



Universidade Federal
de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ANTONIO FRANCISCO LEITE NETO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ISOLADORES POLIMÉRICOS
SOB DEFEITO EXTERNO E POLUIÇÃO A PARTIR DO
MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**

Campina Grande, Paraíba.

Dezembro de 2019

ANTONIO FRANCISCO LEITE NETO

ANÁLISE COMPARATIVA DE ISOLADORES POLIMÉRICOS SOB DEFEITO EXTERNO E
POLUIÇÃO A PARTIR DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Jalberth Fernandes de Araújo, D. Sc.
Orientador

Pablo Bezerra Vilar, D. Sc.
Examinador

Campina Grande, Paraíba.

Dezembro de 2019

*Dedico este trabalho à minha mãe,
pessoa que por mim tudo fez.*

AGRADECIMENTOS

Primordialmente, agradeço à minha mãe Ivonete Leite Galvão, por disponibilizar todos os meios necessários para que o sonho de se tornar engenheiro eletricista fosse possível, com todo o aporte motivacional, emocional e financeiro.

Agradeço ao meu pai Sebastião Leite da Rocha e ao meu tio Horácio Leite Rocha, por todas as palavras de apoio durante essa jornada e por serem exemplos de perseverança.

Agradeço aos meus avós Antônio Francisco Leite e Lucinda Maria da Conceição, por serem o exemplo de vida a ser seguida e por me incentivarem sempre em busca da felicidade.

Agradeço ao meu irmão Thiago Leite Galvão e ao meu primo Carlos André Leite Cândido, pelo entusiasmo e harmonia no decorrer de toda a minha existência.

Agradeço aos colegas de curso Cícero Rômulo, Augusto César, Luan Balbino, Rodrigo Kalil, Breno Sant'Anna e Egydio Tadeu, pela convivência durante esses cinco anos de curso e por juntos formarmos um time que sempre pôde superar os obstáculos que eram impostos pela dificuldade do curso.

Agradeço a João Pedro da Costa Souza, por se fazer presente na confecção deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço ao professor Jalberth Fernandes de Araújo, por aceitar orientar um aluno tão persistente e por todos os ensinamentos oferecidos durante a graduação.

Por fim, agradeço a todos os amigos do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande, pelo companheirismo e ajuda diária. Em particular, destaco agradecimento ao até então mestre em engenharia elétrica, Bruno Albuquerque Dias e ao professor Edson Guedes da Costa, cujos ensinamentos foram fundamentais para o meu crescimento pessoal.

*“Em algum lugar, algo incrível
está esperando para ser
descoberto.”*

Carl Sagan

RESUMO

Este trabalho apresenta uma avaliação do campo elétrico e potencial em isoladores poliméricos sob diferentes condições de operação. As condições consideradas foram: isolador íntegro, com a presença de defeito externo e sob efeito de poluição. Desse modo, dois isoladores poliméricos de 138 kV foram modelados com auxílio de um *software* de simulação multifísica que emprega o Método dos Elementos Finitos. Uma fina camada condutiva foi modelada na superfície dos isoladores, a fim de investigar a influência da poluição no seu comportamento elétrico. O defeito externo, por sua vez, é representado por um furo que contorna o isolador numa rotação de 360° e com profundidade suficiente para atingir a interface entre o revestimento e o núcleo. Nas simulações realizadas em isoladores poluídos, foi detectado que o isolador passa a ter uma característica resistiva, com picos de campo elétrico de baixa intensidade. Enquanto que as análises dos isoladores com defeitos evidenciaram que o campo elétrico sofre distorções, cuja intensidade é suficiente para provocar ionização do ar e ruptura elétrica. A partir dos resultados obtidos para cada isolador, foi possível observar as características elétricas das duas topologias de isoladores poliméricos e verificar qual topologia apresenta melhor desempenho elétrico.

Palavras-chave: Isoladores Poliméricos, Método dos Elementos Finitos, Campo Elétrico, Potencial Elétrico.

ABSTRACT

This work presents an evaluation of the electric field and potential in polymeric insulators under different operating conditions. The conditions considered were: intact isolator, with the presence of external defect and under the effect of pollution. Thus, two 138 kV polymeric insulators were modeled with the aid of a multiphysics simulation software that employs the Finite Element Method.. A thin conductive layer was modeled on the surface of the insulators in order to investigate the influence of pollution on their electrical behavior. The external defect, in turn, is represented by a hole that surrounds the insulator in a 360 ° rotation and deep enough to reach the interface between the sheath and the core. In simulations performed on polluted insulators, it was detected that the insulator has a resistive characteristic, with low intensity electric field peaks. While the analysis of defective isolators showed that the electric field is distorted, the intensity of which is sufficient to cause air ionization and electrical rupture. From the results obtained for each insulator, it was possible to observe the electrical characteristics of the two topologies of polymeric insulators and to verify which topology presents the best electrical performance.

Key-words: Polymeric Insulators, Finite Element Method, Electric Field, Electrical Potential.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MEF	Método dos Elementos Finitos
FRP	Bastão de Fibra de Vidro Reforçada
HTV	Borracha de Silicone Vulcanizada à Alta Temperatura
RTV	Borracha de Silicone Vulcanizada a Temperatura Ambiente
EPDM	Borracha Etileno-Propileno-Dieno do Tipo Polimetileno
EPR	Borracha Etileno-Propileno
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
LAT	Laboratório de Alta Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

E	Vetor Campo Elétrico
V	Potencial Elétrico
ρ_v	Densidade Volumétrica da Carga
ϵ	Permissividade
∇	Operador Nabla
∂	Derivada Parcial
kV	Quilovolt
A	Ampère
W	Watt

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Isolador de Vidro em Operação.	17
Figura 2 - Isoladores Poliméricos.	18
Figura 3 - Partes Constituintes de um Isolador Polimérico.....	20
Figura 4 - Isolador Polimérico Tipo Pino.	21
Figura 5 - Isolador Polimérico Tipo Pilar.	21
Figura 6 – Isoladores Poliméricos de Suspensão.	22
Figura 7 - (a) Isolador Polimérico Poluído e (b) Linha de Transmissão Próximo a Vegetação Abundante.	23
Figura 8 - Aletas Cortadas em Isoladores Retirados de Operação.	24
Figura 9 - Tiros em Aletas de Isoladores Poliméricos.	24
Figura 10 - (a) Fissura, (b) Perfuração e (c) Corte Profundo.	25
Figura 11 - Trilhamento Elétrico em Isolador Polimérico.	25
Figura 12 – Discretização de Isolador Polimérico.	27
Figura 13 - Elemento Genérico de uma Malha.	28
Figura 14 - Amostras dos isoladores poliméricos utilizados.....	34
Figura 15 – (a) Modelo do Isolador 1 e (b) Modelo do Isolador 2.....	35
Figura 16 - (a) Ferragem Metálica; (b) Núcleo; (c) Revestimento Polimérico e (d) Ar.....	36
Figura 17 - Discretização do Terminal Fase de um Isolador Polimérico.	37
Figura 18 – Furo implementado no COMSOL e sua representação em 3D.....	38
Figura 19 - Configurações do Defeito Externo no Isolador 2.	39
Figura 20 - Representação da Camada Condutiva na Superfície do Isolador 2.	40
Figura 21 - Metodologia Utilizada para Determinar Parâmetros na Escolha de Isoladores.....	41
Figura 22 - Potencial Elétrico ao Longo do (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2	43
Figura 23 – Campo Elétrico ao Longo do (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2	44
Figura 24 - Linha Longitudinal Traçada em: (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2.	44
Figura 25 - Gráficos do Potencial Elétrico nos Isoladores 1 em (a) e Isolador 2 em (b).	45
Figura 26 - Gráficos do Campo Elétrico no (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2.	46
Figura 27 - Campo Elétrico ao Longo do Isolador para as Três Cavidades Localizadas em 10 mm.	47
Figura 28 - Campo Elétrico ao Longo do Isolador para Três Cavidades com Espessura de 1 mm.	49
Figura 29 - Todos os Casos Analisados para o Isolador 1 em (a) e Isolador 2 em (b).....	50
Figura 30 - Potencial Elétrico ao Longo da Linha Longitudinal.....	52
Figura 31 - Gráficos do Campo Elétrico com Presença de Poluição.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuições dos Trabalhos Citados na Revisão Bibliográfica	33
Tabela 2 - Descrição dos Isoladores que Foram Utilizados.	34
Tabela 3 - Constantes Físicas dos Materiais Constituintes do Isolador.	36
Tabela 4 - Casos de Estudo Submetidos a Simulações Computacionais.	38
Tabela 5 - Constantes físicas que caracterizam os níveis de poluição.	40
Tabela 6 - Valores de Campo Elétrico nas Bordas da Cavidade para Todos os Casos Simulados.	51
Tabela 7 - Corrente de Fuga e Potência Absorvida pelos Isoladores sob Poluição	54

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1	Objetivos	15
1.2	Organização do texto.....	16
2	Fundamentação Teórica.....	17
2.1	Isoladores Elétricos	17
2.1.1	Isoladores Poliméricos	18
2.1.1.1	Partes de um Isolador Polimérico	19
2.1.1.2	Tipos de Isoladores Poliméricos	21
2.1.1.3	Poluição em Isoladores Poliméricos	22
2.1.1.4	Defeitos Externos em Isoladores Poliméricos	23
2.2	Método dos Elementos Finitos (MEF)	26
2.2.1	Discretização.....	26
2.2.2	Equacionamento.....	27
2.2.3	Construção das Matrizes	28
2.2.4	Solução do Sistema de Equações	29
2.2.5	Visualização.....	30
3	Revisão Bibliográfica	31
3.1	Estado da Arte	31
4	Materiais e Métodos.....	34
4.1	Materiais.....	34
4.2	Métodos.....	35
4.2.1	Simulações Computacionais	35
4.2.1.1	Modelo do Isolador.....	35
4.2.1.2	Propriedade dos Materiais	35
4.2.1.5	Modelagem da Poluição	39
4.2.2	Procedimentos Utilizados para Obtenção dos Resultados.....	40
5	Resultados e Análises	43
5.1	Isoladores Íntegros	43
5.2	Defeito Externo	47

5.3	Poluição.....	51
5.4	Análise Comparativa dos Isoladores 1 e 2.....	55
6	Conclusões.....	56
6.1	Trabalhos Futuros.....	57
6.2	Publicações.....	57
	Referências	58

1 INTRODUÇÃO

As interrupções no fornecimento de energia elétrica causam transtornos e prejuízos aos consumidores industriais, comerciais e residenciais. As interrupções também acarretam prejuízos às empresas concessionárias, tanto financeiro como à imagem. Os prejuízos financeiros são decorrentes da perda de faturamento e por multas que são aplicadas pelos órgãos reguladores.

Uma das principais causas de interrupções, programadas ou não programadas, está associada ao desempenho dos isolamentos do sistema elétrico. Para o caso dos sistemas de transmissão e distribuição, o isolamento elétrico entre os condutores e as torres é realizado principalmente por equipamentos denominados isoladores elétricos (NIGRI, 1999; BEZERRA, 2004; GOMES *et al.*, 2013).

O bom funcionamento dos isoladores constitui um dos principais fatores na qualidade e confiabilidade da transmissão e distribuição de energia elétrica, de maneira que a condição desses equipamentos é foco de diversos estudos na área de sistemas elétricos, especialmente no que concerne a isoladores poliméricos (AOUABED *et al.*, 2010; KHALED *et al.*, 2016; GORUR *et al.*, 1999).

Desde a década de 80, isoladores poliméricos vem gradativamente substituindo isoladores cerâmicos (vidro e porcelana) em razão de diversas vantagens, como menor peso e custo. Entretanto, desvantagens como a difícil detecção de falhas em seu interior e a carência de informações relativas ao processo de envelhecimento de materiais poliméricos, fomentam a necessidade de investigações aprofundadas para reduzir a possibilidade de falha do componente (MARTINS, 2015; PUSHPA; VASUDEV, 2017).

Atualmente, existem diversas técnicas de inspeção, monitoramento e diagnóstico de isoladores poliméricos, como por exemplo: inspeção visual, medição de corrente de fuga, radiação ultravioleta, radiação infravermelha e campo elétrico. A técnica mais utilizada em campo é a de inspeção visual, comumente empregada na detecção de isoladores poliméricos com defeitos externos (DOMINGUES, 2012).

O cálculo e a medição de campo elétrico são ferramentas auxiliares na identificação e na detecção da presença de possíveis irregularidades em isoladores poliméricos (DINIZ, 2019a). A presença de defeitos na constituição do isolador pode provocar a ocorrência de descargas parciais ou superficiais e o corona, dependendo da sua intensidade. Assim, a determinação das intensidades do campo elétrico e seus efeitos

podem ser previstos por meio de simulações de cálculo de campo elétrico e de potencial.

Uma abordagem comum para análise de campo elétrico em equipamentos é a utilização de simulações computacionais a partir do Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é um método numérico utilizado para encontrar soluções aproximadas para problemas complexos, subdividindo-os em vários problemas menores, discretos e correlacionados entre si (FERREIRA, 2007). A partir de simulações computacionais e utilização do MEF, é possível analisar a distribuição de campo elétrico no decorrer de um isolador, quando ele se encontra íntegro, com defeito externo e sob o efeito de poluição.

Desse modo, este trabalho tem como objetivo avaliar os impactos da inserção de poluição e defeito externo (núcleo exposto) em isoladores poliméricos de 138 kV, avaliando duas topologias de distintos fabricantes. Com isso, será possível estabelecer parâmetros (campo elétrico e potencial) para que se estabeleça uma análise comparativa entre os isoladores, bem como determinar qual isolador apresenta melhor desempenho elétrico.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estabelecer uma análise comparativa do desempenho elétrico de isoladores poliméricos com a presença de defeito externo e sob o efeito de poluição. Para tanto, foi considerado dois isoladores, de diferentes fabricantes, com classe de tensão de 138 kV.

Para atingir o objetivo geral proposto, esse texto possui os seguintes objetivos específicos:

- Analisar a distribuição de potencial e campo elétrico em isoladores poliméricos, cuja classe de tensão é 138 kV;
- Comparar o desempenho dos isoladores frente à aplicação de poluição;
- Comparar o comportamento dos isoladores na presença de defeito externo;
- Verificar quais isoladores apresentam melhor desempenho diante de poluição e defeito externo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo a introdução.

- No capítulo 2 apresenta-se a Fundamentação Teórica do tema proposto neste trabalho.
- No capítulo 3 é realizada a Revisão Bibliográfica, sendo analisado os trabalhos mais relevantes relacionados ao tema.
- Os Materiais e Métodos são descritos no Capítulo 4.
- No capítulo 5 são apresentados os Resultados e a sua discussão.
- No capítulo 6 é exposta a Conclusão da pesquisa, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

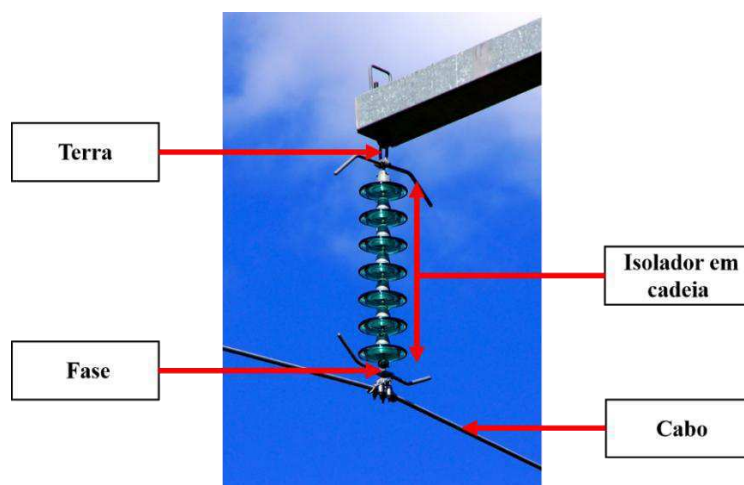
Neste capítulo será apresentada a Fundamentação Teórica necessária para a compreensão da pesquisa abordada no presente texto.

2.1 ISOLADORES ELÉTRICOS

O isolamento das linhas aéreas de transmissão e distribuição ocorrem por meio do ar atmosférico e por isoladores elétricos. Isoladores são responsáveis por prover sustentação mecânica aos condutores, além de proporcionar isolamento elétrico entre condutores submetidos a diferentes potenciais elétricos e as partes aterradas do sistema (GORUR *et al.*, 1999).

Além disso, os isoladores possuem forma geométrica tal que as linhas de força do campo elétrico no interior e na sua superfície se distribuam com maior homogeneidade, o que garante ao isolador uma maior rigidez dielétrica. E, ainda, seu formato com aletas (saias) limita a corrente de fuga sobre a superfície, dificultando a ocorrência dos curtos-circuitos ocasionados por arcos elétricos (BONOMO, 2003). Na Figura 1 é representado um isolador em operação, em que é possível observar a separação existente entre o terminal fase e o terra, bem como seu formato geométrico com a presença de aletas.

Figura 1 - Isolador de Vidro em Operação.



Fonte: Adaptado de *NEEDPIX* (2019).

Os isoladores devem ter capacidade de operar em condições normais, ou seja, sob a tensão nominal do sistema ao qual estão acoplados e com suportabilidade frente as adversidades que são impostas pelo meio, tais como: chuva, poluição e temperaturas elevadas. Desse modo, os isoladores devem suportar as sobretensões de descargas atmosféricas e os surtos de manobra, que por sua vez oferecem maior estresse elétrico ao meio dielétrico.

Adicionalmente, as superfícies dos isoladores devem possuir uma estrutura superficial capaz de resistir bem as exposições do tempo, mesmo em atmosfera de elevado grau de poluição. Os materiais comumente empregados para a fabricação de isoladores são a porcelana vitrificada, o vidro temperado ou materiais orgânicos isolantes, tais como os polímeros (LOPES, 2016).

2.1.1 ISOLADORES POLIMÉRICOS

Desde a década de 1950, os isoladores cerâmicos vêm sendo utilizados em linhas de transmissão e distribuição com desempenho satisfatório (ROCHA, 2019). Os isoladores poliméricos, representado na Figura 2, tem sido utilizado em linhas de transmissão desde a década de 80, quando as primeiras versões foram desenvolvidas (COSTA *et al.*, 2009).

Figura 2 - Isoladores Poliméricos.



Fonte: MAURIZIO (2019).

Atualmente, o uso de isoladores poliméricos em instalações de alta tensão é amplamente empregado, substituindo os convencionais isoladores de vidro e porcelana. Este fato ocorre devido a diversas vantagens, tais como (DINIZ, 2019b):

- Resistência a impactos mecânicos;
- Peso inferior aos isoladores cerâmicos;
- Boa resistência a contaminação externa;
- Facilidade em executar tarefas de manutenção;
- Apresenta baixo custo no mercado de isoladores;
- Resistência ao vandalismo;
- Hidrofobicidade;
- Facilidade de instalação.

Ainda assim, os isoladores poliméricos apresentam algumas desvantagens, as principais são (MARTINS, 2015; ROCHA, 2019):

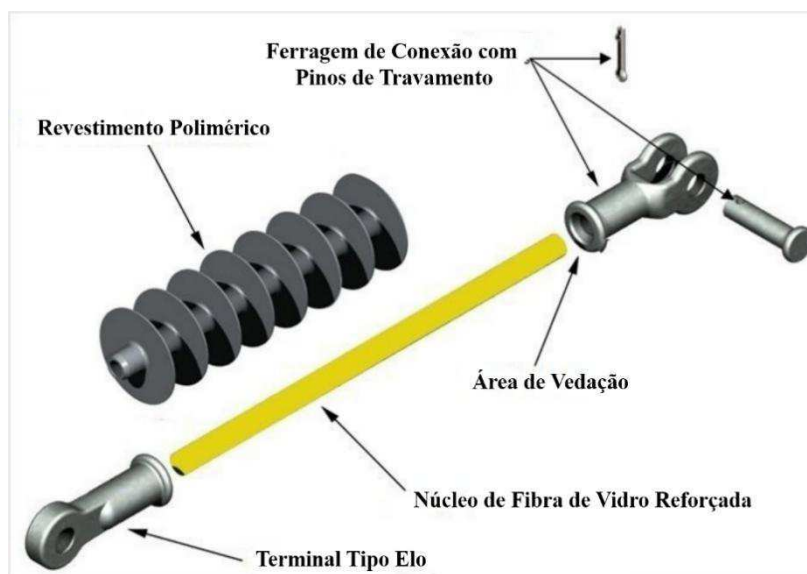
- Deterioração por trilhamento elétrico e erosão;
- Dificuldade para detecção de defeitos internos e externos;
- Dificuldade para avaliar a vida útil;
- Desconhecimento da confiabilidade a longo prazo.

As falhas em isoladores poliméricos têm diversas origens, sendo os mais comuns: defeitos de manufatura, trilhamento elétrico, erosão, embranquecimento do material polimérico, fissura, corona e defeitos de instalação.

2.1.1.1 PARTES DE UM ISOLADOR POLIMÉRICO

As partes constituintes de um isolador polimérico são: núcleo, revestimento polimérico e ferragens terminais. Estas podem ser observadas na Figura 3.

Figura 3 - Partes Constituintes de um Isolador Polimérico.



Fonte: Adaptado de RESEARCHGATE (2019).

O núcleo de um isolador polimérico é composto de uma haste de fibra de vidro reforçada (FRP – *Fiber Reinforced Plastic Rod*) e tem como função prover o suporte necessário aos esforços mecânicos provenientes do condutor. Além da fibra de vidro, o núcleo possui uma resina plástica, que pode ser de poliéster, vinil ou epóxi (NERI; 2005).

O revestimento polimérico do isolador envolve o núcleo e o protege contra agentes externos (umidade, radiação ultravioleta, poluição e etc.). As aletas também são partes constituintes do revestimento e proporcionam uma maior distância de escoamento, garantindo um bom desempenho em condições normais, principalmente sob umidade e contaminação externa (FERREIRA, 2007).

Ao longo dos anos, os fabricantes buscaram aperfeiçoar o revestimento do isolador polimérico, para isso utilizaram diversos materiais, como: teflon, resina epóxi, borracha de silicone vulcanizada à alta temperatura (HTV), borracha de silicone vulcanizada a temperatura ambiente (RTV), borracha etileno-propileno-dieno do tipo polimetileno (EPDM) e borracha etileno-propileno (EPR) (DINIZ, 2019b).

Já as ferragens terminais tem como função transmitir ao núcleo os esforços mecânicos do condutor, fazendo as interligações condutor para isolador e isolador para torre. O formato da ferragem é de grande importância, pois deve equalizar o campo elétrico em torno do mesmo, evitando possíveis descargas corona ou estresse elétrico do material (MENDONÇA, 2013).

2.1.1.2 TIPOS DE ISOLADORES POLIMÉRICOS

Os tipos mais comuns de isoladores poliméricos são: pino, pilar e suspensão. Os isoladores poliméricos tipo pino (Figura 4) são comumente utilizados em linhas de distribuição ou subtransmissão, possuindo em sua composição interna um furo rosqueado, que por sua vez é fixado a uma estrutura (cruzeta) por meio de pinos de aço. A Figura 4 apresenta um exemplo de isolador polimérico tipo pino.

Figura 4 - Isolador Polimérico Tipo Pino.



Fonte: Adaptado de VGSGROUP (2019).

Os isoladores tipo pilar (Figura 5) são pouco utilizados em linhas de transmissão, podendo ser construídos de uma peça única quando operam em tensões elevadas. Por meio do seu sistema de fixação, resistem a esforços mecânicos mais elevados, tanto de compressão como de flexão, o que torna sua aplicação eficiente em linhas de distribuição (STEFENON, 2015).

Figura 5 - Isolador Polimérico Tipo Pilar.



Fonte: ALLBIZ (2019).

Os isoladores tipo suspensão (Figura 6) são os que representam maior importância numa linha de transmissão. Quando polimérico, constitui-se de uma única peça, possuindo peso reduzido comparado aos equivalentes de vidro e porcelana. Nesse tipo de isolador, quanto maior o nível de tensão, maior será seu comprimento. Já o número e comprimento das aletas variam conforme o fabricante.

Figura 6 – Isoladores Poliméricos de Suspensão.



Fonte: ELO (2019).

2.1.1.3 POLUIÇÃO EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

A poluição ambiente compromete a eficiência e o desempenho dos componentes das linhas de transmissão. Na superfície dos isoladores, mesmo que íntegros, a poluição ocasiona redução da capacidade de isolamento. Para os isoladores poliméricos, a superfície hidrofóbica também pode ser impactada (ALBANO *et al.*, 2017).

De fato, as partículas de poluição em contato com a água formam eletrólitos capazes de degradar o material polimérico. Na prática, a combinação da poluição com neblina, chuva ou orvalho produz uma camada de umidade condutora, reduzindo a suportabilidade elétrica.

Além disso, a poluição proporciona ou intensifica a não uniformidade do campo elétrico, favorecendo a ocorrência de fenômenos como: descargas parciais internas, descargas parciais superficiais e trilhamento elétrico. Assim, a ocorrência destes fenômenos devido à poluição provoca degradações momentâneas ou permanentes nas

características elétricas dos isoladores, as quais afetam significativamente a operação do sistema elétrico e causam falhas (DIAS *et al.*, 2017; LOPES, 2016).

Problemas com poluição são encontrados frequentemente próximo a áreas industriais, costas marítimas, terras agrícolas, habitats de pássaros, desertos, regiões que nevam, áreas com proximidade a abundante vegetação. Com o rápido avanço da industrialização, os níveis de poluição tendem a aumentar cada vez mais em um futuro bem próximo. Por estas razões, se faz necessário selecionar isoladores que apresentem desempenho satisfatório sob poluição (SHUNMUGAM *et al.*, 2017).

Isoladores contaminados por poluição podem ser observados na Figura 7a e os locais em que este tipo de poluição costuma ocorrer podem ser visualizados na Figura 7b.

Figura 7 - (a) Isolador Polimérico Poluído e (b) Linha de Transmissão Próximo a Vegetação Abundante.



(a)

(b)

Fonte: DIAS *et al.* (2019).

2.1.1.4 DEFEITOS EXTERNOS EM ISOLADORES POLIMÉRICOS

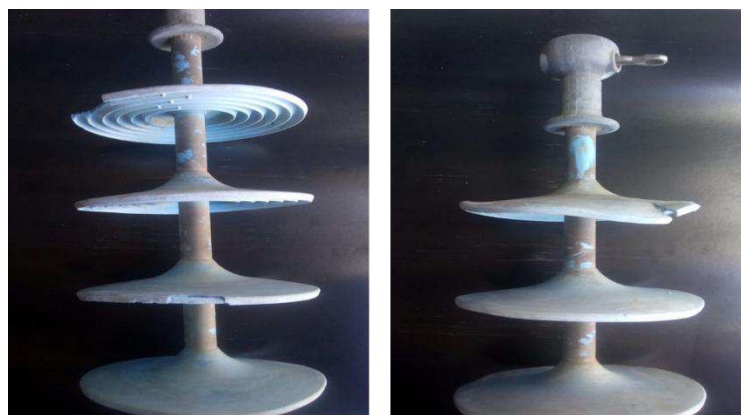
Ao longo do tempo, as propriedades do isolador polimérico tendem a ser modificadas devido à exposição do material a agentes ambientais, esforços mecânicos e elétricos (MAVRIKAKIS, 2019). Diante disso, defeitos no revestimento polimérico (defeito externo) podem surgir ou haver o agravamento de falhas já existentes.

Os defeitos externos podem ser classificados de acordo com a região do isolador que é atingida: aletas, revestimento do núcleo ou ferragens. Segundo Diniz (2019b) os defeitos mais frequentes são:

- Aleta cortada, despedaçada ou perfurada: ocasionado por ventos fortes, vandalismo, envelhecimento ou manuseio inadequado. Aletas cortadas em

isoladores que foram retirados de operação podem ser visualizados na Figura 8.

Figura 8 - Aletas Cortadas em Isoladores Retirados de Operação.



Fonte: Autoria Própria.

- Isoladores perfurados por tiros: casos em que as aletas são perfuradas por acidentes ou vandalismos. Em alguns casos, o projétil alocado no revestimento pode favorecer a ocorrência de descargas parciais. Na Figura 9 é representado uma fotografia de um isolador com a presença de um projétil no seu revestimento.

Figura 9 - Tiros em Aletas de Isoladores Poliméricos.

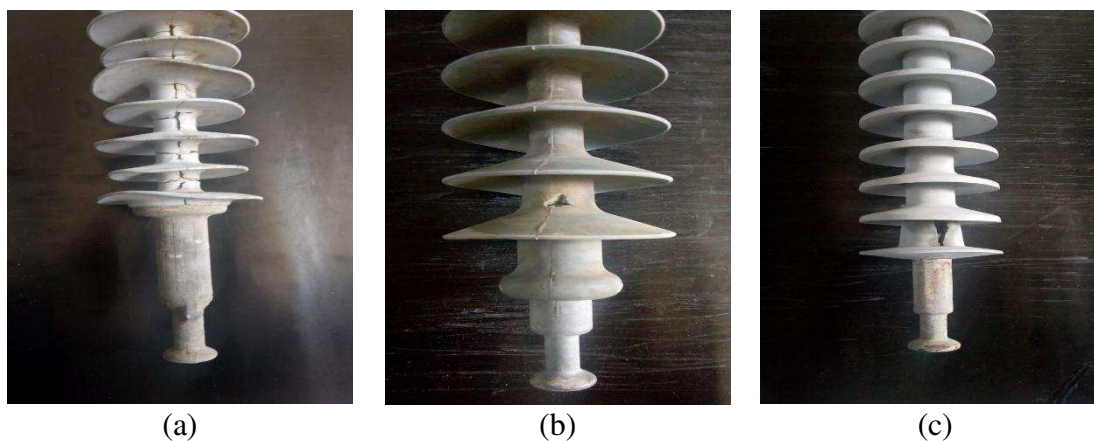


Fonte: DINIZ (2019b).

- Fissuras: fendas ou aberturas no material polimérico decorrentes da atividade de descargas corona ou devido a defeitos de fabricação, que podem ou não expor o núcleo. Isolador com a presença de fissura na sua estrutura é representado na Figura 10a.
- Perfurações: furos localizados no revestimento polimérico, que podem alcançar ou não o núcleo, resultantes de descargas disruptivas que danificam o material dielétrico. Na Figura 10b é exibido um exemplo de perfuração em isolador polimérico.

- Cortes profundos: incisões rigorosas resultantes do agravamento de outros defeitos. A profundidade do corte pode expor o núcleo. Um exemplo de corte profundo próximo ao terminal fase é retratada na Figura 10c.

Figura 10 - (a) Fissura, (b) Perfuração e (c) Corte Profundo.



Fonte: Autoria Própria.

- Trilhamento: caracteriza-se pela formação de trilhas elétricas ao longo da superfície das aletas e do revestimento polimérico, cujas causas são correntes de fuga ou alta concentração de poluição na superfície do isolador polimérico. Um caso de trilhamento elétrico em isoladores poliméricos pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Trilhamento Elétrico em Isolador Polimérico.



Fonte: DOMINGUES (2012).

Todos os defeitos que foram elencados na presente seção podem ser modelados por *software* de desenho e suas consequências podem ser previstas pela utilização de métodos numéricos de cálculo de campo elétrico e potencial, tal como o Método dos Elementos Finitos.

2.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O MEF é uma técnica numérica empregada na solução de equações diferenciais parciais, como o caso da Equação de Poisson e Laplace, sendo indicado para os casos de geometrias complexas, em que a obtenção de uma solução satisfatória é inviável por meio de métodos analíticos clássicos (SADIKU, 2004; NORRIE; VRIES, 1978).

Segundo Sadiku (2004), a utilização do MEF em um problema qualquer envolve quatro etapas. No entanto, uma etapa adicional é implementada para o uso prático do MEF. Os passos utilizados são enumerados a seguir:

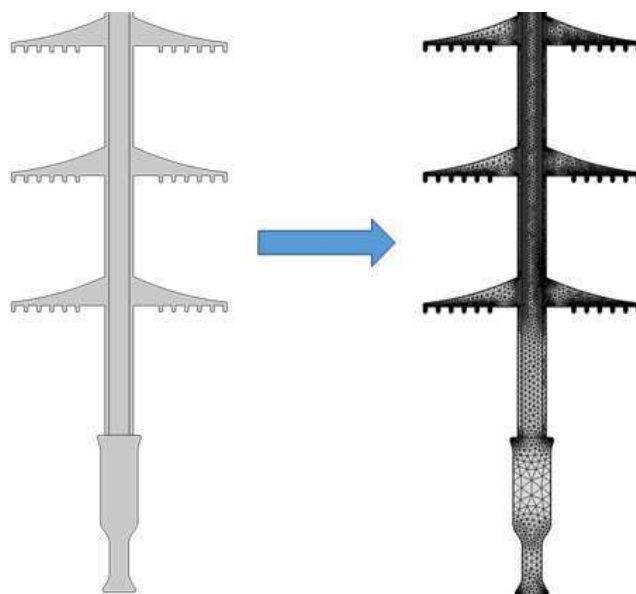
- Discretização;
- Equacionamento;
- Construção de uma matriz global;
- Solução do sistema de equações;
- Visualização.

As etapas supracitadas serão descritas com mais detalhes nas seções seguintes.

2.2.1 DISCRETIZAÇÃO

A etapa de discretização consiste na representação do domínio (objeto de estudo) em elementos finitos. Desse modo, essa etapa baseia-se na divisão do domínio de análise em pequenas sub-regiões. Essas regiões devem apresentar um número finito de geometrias, podendo ser de diversos tamanhos e formas. Isso permite uma grande maneabilidade do método, pois em regiões de grande interesse pode-se aumentar a densidade de sub-regiões (LEITE *et al.*, 2013). Na Figura 12 é retratado o processo de discretização de um isolador polimérico em várias regiões menores.

Figura 12 – Discretização de Isolador Polimérico.



Fonte: DINIZ (2019b).

Cada sub-região representada no processo de discretização é denominado elemento, e o encontro de suas arestas é denominado nó. O conjunto de elementos é denominado malha.

2.2.2 EQUACIONAMENTO

Nessa etapa se faz necessário a definição de um modelo que melhor descreve o fenômeno físico a ser estudado. Assim, é preciso um conjunto de equações que possibilite determinar as intensidades de campo elétrico e potencial no objeto de estudo.

O procedimento para determinar o campo elétrico E quando a distribuição de cargas é conhecida ou quando o potencial V é conhecido em uma região, se faz por meio da utilização da Lei de Coulomb ou da Lei de Gauss. No entanto, na maioria das aplicações práticas, nem a distribuição de cargas nem a distribuição de potencial são conhecidas. Tais problemas, são usualmente resolvidos por meio da Equação de Poisson ou da Equação de Laplace (SADIKU, 2004).

A Equação de Poisson é obtida por meio da Lei de Gauss, sendo descrita pela Equação (1):

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

em que ρ_v é a densidade superficial de cargas (C/m^3), ε é a permissividade do material (F/m) e V o potencial elétrico (V).

Se a região for livre de carga ($\rho_v = 0$), então a Equação de Poisson se torna a Equação de Laplace, conforme apresentado na Equação (2):

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

De posse do valor do potencial, determinado pela Equação (1) ou (2), é possível determinar o valor do campo elétrico, conforme a Equação (3):

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

em que \mathbf{E} representa a intensidade de campo elétrico (V/m).

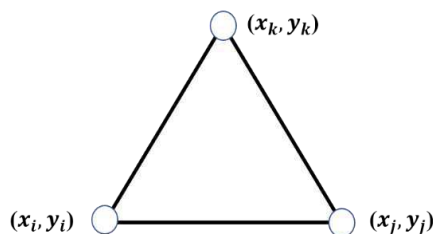
2.2.3 CONSTRUÇÃO DAS MATRIZES

Em uma região que foi subdividida em triângulos, e a variável de interesse é o potencial elétrico em duas dimensões $V_e(x, y)$, o cálculo do potencial pode ser representado pela aproximação polinomial representada na Equação (4):

$$V_e = a + bx + cy \quad (4)$$

em que: $V_e = 0$ representa fora do elemento 'e' e $V_e \neq 0$ representa dentro do elemento 'e' (DINIZ, 2019b). Assim, de posse de um elemento genérico de malha, Figura 13, é possível montar um sistema de equações lineares.

Figura 13 - Elemento Genérico de uma Malha.



Fonte: Adaptado de LEITE (2013).

Considerando que V_{e_i} , V_{e_j} e V_{e_k} são os potenciais nos três nós do elemento triangular, utilizando a Equação (4) tem-se a matriz da Equação (5):

$$\begin{bmatrix} V_{e_i} \\ V_{e_j} \\ V_{e_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (5)$$

Com a matriz representada na Equação (5), é possível determinar os coeficientes a , b e c por meio da Equação (6):

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{e_i} \\ V_{e_j} \\ V_{e_k} \end{bmatrix} \quad (6)$$

A solução do sistema da Equação (6), permite que se obtenha os coeficientes a , b e c em função das coordenadas dos pontos (x_i, y_i) , (x_j, y_j) e (x_k, y_k) . De posse dos valores dos coeficientes, é possível obter o potencial elétrico e a partir deste o valor do campo, por meio da Equação (2).

2.2.4 SOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

Nessa etapa, soluções de contorno devem ser utilizadas para fornecer valores conhecidos e constantes em alguns nós, simplificando a solução do sistema de equações, que por sua vez é obtida por meio de cálculo numérico.

Quando o objeto de estudo é um isolador polimérico, tem-se na sua constituição três meios dielétricos diferentes: ar, núcleo e revestimento polimérico. Considerando que o potencial é aplicado nas ferragens do isolador e que o seu interior possui carga nula ($\rho = 0$), tem-se a equação de Laplace conforme apresentado na Equação (7):

$$-\varepsilon \nabla(\nabla V) = 0 \quad (7)$$

Expandindo a Equação (7) para o caso em duas dimensões, tem-se a Equação (8):

$$\varepsilon \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \varepsilon \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (8)$$

A Equação 8 será resolvida pelo MEF para a obtenção do potencial elétrico no decorrer das dimensões do isolador. A partir disso, com a utilização da Equação (2) será possível determinar o campo elétrico.

2.2.5 VISUALIZAÇÃO

A etapa de visualização consiste na consulta dos valores numéricos dos resultados do caso analisado por meio da aplicação do MEF em *softwares*. Segundo Dias (2017), apesar do MEF apresentar soluções aproximadas, sua exatidão pode ser melhorada com o refinamento da malha, existindo um nível ótimo de refinamento que proporciona uma solução mais próxima da realidade com um esforço computacional razoável.

Para tanto, é utilizado o COMSOL Multiphysics®. Um *software* de simulação computacional que engloba todas as etapas do fluxo de trabalho de modelagem, desde a definição de geometrias, propriedades de materiais e físicas que descrevem fenômenos específicos até a solução de modelos para produzir resultados condizentes com a realidade (COMSOL, 2019).

Dessa forma, o COMSOL emprega o MEF e permite a visualização das soluções por meio de gráficos, mapas de cores, além da representação da solução por linhas equipotenciais. O *software* ainda possui módulos que descrevem as equações que são utilizadas de acordo com a área que o abrange (DIAS, 2017).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado uma Revisão Bibliográfica de trabalhos publicados que implementaram simulações computacionais para o cálculo de potencial e campo elétrico em isoladores poliméricos com a presença de defeito externo e sob o efeito de poluição.

A quantidade de trabalhos publicados que investigam poluição e defeito externo em isoladores poliméricos com mapeamento de campo elétrico e potencial são reduzidos, possuindo um volume maior de trabalhos que avaliam o aprimoramento de técnicas de monitoramento em isoladores. Desse modo, o autor considerou os trabalhos mais atuais que tratam do tema proposto, tendo em vista que estudos que envolvem simulação computacional em isoladores poliméricos são mais recentes.

3.1 ESTADO DA ARTE

Leite *et al.* (2013) realizaram simulações computacionais em isoladores poliméricos de 230 kV com a presença de cavidades e furos na interface núcleo/revestimento. Os autores detectaram que o conhecimento de defeitos em isoladores é de grande importância, evitando que se mantenham instalados nas linhas de transmissão, pois tais defeitos são propensos a ocorrência de descargas parciais, que por sua vez degradam o material polimérico, resultando na exposição do núcleo. Além disso, os autores também analisaram o espectro de frequência da distribuição de campo elétrico no isolador por meio da Transformada de Fourier, constatando que cada defeito possui um espectro característico, facilitando sua identificação. No entanto, os autores não propuseram um método que aplicasse a Transformada de Fourier no monitoramento de isoladores por campo elétrico.

Volat (2013) realizou um estudo comparativo sobre a modelagem de uma fina camada dielétrica condutora na superfície de um isolador polimérico. O autor considerou duas abordagens diferentes, que por sua vez são oferecidas pelos *softwares* do MEF. A primeira é uma abordagem volumétrica, que leva em consideração a espessura da camada fina. A segunda é uma abordagem superficial, em que a camada condutiva é tratada como uma condição de contorno específica. Os resultados obtidos demonstraram que a

abordagem de superfície e volume fornece os mesmos resultados, em termos da distribuição de potencial em geometrias 2D assimétrico e 3D. No entanto, em 3D, a abordagem em volume requer um esforço computacional maior. Além disso, o autor demonstrou que na abordagem de superfície e volume a permissividade da camada fina influencia os valores de condutividade abaixo de $1 \mu S/m$. Para valores mais altos, apenas a condutividade da camada condutiva é relevante.

A dissertação de mestrado de Lopes (2016) aplica um modelo computacional para o mapeamento da distribuição de campo e potencial elétrico em isoladores com a presença de poluição. O autor demonstrou que quanto maior a condutividade da poluição depositada, maior a uniformidade da distribuição de potencial apresentada na superfície isolante, constatando que a característica resistiva da camada condutiva se torna preponderante em relação a característica capacitiva natural do acessório isolante. O autor também averiguou a distribuição de campo elétrico, revelando que quanto maior o nível de poluição, maior será a quantidade de picos ao longo da superfície do isolador.

Dias *et al.* (2019) analisaram duas topologias de isoladores poliméricos tipo pino, classe de tensão de 15 kV, com o objetivo de analisar o comportamento elétrico quando o isolador está submetido à poluição. Os autores constataram que com a presença de poluição o comportamento da distribuição de potencial outrora isolante, passou a se mostrar resistivo, comprometendo a capacidade de isolação. Adicionalmente, os autores compararam a resposta de cada isolador frente a aplicação de poluição, observando que o isolador que possuía maior distância de escoamento apresentava menores valores de potencial e campo elétrico, consistindo na melhor opção de isolador.

Diniz *et al.* (2019) apresentou uma avaliação do campo elétrico em isoladores poliméricos íntegros e com defeito externo. O defeito que foi simulado pelos autores consiste num furo externo com profundidade suficiente para atingir o núcleo. Os resultados obtidos para o isolador com ausência de defeito não apresentaram distorção do campo elétrico. Já as análises que os autores realizaram para o caso em que o isolador se encontra com defeito, evidenciou que o campo elétrico sofre distorções, cuja intensidade depende da configuração, revelando que furos com apenas 2 mm de diâmetro, localizados a 10 mm do terminal fase, são suficientes para provocar ionização na tensão nominal, bem como ruptura elétrica localizada.

As contribuições dos trabalhos destacados neste capítulo estão elencadas na Tabela 1, que por sua vez apresenta a contribuição do presente trabalho.

Tabela 1 - Contribuições dos Trabalhos Citados na Revisão Bibliográfica.

Ano	Pesquisador(es)	Contribuição	AE	AD	AP
2013	Leite <i>et al.</i>	Constataram que a presença de cavidades e furos no isolador são propensos a ocorrência de descargas parciais, degradando o material polimérico e por conseguinte expondo o núcleo.	X	X	
2014	Volat	Observou que a abordagem de volume apresenta um esforço computacional maior que a abordagem de superfície, mas apresenta os mesmos resultados. Concluiu também que para valores acima de 1 $\mu\text{S/m}$, apenas a condutividade da camada condutiva é relevante.			X
2016	Lopes	Detectou a partir de simulações computacionais que quanto maior a poluição da camada condutiva, mais resistivo o isolador se torna. Também averiguou que a maior quantidade de picos de campo elétrico ocorre conforme há o aumento da intensidade de poluição.			X
2019	Dias <i>et al.</i>	Constataram que com a presença de poluição o comportamento de um isolador polimérico outrora isolante, passa a ser resistivo. Também observaram que um isolador com maior distância de escoamento possui melhor desempenho frente a poluição.			X
2019	Diniz <i>et al.</i>	Observaram que um isolador com ausência de defeito não sofre distorção. Também concluíram que a presença de defeitos ocasiona distorções que podem ocasionar ionização na tensão nominal.	X	X	
2019	Neto	Observou a influência de defeito externo e da poluição em isoladores poliméricos. O autor também analisou diferentes geometrias de isoladores e determinou qual apresenta melhor desempenho elétrico.	X	X	X

AE: Análise de isoladores poliméricos por campo elétrico
AD: Análise da presença de defeitos em isoladores poliméricos
AP: Análise dos efeitos da poluição em isoladores poliméricos

Fonte: Autoria Própria.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será abordado a metodologia que foi utilizada na pesquisa, com uma descrição dos isoladores que foram utilizados e dos métodos que foram seguidos para a obtenção dos resultados.

4.1 MATERIAL

Simulações computacionais utilizando o COMSOL Multiphysics® foram realizadas em dois isoladores de suspensão, da classe de tensão de 138 kV. Foram considerados isoladores com dois tipos de revestimento polimérico, sendo eles: borracha de silicone vulcanizada à alta temperatura (HTV) e borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente (RTV). Na Tabela 2 é apresentada a nomenclatura que foi empregada para representar cada tipo de isolador, bem como a descrição de seu revestimento.

Tabela 2 - Descrição dos Isoladores que Foram Utilizados.

Nome do Isolador	Classe de Tensão	Revestimento Polimérico
Isolador 1	138 kV	HTV
Isolador 2	138 kV	RTV

Fonte: Autoria Própria.

As amostras dos isoladores foram disponibilizadas pelo Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e podem ser observados na Figura 14. Cada isolador possui formato próprio, diferindo entre si quanto ao número de aletas, distância de escoamento, tipo de terminal e distância de afastamento entre fase e terra.

Figura 14 - Amostras dos isoladores poliméricos utilizados.



Fonte: Autoria Própria.

4.2 MÉTODOS

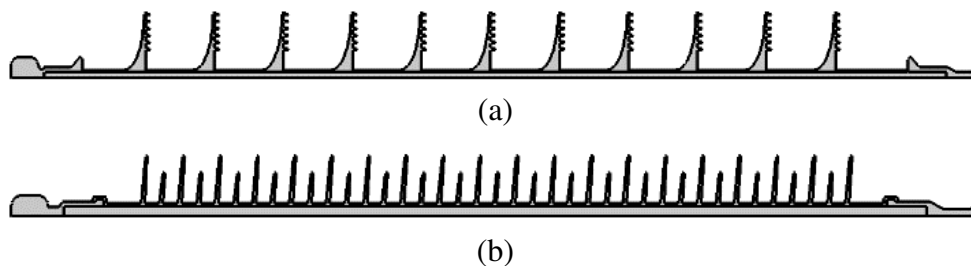
Nesta seção são apresentadas as metodologias utilizadas para as simulações computacionais realizadas por meio do *software* COMSOL Multiphysics®, baseado no Método dos Elementos Finitos.

4.2.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.2.1.1 MODELO DO ISOLADOR

As simulações têm por objetivo permitir a análise do potencial e do campo elétrico quando o isolador se encontra íntegro, com defeito externo e sob o efeito de poluição. Para tanto, no procedimento de simulação, inicialmente é preciso definir o domínio geométrico do objeto de teste (isolador polimérico). Tal domínio foi definido como sendo 2D com geometria de revolução (2D axial). Na Figura 15 são representados os isoladores modelados em 2D.

Figura 15 – (a) Modelo do Isolador 1 e (b) Modelo do Isolador 2.

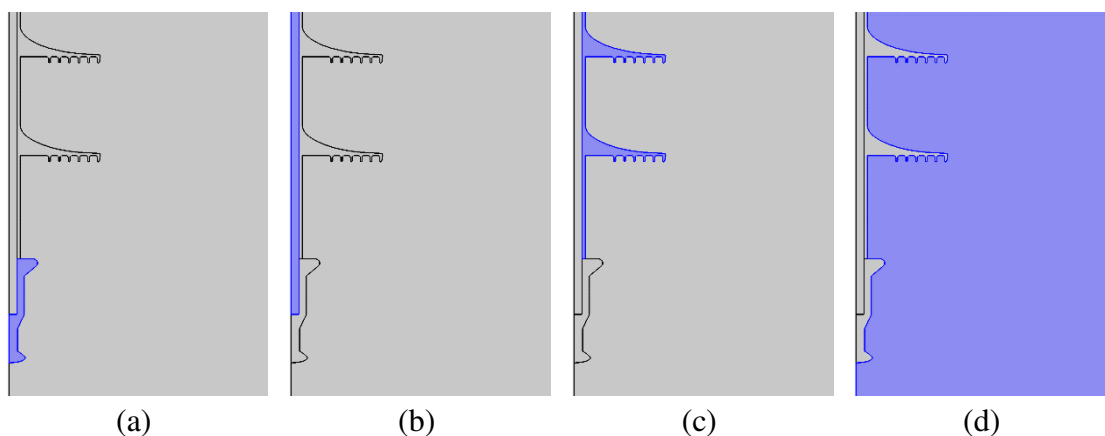


Fonte: Autoria Própria.

4.2.1.2 PROPRIEDADE DOS MATERIAIS

No segundo momento do processo de simulação foi definido as propriedades físicas que constituem o isolador polimérico, bem como o ambiente no qual está inserido. É sabido que o isolador polimérico possui revestimento, núcleo e ferragens metálicas, sendo necessário especificar cada região no ambiente de simulação, conforme a Figura 16.

Figura 16 - (a) Ferragem Metálica; (b) Núcleo; (c) Revestimento Polimérico e (d) Ar.



Fonte: Autoria Própria.

Posteriormente, é necessário inserir as constantes físicas que caracterizam cada material do sistema simulado. As constantes que caracterizam os materiais foram obtidas nas bibliotecas do próprio *software* de simulação, e algumas outras em referências da bibliografia, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Constantes Físicas dos Materiais Constituintes do Isolador.

Região	Isolador 1		Isolador 2	
	Permissividade	Condutividade (S/m)	Permissividade	Condutividade (S/m)
Núcleo ^(A)	7,2	10^{-14}	7,2	10^{-14}
Revestimento	4,3 ^(A)	$10^{-14(A)}$	3,45 ^(B)	$10^{-14(A)}$
Ferragens ^(C)	10^5	10^7	10^5	10^7
Ar	1	10^{-15}	1	10^{-15}

Fonte: KONE *et al.*, 2017^(A); JIANG *et al.*, 2018^(B); DINIZ, 2019b^(C).

Como pode ser observado na Tabela 3 a única constante que varia entre os isoladores é a permissividade elétrica do revestimento, pois são constituídos de diferentes tipos de materiais poliméricos.

4.2.1.3 APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO E *MESHING*

Dentre os procedimentos de simulação, a definição das condições de contorno é um dos estágios mais importantes. Essas condições são aplicadas com o objetivo de

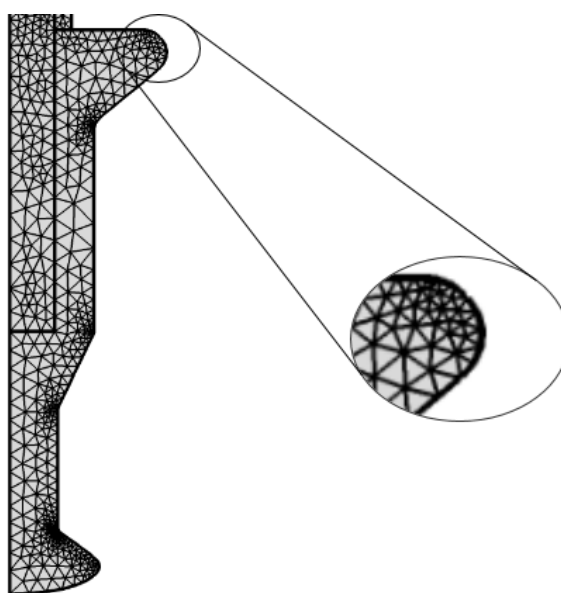
definir o valor das variáveis em determinadas regiões do domínio. Para tanto, é aplicada ao terminal de fase a tensão V_s explicitada pela Equação (9):

$$V_s = \frac{V_L \times \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Em que V_L é a tensão de linha (kV) e V_s é o valor pico da tensão de fase (kV). Apesar do isolador ser especificado com a tensão de linha do sistema no qual está conectado, a tensão que é de fato aplicada é a de fase, sendo considerado o seu valor de pico, com o intuito de determinar o pior caso a que o isolador está submetido.

Finalmente, depois de realizados os passos anteriores com a definição do modelo do isolador, determinação das propriedades dos materiais e condições de contorno, todo o domínio foi discretizado em elementos triangulares durante o processo de *meshing*, sendo realizado o refinamento da malha nas regiões de interesse, conforme pode ser observado na Figura 17.

Figura 17 - Discretização do Terminal Fase de um Isolador Polimérico.



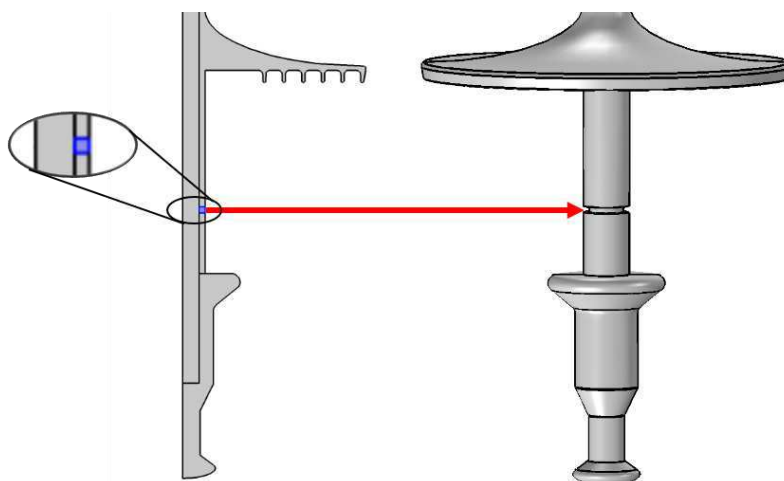
Fonte: Autoria Própria.

Definida a malha a ser utilizada é possível obter os resultados referentes a campo e potencial elétrico no decorrer do isolador íntegro com a utilização da física eletrostática, disponível no ambiente de simulação do COMSOL. Para a obtenção dos demais resultados é necessário realizar a modelagem do defeito externo e da camada de poluição, como será explanado nas seções a seguir.

4.2.1.4 MODELAGEM DO DEFEITO EXTERNO

Para determinar o campo elétrico e o potencial no caso em que o isolador se encontra com a presença de defeito externo foi modelado um furo no revestimento do isolador com profundidade (3 mm) suficiente para atingir o núcleo, deixando-o exposto. Por se tratar de uma geometria 2D de revolução, o furo contornará todo o núcleo numa rotação de 360° formando um anel, como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Furo implementado no COMSOL e sua representação em 3D.



Fonte: Autoria Própria.

Dessa forma, com a utilização da física eletrostática, nove casos foram simulados, em que foram variados a espessura do defeito e a sua posição. Os casos são elencados na Tabela 4, em que Φ [mm] corresponde a espessura do furo realizado e P [mm] é o posicionamento do furo com relação ao terminal fase.

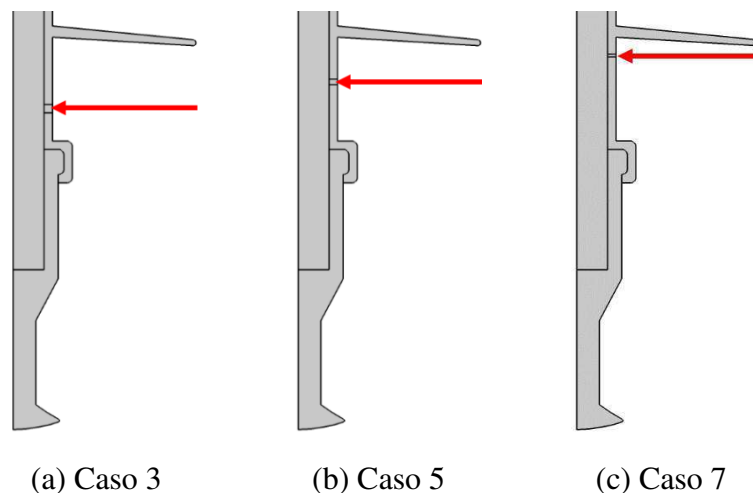
Tabela 4 - Casos de Estudo Submetidos a Simulações Computacionais.

Casos	Φ [mm]	P [mm]
01	1	10
02	2	10
03	3	10
04	1	20
05	2	20
06	3	20
07	1	30
08	2	30
09	3	30

Fonte: Autoria Própria.

Dentre as configurações descritas nos casos acima, três exemplos podem ser observados na Figura 19.

Figura 19 - Configurações do Defeito Externo no Isolador 2.



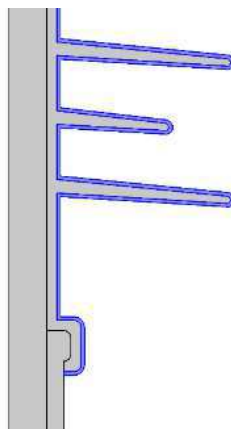
Fonte: Autoria Própria.

A partir dos casos descritos, foram traçadas curvas de campo elétrico que foram obtidas por meio de linhas definidas sobre a superfície dos isoladores. Em seguida, as curvas referentes aos casos de isoladores defeituosos foram comparadas com as respectivas curvas do isolador íntegro.

4.2.1.5 MODELAGEM DA POLUIÇÃO

Com o objetivo de se determinar a influência da poluição na operação dos isoladores e definir qual apresenta melhor opção para utilização, foi aplicado sob a superfície de todo o revestimento polimérico uma camada condutiva de 1mm de espessura. Essa camada foi modelada por meio de um *software* de desenho técnico e pode ser observada na Figura 20.

Figura 20 - Representação da Camada Condutiva na Superfície do Isolador 2.



Fonte: Autoria Própria.

Considerando que a poluição de uma região varia de acordo com o local, com o tempo de exposição e com a umidade ambiente, os valores de permissividade e condutividade elétrica da camada poluente foram variados. Essa variação foi realizada com o objetivo de avaliar desde um nível leve de poluição até um nível elevado, sendo necessário inserir as constantes físicas que caracterizam cada nível de poluição, conforme é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Constantes físicas que caracterizam os níveis de poluição.

Tipo de Poluição	Permissividade	Condutividade (S/m)
Leve	15	1×10^{-6}
Média	15	1×10^{-5}
Pesada	15	$1,5 \times 10^{-4}$

Fonte: VOLAT (2013).

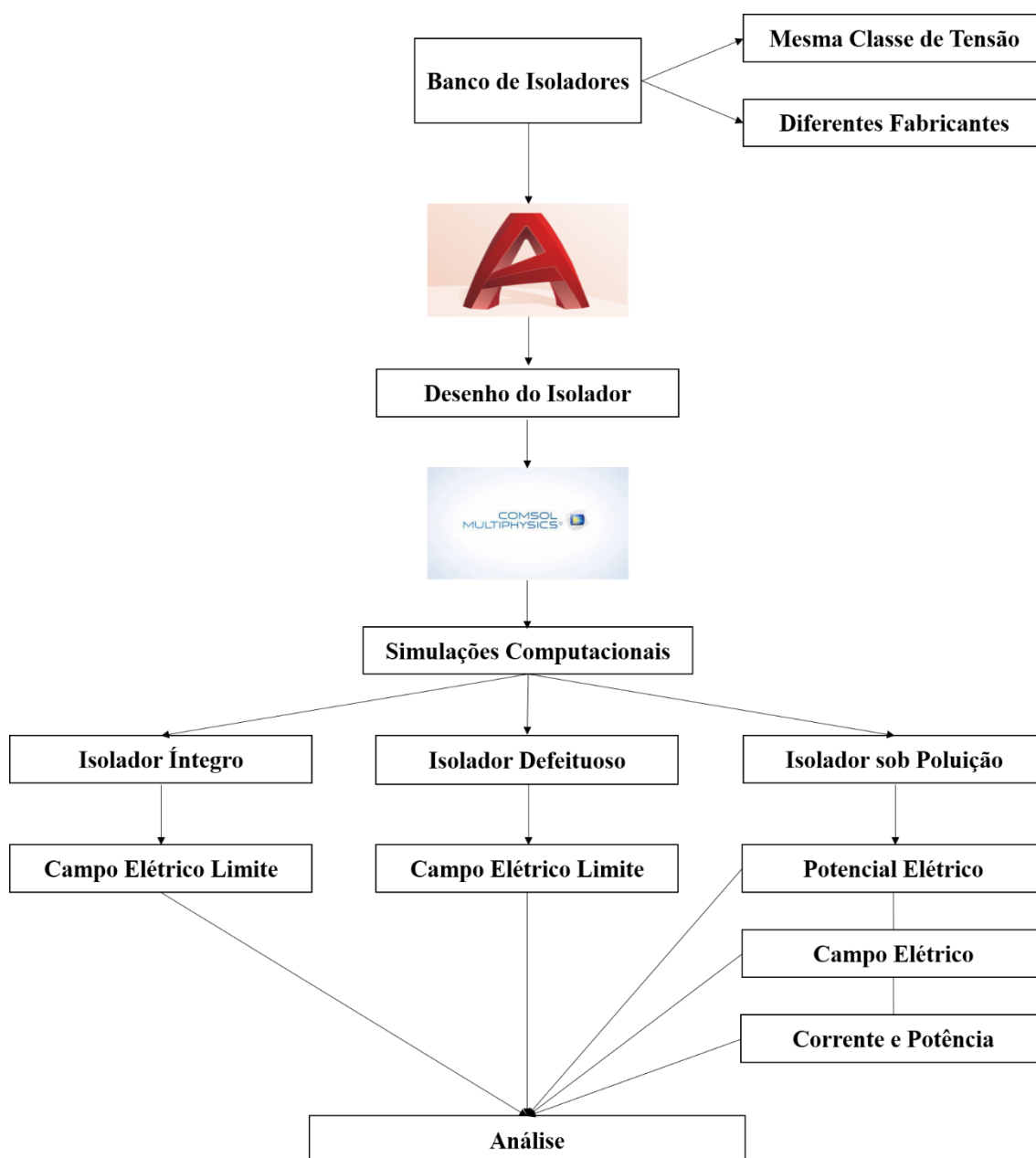
Para a obtenção dos resultados nos casos em que o isolador se encontra íntegro e com a presença de poluição, foi utilizada a física eletrostática. No entanto, para representar a camada condutiva é preciso empregar a física *electric currents*, disponível no *software* utilizado. Com ela, é possível modelar uma camada condutiva na superfície do objeto de estudo e averiguar seus efeitos na distribuição de potencial e campo elétrico.

4.2.2 PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

De posse dos resultados referentes a campo elétrico e potencial em isoladores sob

diferentes condições de operação e de posse dos passos que foram seguidos para gerar os resultados em diferentes topologias de isoladores, foi possível criar uma metodologia que é capaz de determinar a melhor escolha de isolador a ser aplicada na linha de transmissão ou distribuição. Na Figura 21 é apresentada a metodologia desenvolvida.

Figura 21 - Metodologia Utilizada para Determinar Parâmetros na Escolha de Isoladores.



Fonte: Autoria Própria.

A metodologia desenvolvida está em concordância com os passos que foram seguidos no presente trabalho para obtenção dos resultados. Primordialmente, é necessário ter em posse as dimensões dos isoladores que serão escolhidos, sendo obrigatoriamente isoladores com a mesma classe de tensão e de diferentes fabricantes.

Em seguida, por meio de um *software* de desenho técnico é possível obter o desenho do isolador, para importa-lo no ambiente do COMSOL.

No COMSOL, será realizada as simulações computacionais que emulam diferentes condições a que o isolador está submetido, tais como: íntegro, defeito externo e poluição. Desse modo, para o caso íntegro e sob defeito externo é preciso definir os valores limites de campo elétrico na superfície do isolador, pois a informação do campo reflete o desempenho elétrico do isolador nessas condições. Já para o caso em que o isolador está sob o efeito de poluição, é preciso determinar o campo elétrico, o potencial, a corrente de fuga e a potência consumida pelo isolador. Isso se dá porque o campo e o potencial variam com e sem poluição, mas se mantêm invariáveis com a intensificação da camada condutiva. Desse modo, é preciso definir a corrente de fuga e a potência do isolador, pois são parâmetros que variam conforme a poluição aumenta.

Por fim, é preciso a análise dos dados obtidos para cada simulação realizada. Para tanto, determina-se as maiores intensidades de campo elétrico ao longo do isolador para cada caso simulado, devendo o melhor isolador apresentar menores picos de campo elétrico e menores quantidades de regiões em que ocorrem. Além disso, o isolador escolhido deve possuir os menores valores de corrente e potência elétrica, sendo averiguado cada caso de poluição, além do isolador íntegro.

Como o isolador escolhido pode não possuir as características supracitadas, é necessário averiguar a relevância de cada dado obtido, pois as maiores intensidades de uma grandeza definida para dois ou mais isoladores, não implica uma diferença significativa no desempenho elétrico.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

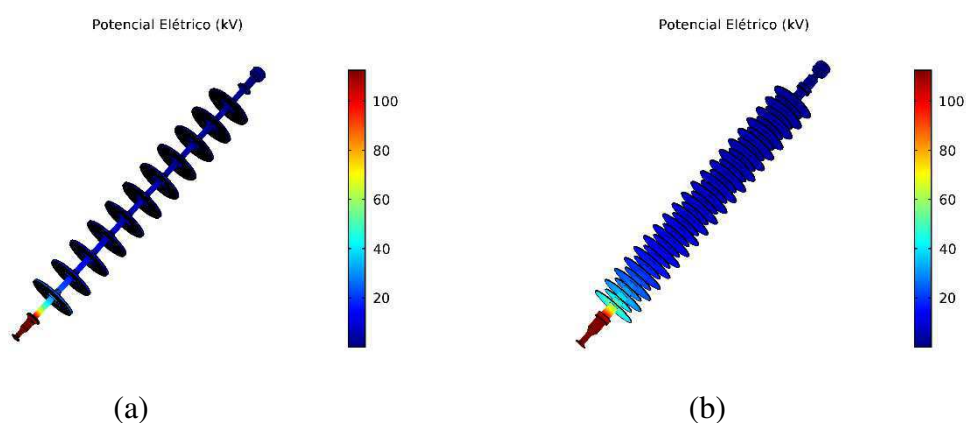
Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes aos isoladores 1 e 2, quando se encontram íntegros, sob defeito externo e sob poluição, bem como as análises cabíveis para cada caso simulado.

5.1 ISOLADORES ÍNTEGROS

Os isoladores se encontram íntegros quando há ausência de qualquer interferência que comprometa o seu funcionamento, seja do meio no qual o isolador está acoplado, seja na estrutura física do isolador. Essa condição de operação do isolador não é condizente com o que ocorre na prática, no entanto, é de fundamental importância o conhecimento do seu comportamento, pois pode ser traçado um elo comparativo entre diferentes geometrias de isoladores.

Para tanto, resultados foram obtidos e analisados por meio de gráficos de cores que correspondem às distribuições de campo elétrico e potencial calculadas ao longo do isolador. O comportamento do potencial elétrico ao longo dos Isoladores 1 e 2 podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 - Potencial Elétrico ao Longo do (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2

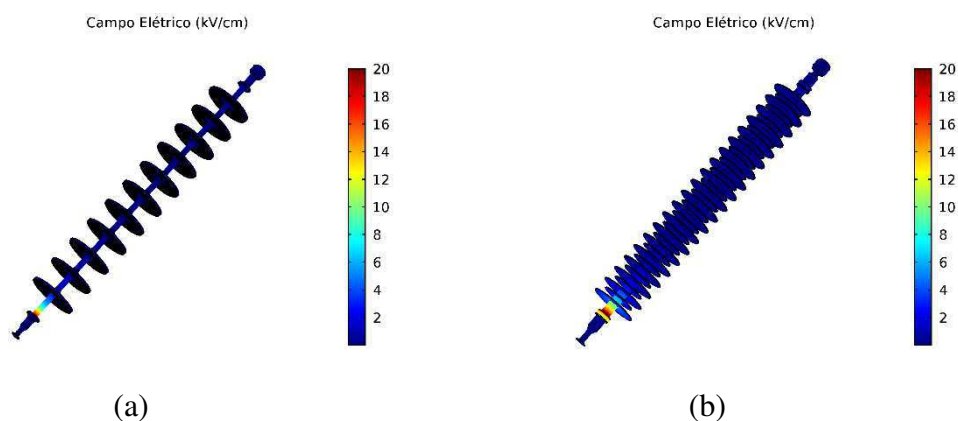


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 22 está evidenciado que o potencial elétrico, para os dois isoladores, fica concentrado nas regiões próximas ao terminal fase, demonstrando a característica isolante de ambos os isoladores. Já o campo elétrico, que é proporcional ao potencial,

também possui suas maiores intensidades junto ao terminal fase, como é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Campo Elétrico ao Longo do (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2



Fonte: Autoria Própria.

Em ambas as simulações (potencial e campo elétrico) não houve grandes disparidades de desempenho entre os dois isoladores. No entanto, por se tratar de um diagnóstico visual torna-se preciso uma análise que leve em conta o valor do campo e potencial elétrico ponto a ponto.

Para tanto, resultados foram obtidos e analisados por meio de gráficos que correspondem às distribuições de campo elétrico e potencial calculadas sob uma linha longitudinal traçada na superfície do isolador, como representada na Figura 24.

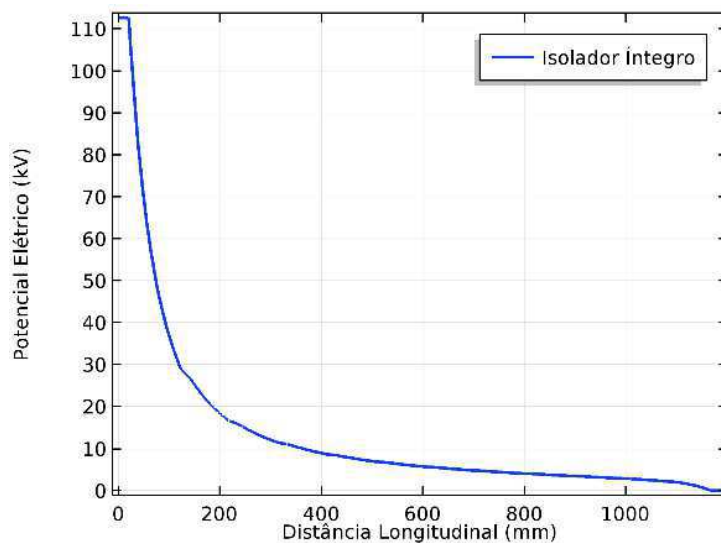
Figura 24 - Linha Longitudinal Traçada em: (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2.



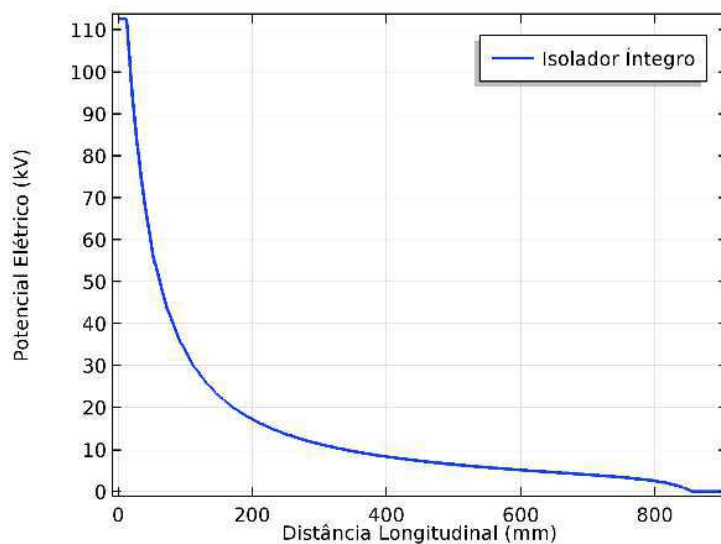
Fonte: Autoria Própria

O comportamento do potencial elétrico, para os Isoladores 1 e 2, na linha longitudinal representada, pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 - Gráficos do Potencial Elétrico nos Isoladores 1 em (a) e Isolador 2 em (b).



(a)



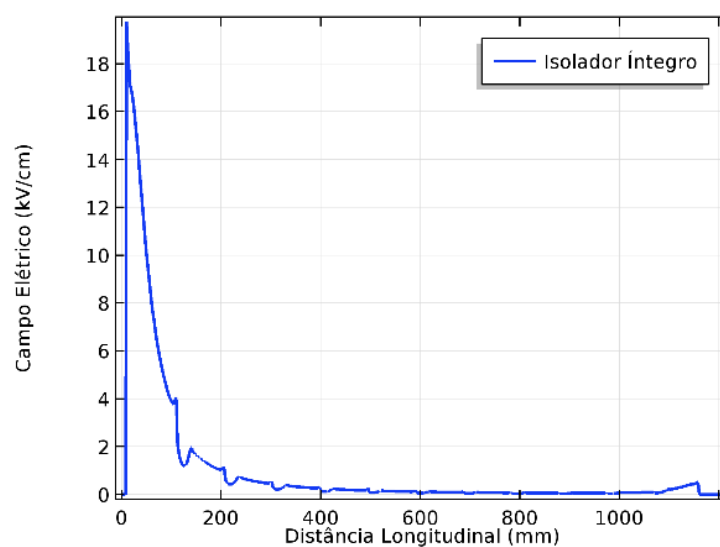
(b)

Fonte: Autoria Própria.

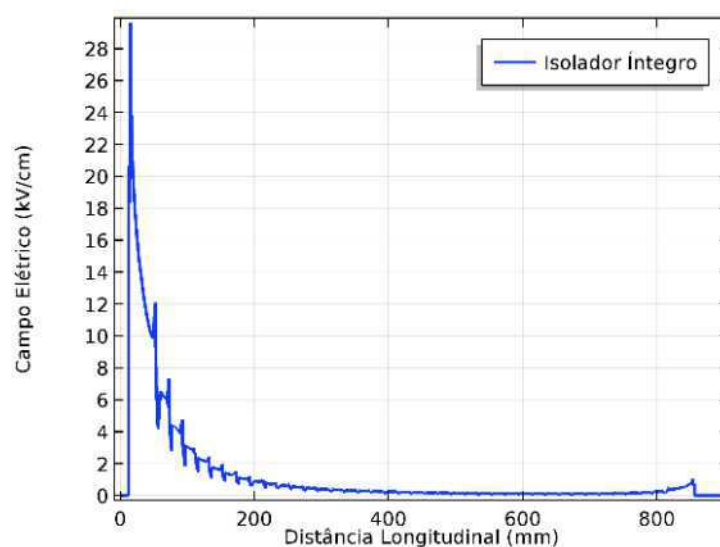
Os dois gráficos apresentados na Figura 25 são semelhantes e se iniciam com o valor de pico da tensão de fase, cujo valor é 112,6 kV. À medida que a linha se distancia do terminal fase, em ambos os isoladores, a tensão decai exponencialmente até atingir o valor zero, que por sua vez representa o valor especificado no terminal terra. Além disso, o valor da distância de afastamento da fase para o terra varia entre os isoladores, representando mais de 1,2 m no Isolador 1 e quase 0,9 m no Isolador 2.

Utilizando a mesma linha que foi traçada para os gráficos anteriores, foi averiguado o comportamento do campo elétrico, cujos gráficos estão representados na Figura 26.

Figura 26 - Gráficos do Campo Elétrico no (a) Isolador 1 e (b) Isolador 2.



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

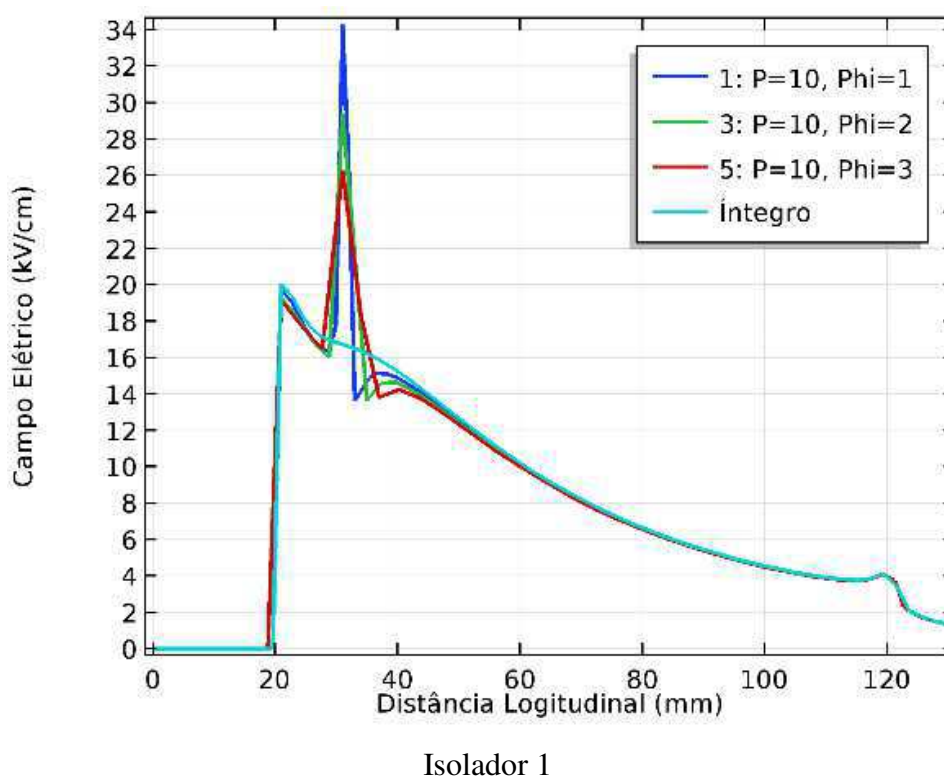
Como pode ser observado na Figura 26, as curvas apresentam o mesmo padrão, mas a intensidade de campo elétrico varia entre os isoladores, apresentando maiores intensidades no Isolador 2, cujo valor é 9,8 kV/cm superior ao Isolador 1. A linha longitudinal traçada se inicia na ferragem fase, cujo campo elétrico é nulo devido ao material metálico. A intensidade de campo elétrico aumenta quando há a transição do material metálico para o dielétrico. O efeito da presença das aletas (saías) também pode ser observado nas curvas.

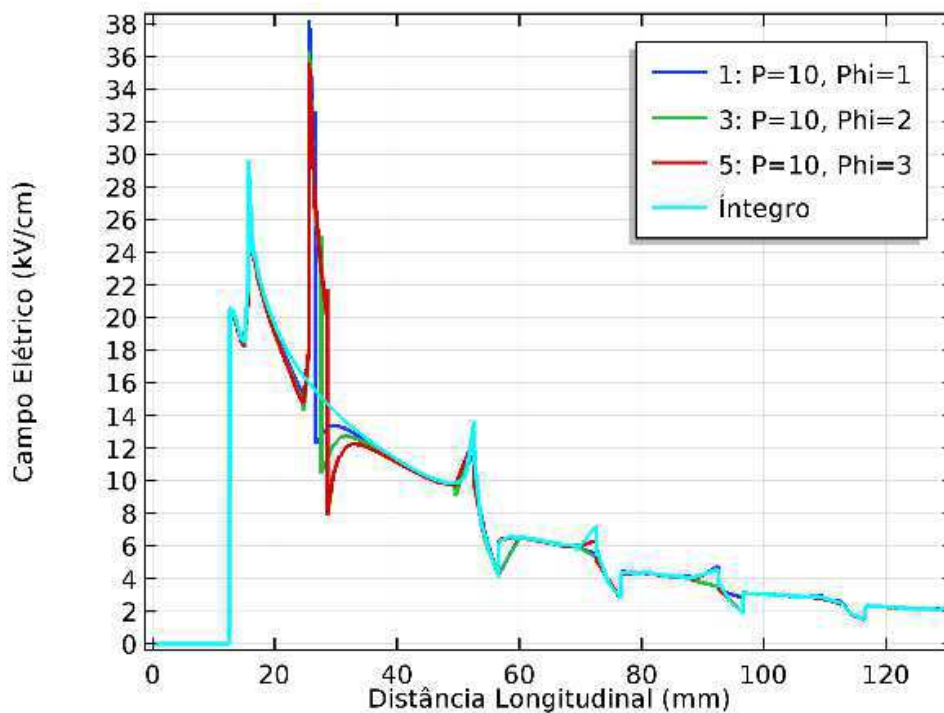
5.2 DEFEITO EXTERNO

Além do caso íntegro relatado, o isolador foi submetido a aplicação de defeito externo (núcleo exposto) na sua estrutura. Desse modo, também foi traçada uma linha longitudinal no decorrer do revestimento do isolador, com o objetivo de determinar a intensidade de campo elétrico ao longo da sua extensão. Como para maiores distâncias do terminal fase o campo elétrico possui baixa intensidade e variação, a linha longitudinal possui dimensão que atinge a primeira aleta do Isolador 1 e a terceira aleta do Isolador 2, com o mesmo comprimento para ambos.

Os gráficos destacados na Figura 27 apresentam o comportamento do campo elétrico nos isoladores 1 e 2, com a presença do defeito externo em $P = 10$ mm e com ϕ variando o seu valor em 1, 2 e 3 mm.

Figura 27 - Campo Elétrico ao Longo do Isolador para as Três Cavidades Localizadas em 10 mm.





Isolador 2

Fonte: Autoria Própria.

Com base nos gráficos da Figura 27, pode ser observado que o aumento da espessura da cavidade provoca uma diminuição na intensidade do campo elétrico, com destaque para os picos nas arestas. Uma explicação para esse fenômeno é a presença de um dielétrico uniforme que forma um anel sob diferença de potencial, cujo comportamento elétrico está em conformidade com as bordas de um capacitor, região que apresenta picos de campo elétrico.

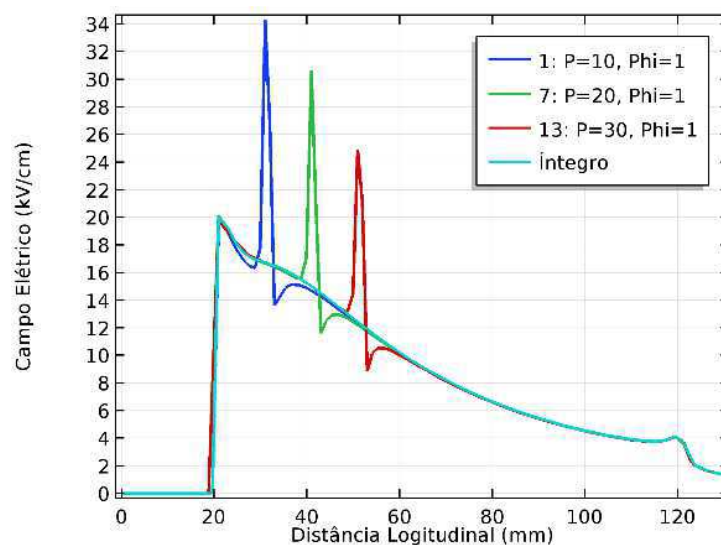
Desse modo, optou-se por conduzir a análise a partir da maior intensidade de campo elétrico obtida, pois para condições atmosféricas padronizadas e em presença de campo elétrico uniforme, o valor limite de campo elétrico para a ocorrência do processo de ionização do ar é de 26 kV/cm (COORAY, 2014).

Isto posto, o pico de campo elétrico chega a 34 kV/cm no Isolador 1 e 38 kV/cm no Isolador 2, quando a espessura da cavidade é de 1 mm. Em condições atmosféricas padronizadas e de campo uniforme, este valor já seria capaz de originar ionização localizada. Contudo, considerando que o campo elétrico é altamente não uniforme na região, aumenta-se a probabilidade de bombardeamento do material polimérico pela ação do campo elétrico, cujos valores são altos e capazes de provocar formação de corona ou ruptura elétrica localizada.

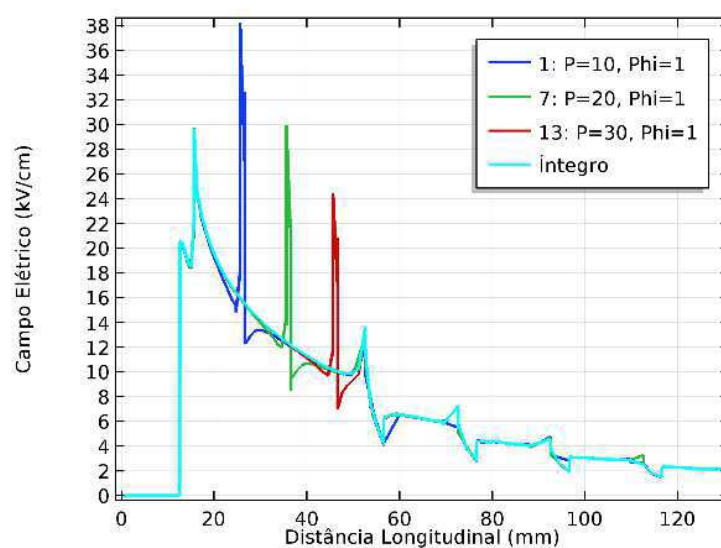
Ainda assim, na Figura 28, são representados os gráficos que relacionam a

cavidade em três posições com relação ao terminal fase e para uma mesma espessura.

Figura 28 - Campo Elétrico ao Longo do Isolador para Três Cavidades com Espessura de 1 mm.



Isolador 1



Isolador 2

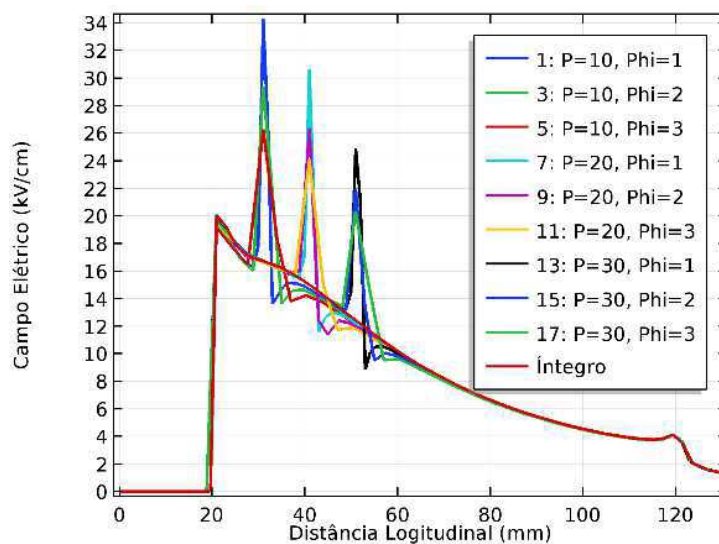
Fonte: Autoria Própria.

Considerando o caso apresentado na Figura 28 os valores de campo elétrico observados são maiores conforme as cavidades estão localizadas mais próximas ao terminal fase, pois as distribuições de potencial são maiores e, por consequência, os valores de campo elétrico também. Para cavidades localizadas a 90 mm do terminal fase, os valores de intensidade de campo elétrico não são altos o suficiente para provocar formação de corona ou ruptura elétrica localizada. No entanto, para P igual a 10 e 20 mm, com espessura da cavidade de 1 mm, o valor de campo elétrico ultrapassa 26 kV/cm em

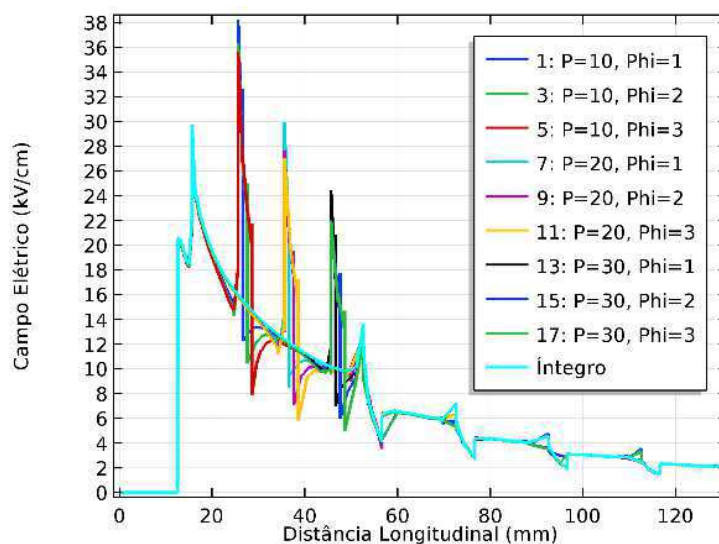
ambos os isoladores, podendo originar estresses elétricos que se tornam danosos a sua estrutura.

Finalmente, todos os casos analisados, seja para as distâncias do terminal fase, seja a espessura da cavidade, foram elencados na Figura 29.

Figura 29 - Todos os Casos Analisados para o Isolador 1 em (a) e Isolador 2 em (b).



(a)



(b)

Fonte: Autoria Própria.

Todas as análises referentes ao comportamento do campo elétrico nos isoladores foram efetuadas anteriormente. Sendo assim, é relevante mencionar que os picos de campo elétrico nas bordas das cavidades são mais intensos no Isolador 2, como pode ser visualizado na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de Campo Elétrico nas Bordas da Cavidade para Todos os Casos Simulados.

Campo Elétrico (kV/cm)						
	Isolador 1			Isolador 2		
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₁	P ₂	P ₃
Φ ₁	34,4	30,6	25,1	38,2	29,9	24,2
Φ ₂	29,4	26,2	21,9	36,2	27,6	21,9
Φ ₃	26,2	24,2	20,4	35,7	27,2	21,8
I	16,8	15,4	12,8	15,7	12,4	10,2

P₁ = 10 mm; P₂ = 20 mm; P₃ = 30 mm; Φ₁ = 1 mm; Φ₂ = 2 mm; Φ₃ = 3 mm e I = Íntegro

Fonte: Autoria Própria.

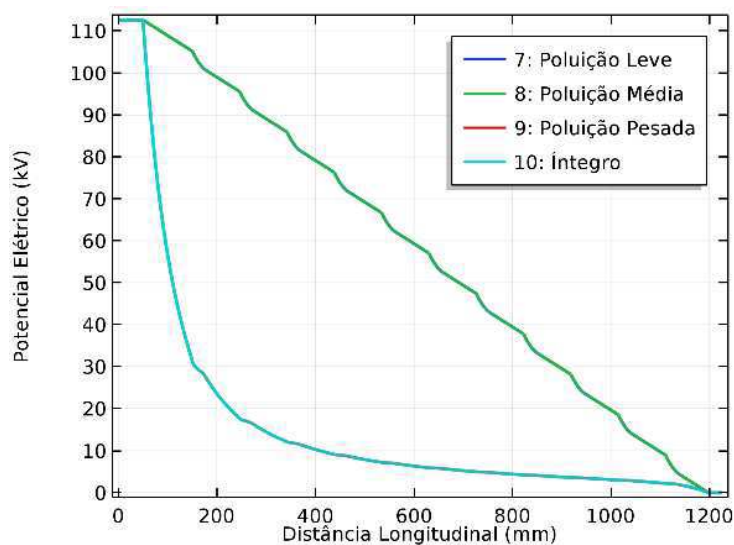
Na Tabela 6, quando se compara o campo do isolador íntegro com o isolador que apresenta cavidades, observa-se que há um crescimento acentuado do valor do campo elétrico na região da cavidade. No Isolador 1, para Φ igual a 1 mm e P igual a 10 mm, pior caso analisado, tem-se que o aumento do campo elétrico foi de 17,6 kV/cm, o que representa 104,7 % acima do caso íntegro. Já para o Isolador 2, considerando o mesmo caso, tem-se que o aumento foi de 22,5 kV/cm, representando 143,31 % do caso íntegro. Além disso, é possível inferir por meio dos dados da tabela, que o Isolador 2 possui maiores amplitudes de campo elétrico para todos casos que se faz presente a cavidade, com exceção para P = 30 mm e Φ igual a 3 mm. No caso íntegro, a intensidade de campo elétrico é maior no Isolador 1, porém não apresenta grandes disparidades entre os isoladores.

5.3 POLUIÇÃO

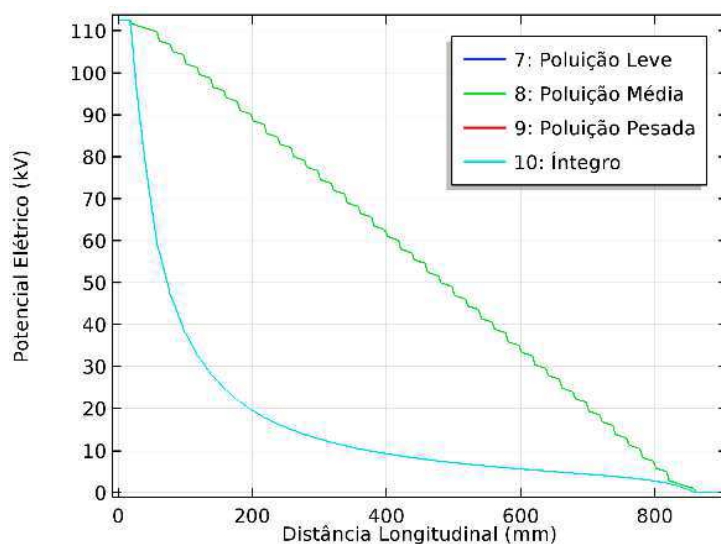
Nesta seção será apresentada os resultados das simulações computacionais para campo elétrico e potencial, quando o isolador está submetido a aplicação de uma camada condutiva na sua superfície, que por sua vez simula os efeitos da poluição. Para tanto, utilizou-se da linha longitudinal que foi traçada nos casos anteriores, com o objetivo de determinar a influência da poluição no desempenho elétrico do isolador.

Assim, na Figura 30, pode ser observado o comportamento do potencial elétrico ao longo da linha longitudinal que se inicia no terminal fase e termina no terminal terra.

Figura 30 - Potencial Elétrico ao Longo da Linha Longitudinal.



Isolador 1



Isolador 2

Fonte: Autoria Própria.

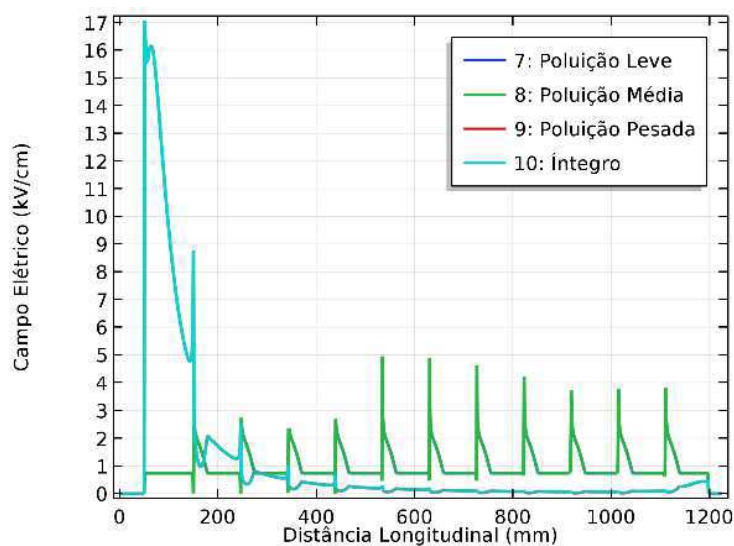
Verifica-se, para ambos os casos, que a presença da poluição acarreta no aumento do potencial elétrico ao longo do isolador, tomando uma característica que remete a linearidade. Além disso, nota-se que o aumento da poluição não ocasiona variação no comportamento do potencial, mantendo o mesmo padrão e intensidade para os três níveis de poluição simulados.

Comparando os resultados dos isoladores íntegros e com poluição, percebeu-se que o comportamento da distribuição de potencial outrora isolante, passou a se mostrar resistivo, comprometendo a capacidade de isolamento dos isoladores.

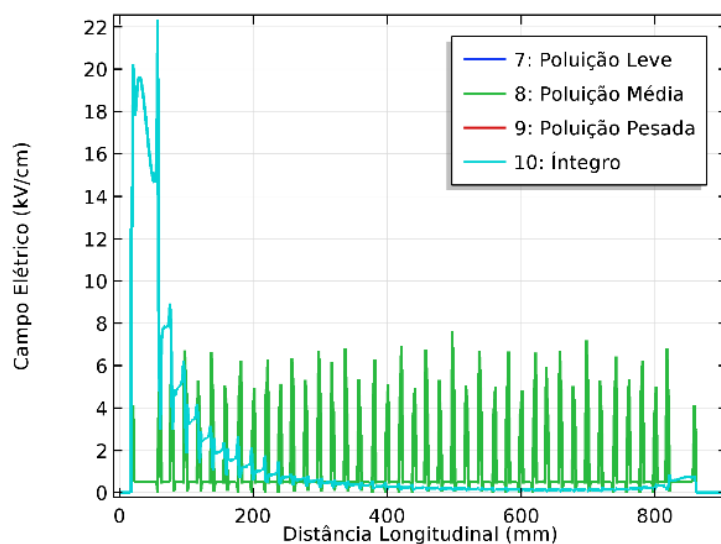
Além disso, no Isolador 2 a curva de potencial (com poluição) apresenta mais

distorções que o Isolador 1, porém o valor do potencial não apresenta grandes disparidades para uma mesma distância. Já quando se analisa o campo elétrico, há variação de intensidade entre os isoladores para uma mesma distância, conforme pode ser observado na Figura 31.

Figura 31 - Gráficos do Campo Elétrico com Presença de Poluição.



Isolador 1



Isolador 2

Fonte: Autoria Própria.

Assim como ocorreu para o comportamento do potencial, o campo elétrico se mostra com a mesma intensidade para os três níveis de poluição, já que há uma relação proporcional entre as grandezas citadas. Desse modo, constata-se que o campo elétrico se comporta de maneira semelhante ao potencial, no sentido de aumentar o número de

regiões em que é mais intensa.

Dessa forma, a intensidade do campo elétrico se apresenta com maior quantidade de picos no Isolador 2, que por sua vez possui 41 picos de campo elétrico no decorrer da sua estrutura, ao passo que o Isolador 1 apresenta 11 picos de campo elétrico. Além disso, o Isolador 2 possui maiores intensidades de campo elétrico, passando em alguns pontos de 6 kV/cm, enquanto no Isolador 1, o valor de campo elétrico não ultrapassa 5 kV/cm.

Por se tratar de um isolador com uma camada condutiva na sua superfície, também se faz necessário a medição da corrente de fuga para o terra, conforme pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 7 - Corrente de Fuga e Potência Absorvida pelos Isoladores sob Poluição

Tipos de Poluição	Isolador 1		Isolador 2	
	Corrente (A)	Potência (W)	Corrente (A)	Potência (W)
Leve	$5,38 \times 10^{-6}$	0,61	$4,69 \times 10^{-6}$	0,53
Média	$5,38 \times 10^{-5}$	6,10	$4,69 \times 10^{-5}$	5,30
Pesada	$8,09 \times 10^{-4}$	90,92	$7,04 \times 10^{-4}$	79,30
Sem Poluição	$4,92 \times 10^{-11}$	$5,60 \times 10^{-6}$	$4,92 \times 10^{-11}$	$5,55 \times 10^{-6}$

Fonte: Autoria Própria.

Dentre as grandezas analisadas nessa seção apenas a corrente e a potência variaram conforme aumentou-se a intensidade de poluição na superfície do isolador. Além disso, a corrente aumentou proporcionalmente a condutividade empregada na camada condutiva, assim como a potência, que caracteriza o aumento de perdas.

No caso íntegro, para ambos os isoladores, a corrente e a potência apresentaram valores muito baixos e condizentes com a operação normal do isolador. Com a presença de poluição, a corrente aumentou expressivamente, atingindo o valor de 809 μ A no Isolador 1 e 704 μ A no Isolador 2. Já a potência atingiu o valor de 90,92 W no Isolador 1 e 79,30 W no Isolador 2.

Os resultados de potência demonstram que a intensificação da poluição acarreta no aumento de energia no decorrer do isolador, influenciando no aquecimento do mesmo e, por consequência, aumentando a probabilidade de degradação do material polimérico, bem como de falha do isolador. Dessa forma, os valores de corrente e potência se fazem mais intensos no Isolador 1, que por sua vez se torna mais susceptível a ocorrência de falhas na presença de poluição.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS ISOLADORES 1 E 2

A análise do comportamento dos isoladores íntegros, constatou que o pico de campo elétrico é maior no Isolador 2, que por sua vez apresenta maiores distorções de campo ao longo de sua estrutura, pois há presença de um número maior de aletas. Sendo assim, a escolha para o referido caso analisado é do Isolador 1.

O segundo caso analisado foi da aplicação de defeito externo no revestimento polimérico do isolador. Nesse caso, o campo elétrico também apresenta maiores intensidades no Isolador 2, possuindo seis casos que possibilitam os meios necessários à degradação do isolador, pois são suficientes para provocar ionização. Apesar do Isolador 1 também apresentar casos que provocam desgaste no revestimento polimérico, possuem valores de campo elétrico menores, sendo o isolador recomendado para o caso em que há alta incidência de defeitos no revestimento do isolador por ação externa, tais como vandalismo.

Quando se considera a poluição, o potencial se apresentou mais uniforme em ambos os isoladores. No entanto, o Isolador 2 obteve uma quantidade maior de regiões em que o campo elétrico é intenso, apesar de não apresentar grandes amplitudes. Todavia, a corrente e a potência elétrica apresentam maiores intensidades no Isolador 1, o que acarreta aumento de perdas pelo isolador, bem como aquecimento da estrutura, o que pode causar danos no seu material.

Desse modo, conclui-se que o Isolador 1 apresenta-se como melhor opção no desempenho dos isoladores frente a estresses causados por danos na sua estrutura física (defeito externo), tal como vandalismo, pois apresentou os menores valores de campo elétrico. Enquanto que o Isolador 2 apresenta menores valores de corrente e perdas, sendo recomendado o seu uso em localidades que apresentam elevado grau de poluição, como por exemplo, próximos a vegetação abundante.

Comparando o desempenho geral entre os dois tipos de isoladores, constata-se que o Isolador 1 consiste na melhor opção, pois apresenta os menores valores de potencial e campo elétrico. Apesar do Isolador 1 não apresentar um desempenho compatível ao Isolador 2 quanto a corrente de fuga e perdas, possui um desempenho satisfatório e sem discrepância elevadas.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, simulações computacionais de cálculo de campo elétrico e potencial foram realizadas em isoladores poliméricos íntegro, com defeitos externo e sob o efeito de poluição. Os resultados obtidos foram comparados entre duas topologias de isoladores de diferentes fabricantes. As simulações se mostraram eficientes, versáteis e com interface amigável, possibilitando o diagnóstico do isolador a ser escolhido.

De posse dos resultados de campo elétrico, potencial, corrente e perdas, para os isoladores íntegros, foi observado a característica isolante de ambos, com baixas intensidades das grandezas avaliadas e com valores que não comprometem o desempenho elétrico do isolador.

A análise do comportamento do campo elétrico constatou que a presença de um defeito externo no revestimento de um isolador polimérico, núcleo exposto, ocasiona distorção na distribuição de campo elétrico do isolador. Quando se analisou o campo elétrico com relação a espessura do defeito, constatou-se que quanto maior a espessura menor será o campo elétrico. Adicionalmente, quando se analisou o campo elétrico com relação à posição do defeito, constatou-se que quanto mais próximo o defeito do terminal fase, maior será o campo elétrico, com intensidades suficientes para provocar ionização e ruptura elétrica localizada.

Comparando os resultados dos isoladores com e sem a presença de poluição, percebeu-se que o comportamento da distribuição de potencial outrora isolante, passou a se mostra resistivo, comprometendo a capacidade isolação do isolador. Na análise do campo elétrico também se percebeu o aumento do campo elétrico com a presença da poluição, o que pode acarretar o desgaste precoce do isolador. Em termos de corrente de fuga, constatou-se também sua elevação com o aumento da poluição, o que implica no aumento de perdas.

Finalmente, com todas as simulações realizadas, foi possível realizar um diagnóstico comparativo do desempenho elétrico dos isoladores, levando em conta a presença de poluição e defeito externo na sua estrutura. Comparando os resultados para os dois isoladores, constatou-se que o Isolador 1 se faz melhor escolha em localidades que apresentam alta incidência de vandalismo ou de danos no revestimento causados por animais, enquanto o Isolador 2 apresenta os melhores resultados na presença de poluição. Entretanto, o Isolador 1 apresenta um desempenho geral melhor, pois manifesta menores

valores de campo elétrico em todas as condições simuladas, bem como índices de corrente de fuga e perdas que não são discrepantes ao Isolador 2.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Segue alguns trabalhos que podem ser desenvolvidos na continuidade da pesquisa:

- Aumentar o contingente de defeitos no isolador, averiguando defeitos com geometria 3D na sua estrutura;
- Realizar simulações por análise termográfica no isolador;
- Aumentar a variação de poluição ao longo do isolador, cobrindo porcentagens menores ao longo de seu revestimento;
- Utilizar um banco de dados com a resposta de vários isoladores submetidos a defeitos e poluição, para em seguida, utilizar uma rede neural que consiga catalogar o estado operacional do isolador por meio de gráficos de campo elétrico e potencial;
- Abranger a metodologia a inspeções visuais, termográficas, ultravioleta e ultrassom, para realizar uma análise comparativa de isoladores em ensaios.

6.2 PUBLICAÇÕES

Duas publicações foram oriundas desse trabalho:

- NETO, A. F. L., COSTA, E. G., DIAS, B. A., SOUSA, J. P. C., MELO, J. V. J. *Análise por Campo Elétrico da Presença de Cavidades Internas em Isoladores Poliméricos Íntegro Tipo Pino sob Poluição*. XIV Congreso Internacional de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico. Guadalajara, Jalisco, México, Octubre 28 – 31, 2019.
- DIAS, B. A., DINIZ, L., COSTA, E. G., NETO, A. F. L., ROCHA, J. M. L., MORENO, V.G. *Análise Comparativa do Desempenho Elétrico de Isoladores Tipo Pino sob Diferentes Condições de Poluição*. Revista Principia (João Pessoa), 2019. (Aceito para Publicação).

REFERÊNCIAS

ALBANO, M., WATERS, R.T., HADDAD, A. *Visual and Infrared Techniques for the Assessment of Partial Arcs on Conventional and Textured Insulator Surfaces*. The 20th International Symposium High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, August 27 – September 01, 2017.

ALLBIZ. *Isolador Polimérico Tipo Pilar – Tipo IPBPL*. Disponível em: <<https://all.biz/br-pt/isoladores-polimricos-tipo-pilar-tipo-ipbpl-g51748>>. Acesso em: outubro, 2019.

AOUABED, F. et al. *Conductivity effect on the flashover voltage of polluted polymeric insulator under AC voltage*. 45th International Universities Power Engineering Conference UPEC2010. IEEE, 2010.

BEZERRA, R. DA C. *Desenvolvimento de Metodologia de Inspeção Instrumental para Avaliação da Corrosão em Pinos de Isoladores de Vidro Usados em Linhas de Transmissão*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2015.

BONOMO, A. *Estudo sobre isoladores poliméricos à base de resinas poliuretanas para ambiente externo*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

COORAY, V. *The Lightning Flash*. 2nd ed, ISBN 978-1-84919-691-8, Londres, UK: IET The Institution of Engineering and Technology, 2014.

COSTA, E. G., FERREIRA, T. V., NERI, M. G., QUEIROZ, I. B., & GERMANO, A. D. *Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 16, p. 985-992, 2009.

DIAS, B. A., COSTA, E. G., FERREIRA, T. V., GERMANO, A. D., BRITO, K.B., BARBOSA, L.A., SILVA NETO, A. I., BEZERRA, R. C., SILVEIRA, S., PAIVA, R. S., MELLO, D. R. *Simulação Computacional dos Efeitos do Limo sobre Isoladores de Vidro*. Decimo Séptimo Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré, XVII ERIAC, Maio, 2017.

DIAS, B. A., DINIZ, L., COSTA, E. G., NETO, A. F. L., ROCHA, J. M. L., MORENO, V.G. *Análise dos Efeitos da Poluição em Isoladores Poliméricos Tipo Pino*. The 3rd International Workshop on Advanced Dielectrics and Applications – IWADA 2019. Campina Grande, PB, Brazil, April 24 – 26, 2019.

DINIZ, L., COSTA, E. G., DIAS, B. A., NETO, A. F. L., ROCHA, J. M. L., MORENO, V.G. *Análise de Isoladores Poliméricos Íntegro e com Defeito Externo por Campo Elétrico*. The 3rd International Workshop on Advanced Dielectrics and Applications – IWADA 2019. Campina Grande, PB, Brazil, April 24 – 26, 2019a.

DINIZ, L. *Aprimoramento de Inspeções Termográficas de Linhas de Transmissão Correlacionando Temperatura e Campo Elétrico*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019b.

DOMINGUES, E. S. *Improved Condition Monitoring of Composite Insulators*. Tese de Doutorado. University of Manchester, Manchester, 2012.

ELO. *Produtos Elétricos*. Disponível em: <<http://eloeletrico.com.br/portal/modules/rmms/prods.php?idp=423>>. Acesso em: outubro, 2019.

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

GOMES, T. S. C., BEZERRA, R. C., TEIXEIRA, J. M. T. *Gestão do Uso de Isoladores Poliméricos na Eletrobras Eletronorte*. XV-ERAC - Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.

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

JIANG, H.; TU, Y.; YUAN, Z.; WANG, C. *Calculation and Optimization of Electric Field of Insulators with Internal Grading Ring*. In: 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). IEEE, 2018. p. 315-318.

KHALED, A., EL-HAG, A., ASSALEH, K. *Equivalent salt deposit density prediction of outdoor polymer insulators during salt fog test*. 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), IEEE, 2016.

KONE, G.; VOLAT, C.; EZZAIDI, H. *Numerical investigation of electric field distortion induced by internal defects in composite insulators*. High voltage, v. 2, n. 4, p. 253-260, 2017.

LEITE, R. C.; BEZERRA, R. C.; TEIXEIRA JR, J. M. T. *Detecção e Identificação de Defeitos Através da Medição de Campo Elétrico ao Longo de Isoladores Poliméricos*. XV ERIAC - Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.

LOPES, D. S. *Modelo de elementos finitos aplicado na avaliação de desempenho de isolantes em ambientes contaminados*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

MAURIZIO. *Isolador de Ancoragem ou Suspensão*. Disponível em: <http://www.maurizio.com.br/produtos/8/8/7/Isolador_de_Ancoragem_ou_Suspens%C3%A3o>. Acesso em: outubro, 2019.

MARTINS, R. *Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia e Ciências dos Materiais. Universidade Federal do Paraná – UFPR. 2015.

MAVRIKAKIS, N. C., SIDERAKIS, K. PYLARINOS, D., KOUDOUMAS, E. *Assessment of Field Aged Composite Insulators Condition in Crete*. 9th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South Eastern Europe, Nicosia, Cyprus, 25-26 September, 2014.

MENDONÇA, P. L. *Diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em Isoladores Compósitos de classe de tensão de 69KV através de radiografia computadorizada*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

NEEDPIX. *Edit The Power Line Insulation Technology Free Picture*. Disponível em: <<https://www.needpix.com/photo/edit/1013380/the-power-line-insulation-technology->

incomunicado-the-executive-board-free-pictures-free-photos-free-images-royalty-free>. Acesso em: outubro, 2019.

NERI, M. G. G. *Avaliação de técnicas de monitoramento de isoladores poliméricos*. Dissertação de Mestrado. EPIM, 2005.

NIGRI, A. I. *Desempenho de Linhas de Transmissão. Ponto de Vista da Manutenção*. XV-SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 1999.

NORRIE, D. H., VRIES, G. *An Introduction to Finite Element Method*. London, Academic Press, 1978.

PUSHPA, Y. G.; VASUDEV, N. *Artificial pollution testing of polymeric insulators by CIGRE round robin method-withstand & flashover characteristics*. 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), IEEE, p. 270-274, 2017.

PHILLIPS, A. *Electric field distribution and their impact on transmission line composite insulators*. In: PES T&D 2012. IEEE, 2012. p. 1-3.

ROCHA, P. H. V. *Estimação da Poluição de Isoladores em Linhas de Transmissão a Partir da Irradiação RF*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

SADIKU, M. N., “O Elemento de Eletromagnetismo”. Trad. Liane Ludwig Loder e Jorge Amoretti Lisboa – 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

SHUNMUGAM, S. S., SUDALAI, S., VASUDEV, N., KUMAR, M. K., BHOWMICK, B. N., SUNKARA, B. R. R. *Insulator Pollution Mapping of the Northern Region of the Indian Power System*. The 20th International Symposium High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina, August 27 – September 01, 2017.

STEFENON, S. F. *Estudos das Técnicas de Inspeção de Redes de Distribuição Para a Identificação e Classificação de Defeitos em Isoladores Através do Uso de Ultrassom*. Dissertação de Mestrado. Universidade Regional de Blumenau, 2015.

VGSGROUP. *Isolador de Pino Polimérico*. Disponível em: <<https://www.vgsenergia.com.br/produtos/isoladores-polimerico/isolador-de-pino-polimerico/>>. Acesso em: outubro, 2019.

VOLAT, C. *Comparison Between the Use of Surface and Volume Conductivity to Compute Potential Distribution along an Insulator in Presence of a Thin Layer. Electrical*. Insulation Conference, Ottawa, Canadá, Junho, 2013.