring of Composite Insulators**. Tese (PhD) - School of Electrical and Electronic Engineering. The University of Manchester, 2012.

ESKINAZI-LEÇA, E.; NEUMANN-LEITÃO, S.; COSTA, M. F. **Oceanografia um Cenário Tropical**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2004.

FERREIRA, T. V. **Estudo do Trilhamento de Núcleo em Isoladores Poliméricos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

FLEMMING, H. **Relevance of biofilms for the biodeterioration of surfaces of polymeric materials**. Polymer degradation and stability, v. 3910, n. 97, p. 309–315, 1998.

FLEMMING, H. C. **Biodeterioration of synthetic materials - A brief review**. *Materials and Corrosion*, v. 61, n. 12, p. 986–992, 2010.

FUCHS, R. D. **Transmissão de energia elétrica - linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Volume 1 ed. Rio de Janeiro: Itajubá, Livros Técnicos e Científicos, 1977.

GORUR, R. S.; CHERNEY, E. A.; BURNHAM, J. T. **Outdoor Insulators**. Phoenix, Arizona: Ravi S. Gorur, Inc, 1999.

GUBANSKI, S. M.; FERNANDO, M. A. R. M.; PIETR, S. J.; MATULA, J.; KYARUZI. **Effects of biological contamination on insulator performance**. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, v. 2, p. 797–801, 2000.

GUBANSKI, S. M.; KARLSSON, S.; FERNANDO, M. A. R. M. **Performance of biologically contaminated high voltage insulators**. International Conference on

Industrial and Information Systems, ICIS. August, p. 30–35, 2006.

GUEDES, C. P. G. **Classificação das Condições de Degradação de Isoladores Poliméricos pelos Níveis de Radiação UV e a Lógica Fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

HAMDAN, R. B. **Electric field study of silicon rubber insulator using finite element method (Slim)**. Dissertação (Master of Engineering) - Faculty of Electrical Engineering. Universiti Teknologi Malaysia, 2006.

HERNANZ, J. A. R.; MARTIN, J. J. C.; GOGESCOECHEA, J. M.; BELVER, I. **Z. Insulator pollution in transmission lines**. International Conference On Renewable Energies And Power Quality, p. 7, 2006.

IEC 60507. **Artificial pollution tests on high voltage insulators to be used on ac systems**. 1991

KHADEMI, M. M.; ARJOMAND, A.; SAEDPANAH, H. **Dynamic Calculation of Leakage Current and Electric Field of Distribution polymeric insulator under pollutions layer**. Iranian Electrical Power Distribution Conference, p. 173–178, 2015.

LEÓN, A. F.; ROJAS, H. E.; CANTOR, L. F.; PEREZ, C. D. **Performance of Ceramic and Polymeric Distribution Insulators with Mold Growth on its Surface**. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), p. 1–6, 2014.

MELLO, D. R.; ANGELINI, J. M. G; FRANÇA, F. R. R.; DUARTE, A. R. C. L.; PAIVA, R. S.; SOUSA, E. B.; LOBATO JR, I. C. **Research about the insulation performance of insulators due to slimes mitigation occurrence**. International Conference on High Voltage Engineering and Application, p. 109–112, 2008a.

MELLO, D. R.; ANGELINI, J. M. G; FRANÇA, F. R. R.; DUARTE, A. R. C. L.; PAIVA, R. S.; SOUSA, E. B.; LOBATO JR, I. C. **Avaliação de equipamentos de subestações e linhas de transmissão contaminados com limo**. Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, p. 1–10, 2008b.

MELLO, D. R.; ANGELINI, J. M. G; FRANÇA, F. R. R.; DUARTE, A. R. C. L.; PAIVA, R. S.; SOUSA, E. B.; LOBATO JR, I. C. **Avaliação de equipamentos de subestações contaminados com limo**. 20º Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, Brasil 2009.

MONTICELLI, A. & GARCIA, A. **Introdução aos Sistemas de Energia Elétrica**. Campinas: Ed da UNICAMP, 2003.

MORAES, L. A. **Análise do Comportamento Espectral de Isoladores em Linhas de Transmissão**. Trabalho de Conclusão de Curso - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

NAITO, K.; MATSUOKA, R.; SAKANISHI, K. **Investigation of the insulation performance of the insulator covered with lichen**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 3, p. 1634–1640, 1990.

NIGRI, A. I. **Desempenho de linhas de transmissão ponto de vista da manutenção**. Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, v. 15, 1999.

NÓBREGA, R. B. **Avaliação de uma Nova Carga na Composição de Revestimentos Externos Aplicados em Isoladores de Alta Tensão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande - PB.

NORRIE, D. H.; VRIES, G. **An Introduction to Finite Element Method**. London: Academic Press: [s.n.].

PHILLIPS, A. J.; KUFFEL, J.; BAKER, A.; BURNHAM, J.; CARREIRA, A.; CHERNEY, E.; CHISHOLM, W.; FARZANEH, M.; GEMIGNANI, R; GILLESPIE, A.; GRISHAM, T.; HILL, R.; SAHA, T; VANCIA, B.; YU, J. **Electric fields on AC composite transmission line insulators**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 23, n. 2, p. 823–830, 2008.

RAHMAN, R. A.; HARID, N.; HADDAD, A. **Stress control on polymeric outdoor insulators**. Universities Power Engineering Conference (UPEC), International, p. 4–7, 2010.

ROCHA, P. .H. V. **Classificação dos isoladores de vidro de alta tensão a partir do espectro eletromagnético irradiado**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2014.

ROJAS, H. E.; PEREZ, C. D.; LEON, A. F.; CANTOR, L. F. **Electrical performance of distribution insulators with chlorella vulgaris growth on its surface**. Ingeniería e Investigación, v. 35, p. 21–27, 2015.

SADIKU, M. N. O. **A simple introduction to finite element analysis of electromagnetic problems**. IEEE Transactions on Education, v. 32, n. 2, p. 85–93, 1989.

SADIKU, M. N. O. **Elementos do Eletromagnetismo**. Bookman (3ª ED). p.694. 2004.

SAGOSKIN, V. V.; ZAMOTRINSKAYA, E. A.; MIKHAILOVA, T. G.; NESTEROV, V. M.; SOLOVEV, V. I. **Methods for Determination of Conductivity and Dielectric Relaxation Parameters of Heterogeneous Semiconductor materials using Isolation Layers**. n. 6, p. 520–524, 1983.

SANTA TEREZINHA, I. **Catálogo de Isoladores Santa Terezinha**. Disponível em: <[http://www.cst-isoladores.com.br/portal/sites/default/files/CATALOGO OFICIAL CST.pdf](http://www.cst-isoladores.com.br/portal/sites/default/files/CATALOGO_OFICIAL_CST.pdf)>. Acesso em: 26 de maio de 2016.

SILVEIRA, S; BEZERRA, R. C; MENDES, J. M . **Soluções para Eliminação de Limo e Outros Materiais Característicos da Região Amazônica para Isoladores de Subestações da Regional de Transmissão do Pará**. Relatório Técnico Parcial (Mês 4). 2016.

SILVESTER, P. P. & FERRARI, R. L. **Finite Element for Electrical Engineers**. Cambridge University Press, 1983.

SEDIVER. **Sediver toughened glass suspension insulators catalog CSA / ANSI - Canada**. Disponível em: <[http://www.sediver.com/downloads/img\\_downloads\\_toughened\\_glass/pdf\\_glass/Catalogue\\_USA2008.pdf](http://www.sediver.com/downloads/img_downloads_toughened_glass/pdf_glass/Catalogue_USA2008.pdf)>. Acesso em: 26 de maio de 2016.

SILVA, L. C. **Recuperação dos Isoladores de Vidro das Linhas de Transmissão**

**Condenados por Corrosão e Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

SOUZA, A. . L.; LOPES, I. J. S. **Electric field distribution along the surface of high voltage polymer insulators and its changes under service conditions.** IEEE International Symposium on Electrical Insulation, v. 1, p. 56–59, 2006.

SOUZA, A. L.; LOPES, I. J. D. S. **Study of electric field enhancement along polymer insulators under service conditions.** 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, p. 759–764, 2010.

SUBBA REDDY, B.; SULTAN, N. A.; MONIKA P.M.; POOJA, B.; SALMA, O.; RAVISHANKAR, K.V.; **Simulation of potential and electric field for high voltage ceramic disc insulators.** International Conference on Industrial and Information Systems, p. 526–531, 2010.

SUBBA REDDY, B.; SATISH NAIK, B; KUMAR, U; SATISH, L. **Potential and Electric Field Distribution in a Ceramic Disc Insulator String with Faulty Insulators.** International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, p. 10–13, 2012.

VILAR, P. B.; COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V. **Electric Field and Partial Discharge Estimation in Polymeric Insulators Using Finite Element Method.** XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany.

VITELLI, M.; TUCCI, V.; PETRARCA, C. **Temperature distribution along an outdoor insulator subjected to different pollution levels.** IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 7, n. 3, p. 416–423, 2000.

VOSLOO, W. L.; MACEY, R. E.; TOURREIL, C. DE. **The Practical Guide to Outdoor High Voltage Insulators.** South Africa: Crown Publications, 2008.

## ANEXO

- a) Artigo em congresso internacional:

**Simulação Computacional dos Efeitos do Limo sobre Isoladores de Vidro**, dos autores: B. A. Dias, E. G. Costa, T. V. Ferreira, A. D. Germano, K. B. Brito, L. A. Barbosa, A. I. da Silva Neto, R. C. Bezerra, S. Silveira, R. S. Paiva, D. R. Mello. In: XVII Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré (ERAC), a ser realizado em Cidade del Este, Paraguai em maio de 2017.

- b) Resumo em congresso internacional:

**Impact Analysis of Biological Pollution on Glass Insulators**, dos autores: B. A. Dias, E. G. Costa, T. V. Ferreira, A. D. Germano, K. B. Brito, L. A. Barbosa, A. I. da Silva Neto, R. C. Bezerra, S. Silveira, R. S. Paiva, D. R. Mello. In: International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), a ser realizado em Buenos Aires, Argentina em agosto de 2017.

**Analysis Method for Determination of the Optimal Washing Time of Insulators**, dos autores: B. A. Dias, E. G. Costa, T. V. Ferreira, A. D. Germano, K. B. Brito, L. A. Barbosa, A. I. da Silva Neto, R. C. Bezerra, S. Silveira, R. S. Paiva, D. R. Mello. In: International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), a ser realizado em Buenos Aires, Argentina em agosto de 2017.