

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

GABRIEL LOPES DE SOUZA

**Alguns aspectos de seleção e desempenho de buchas e isoladores para capacitores de
potência**

São Paulo
2021

GABRIEL LOPES DE SOUZA

**Alguns aspectos de seleção e desempenho de buchas e isoladores para capacitores de
potência**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Luiz Lebensztajn

São Paulo
2021

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de novembro de 2021

Assinatura do autor: 

Assinatura do orientador: 

Catálogo-na-publicação

Lopes de Souza, Gabriel

Alguns aspectos de seleção e desempenho de buchas e isoladores para capacitores de potência / G. Lopes de Souza, L. Lebensztajn -- versão corr. -- São Paulo, 2021.

98 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Sistemas de potência 2.Capacitores de potência 3.Campo elétrico
4.Dispositivos isolantes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.
III.Lebensztajn, Luiz

Agradecimentos

A materialização desta dissertação não seria, nem de perto, possível sem o suporte, o incentivo e o zelo de tantas pessoas, em diversas formas. Agradeço a cada um que divide ou dividiu a sua própria jornada comigo e aqui expresso profunda gratidão pelo tanto que me ensinaram. Estendo esta ação de reconhecimento a todos os meus educadores. Por meio deles, aprendi a apreciar cada fase do meu desenvolvimento cognitivo, físico e intelectual. O resultado das suas decisões de ensino perdura indefinidamente.

Em especial, sou grato ao apoio incomensurável dedicado pelo meu orientador, Prof. Dr. Luiz Lebensztajn. Por meio de seus gestos, fui exposto a uma das mentes mais sutis com quem já trabalhei. Além da sua contribuição crítica para o desenvolvimento deste trabalho, foram as suas palavras que me mantiveram no rumo correto. Pelo tempo investido, paciência e inteligência, eu agradeço.

Também, expresso aqui a alegria que é ter o suporte incondicional da minha família. Tivemos dias bons e dias ruins, mas – em todos eles – tivemos coragem. Pelo amor e apoio irrestritos, eu agradeço à minha esposa, Amanda Lopes, às minhas irmãs – Fernanda, Flávia e Débora Lopes - e à minha mãe, Lenilda Lopes. Cada uma de vocês é corresponsável pelas oportunidades que decorreram antes e que decorrem depois deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os engenheiros e pesquisadores com os quais tive, em algum instante, saudáveis discussões nos tópicos aqui relacionados. Nomeio, entre tantos colegas e profissionais, os senhores Alexandre Moriel, Bruno Freitas, Douglas Vargas, Edmar Mattos, Fabiano Hembecker, Felipe Lopasso, Henrique Agrelli, Jean Christmann, Lucas Bittencourt, Dr. Lucas Koleff, Lucas Sabino, Marcelo Fernandes, Miguel Mühlenkamp, Renato Monteiro, Rodrigo Zeneri, Sérgio Yamazaki, Dr. Sthéfano Andrade e as senhoras Renata Baraldi, Renata Costa e Thaís Komatsu. Certamente, destaco o senhor Sérgio Yamazaki pelas suas profundas contribuições.

É o exercício diário do embate, sob respeito mútuo, que produz e compartilha conhecimento.

*“In dem ‘Ich will!’ liegt eine mächtige
Zauberkraft, wenn es ernst damit ist und
Tatkraft dahintersteht! Freilich darf man
Hindernisse und Umwege nicht scheuen
und darf in keinem Augenblick sein Ziel
aus dem Auge lassen!”*

Werner von Siemens

Resumo

Este trabalho tem a pretensão de contribuir para estudos e pesquisas sobre buchas e isoladores para bancos de capacitores de potência. Aspectos relativos ao desempenho dielétrico destes componentes são avaliados utilizando-se modelos computacionais baseados no Método dos Elementos Finitos. Os cenários de avaliação incluem a seleção de buchas para unidades capacitivas de alta tensão e de isoladores para aplicação em bancos de capacitores de potência. Algoritmos de aprendizagem de máquina são usados em problemas multivariáveis e, assim, um problema inverso é estabelecido. Como resultado, através de diversos casos análogos a aplicações reais, analisa-se criticamente opções de projeto e suas consequências.

Palavras-chave: sistemas de potência, capacitores de potência, buchas, isoladores, campo elétrico.

Abstract

The present work aims to contribute to research works about bushings and insulators used in power capacitor banks. Topics related to the dielectric performance of bushings and insulators are evaluated by means of numerical studies based on the Finite Elements Method. Evaluation cases comprise selection of bushings applicable to high-voltage capacitor units and selection of insulators applicable to power capacitor banks. Machine Learning algorithms are used for multivariate analyses, and then an inverse problem is defined. As a result, by means of several cases having real application correspondence, design choices and their consequences are analyzed.

Keywords: power systems, power capacitors, bushings, insulators, electric field.

Lista de figuras

Figura 1 – Representação esquemática simplificada de um capacitor monofásico.....	20
Figura 2 – Configurações típicas de conexão entre elementos capacitivos.....	21
Figura 3 – Configurações típicas de conexão entre unidades capacitivas.....	21
Figura 4 – Exemplo de banco de capacitores em derivação.....	22
Figura 5 – Representação esquemática de uma plataforma com banco de capacitores série ...	23
Figura 6 – Perfuração em bucha de porcelana.....	26
Figura 7 – Parâmetros para cálculo de isolamento em bancos de capacitores	27
Figura 8 – Uma bucha com seis saias.....	34
Figura 9 – Distâncias de escoamento e de isolamento	35
Figura 10 – Características de uma bucha vs. quantidade de saias.....	36
Figura 11 – Detalhe do raio interno da representação de uma bucha com 6 saias	40
Figura 12 – Duas configurações de um isolador com 9 saias.....	42
Figura 13 – Discretização do objeto de estudo: isolador com 9 saias	43
Figura 14 – Potencial elétrico escalar ao longo do escoamento – isolador com 9 saias	44
Figura 15 – Intensidade de campo elétrico ao longo do escoamento – isolador com 9 saias...45	
Figura 16 – Intensidade de campo elétrico ao longo do isolamento – isolador com 9 saias....46	
Figura 17 – Domínio e objeto de estudo contendo 1 bucha com 7 saias.....	48
Figura 18 – Seção transversal da bucha.....	49
Figura 19 – Discretização do objeto de estudo: bucha com 7 saias	50
Figura 20 – Resultado para o caso de 1 bucha com 7 saias.....	51
Figura 21 – Intensidade de campo elétrico em buchas.....	52
Figura 22 – Unidades capacitivas com uma única bucha.....	54
Figura 23 – Banco de capacitores e uso de múltiplos componentes	55
Figura 24 – Vista da região de interesse: 4 capacitores, suas buchas e conexões.....	55
Figura 25 – Distância entre unidades capacitivas adjacentes	57
Figura 26 – Condições de contorno.....	57
Figura 27 – Segmentos de interesse: 1° ao 13° segmento.....	58
Figura 28 – Segmentos de interesse: 14° ao 19° segmento.....	59
Figura 29 – Resultados da ACP para os 405 casos de estudo	62
Figura 30 – Variância explicada acumulada vs. Quantidade de componentes principais	62
Figura 31 – Análise de silhueta com 2 partições	66
Figura 32 – Análise de silhueta com 3 partições	67

Figura 33 – Análise de silhueta com 4 partições	67
Figura 34 – Análise de silhueta com 5 partições	67
Figura 35 – Análise de silhueta com 6 partições	68
Figura 36 – Análise de silhueta com 7 partições	68
Figura 37 – Observações destacadas em 4 partições	69
Figura 38 – Exemplos de aplicação de anéis anti-corona.....	71
Figura 39 – Deterioração de uma superfície de material isolante devido descarga	73
Figura 40 – Superfícies de cômputo da carga de isolamento: Ω_i	73
Figura 41 – Modelo representativo de um banco de capacitores com 2 anéis anti-corona	74
Figura 42 – Modelo representativo de um banco de capacitores com 2 anéis anti-corona	75
Figura 43 – Planos de corte para apresentação de resultados.....	76
Figura 44 – Resultados do potencial elétrico escalar sobre o plano de corte AA'	77
Figura 45 – Resultados do potencial elétrico escalar sobre o plano de corte BB'	78
Figura 46 – Carga de isolamento vs. Quantidade de anéis anti-corona	79
Figura 47 – Algumas posições do anel anti-corona.....	80
Figura 48 – Carga de isolamento vs. Posição do anel anti-corona.....	81
Figura 49 – Domínio de comparação	91
Figura 50 – Malha de elementos finitos no domínio de comparação	92
Figura 51 – Resultados da comparação	93
Figura 52 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 1 e 2 saias	94
Figura 53 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 3, 4 e 5 saias	95
Figura 54 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 6, 7 e 8 saias	96
Figura 55 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 9, 10 e 11 saias	97
Figura 56 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 12, 13 e 14 saias	98

Lista de algoritmos

Algoritmo 1 – Sequência de passos adotados para análise de sensibilidade de isolador	41
Algoritmo 2 – Sequência de passos adotados para análise de sensibilidade de bucha.....	47
Algoritmo 3 – Análise de Componentes Principais	61
Algoritmo 4 – Método <i>k-means</i>	64
Algoritmo 5 – Análise de silhueta	65

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros associados às classes de poluição	29
Tabela 2 – Conjunto de parâmetros elencados para uma bucha.....	35
Tabela 3 – Características de buchas – alguns casos.....	37
Tabela 4 – Parâmetros para seleção.....	39
Tabela 5 – Classes de poluição compatíveis com os parâmetros	39
Tabela 6 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo.....	42
Tabela 7 – Características do isolador	42
Tabela 8 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo.....	48
Tabela 9 – Resultados de intensidade de campo elétrico (Em) em bucha.....	53
Tabela 10 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo.....	56
Tabela 11 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo.....	75
Tabela 12 – Condições de contorno	92
Tabela 13 – Resultados da comparação.....	93

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
GETDP	<i>General Environment for the Treatment of Discrete Problems</i>
ESDD	<i>Equivalent Salt Deposit Density</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NSDD	<i>Non-Soluble Salt Deposit Density</i>
ONELAB	<i>Open Numerical Engineering Laboratory</i>
SDD	<i>Salt Deposit Density</i>

Lista de símbolos

∇	Operador nabra	[]
\cdot	Produto escalar	[]
σ	Condutividade elétrica	[S/m]
ω	Frequência angular	[rad/s]
j	Unidade imaginária	[]
ε	Permissividade elétrica	[F/m]
ρ	Densidade volumétrica de cargas	[C/m ³]

Sumário

1	Introdução.....	14
1.1	<i>Justificativa para o estudo</i>	<i>15</i>
1.2	<i>Objetivo.....</i>	<i>16</i>
1.3	<i>Metodologia de pesquisa.....</i>	<i>16</i>
1.4	<i>Do documento</i>	<i>17</i>
2	Fundamentos e aplicação de bancos de capacitores de potência	19
2.1	<i>Capacitores de potência.....</i>	<i>19</i>
2.1.1	<i>Bancos de capacitores em derivação</i>	<i>22</i>
2.1.2	<i>Bancos de capacitores série</i>	<i>22</i>
2.2	<i>Distância de isolamento, distância de escoamento e coordenação do isolamento</i>	<i>23</i>
2.3	<i>Buchas e isoladores.....</i>	<i>24</i>
2.4	<i>Ruptura e perfuração</i>	<i>25</i>
3	Revisão bibliográfica.....	27
4	Modelagem do problema de desempenho dielétrico	30
4.1	<i>Formulação do modelo eletrodinâmico</i>	<i>31</i>
4.2	<i>Sobre o Método dos Elementos Finitos.....</i>	<i>32</i>
5	Desempenho de buchas e de isoladores – casos individuais	34
5.1	<i>Descrição paramétrica de bucha e isoladores.....</i>	<i>34</i>
5.2	<i>Seleção de bucha e isoladores</i>	<i>38</i>
5.3	<i>Análise de sensibilidade do desempenho de um isolador</i>	<i>41</i>
5.3.1	<i>Domínio e objeto de estudo</i>	<i>41</i>
5.3.2	<i>Análise numérica – malha</i>	<i>43</i>
5.3.3	<i>Resultados.....</i>	<i>43</i>
5.4	<i>Análise de sensibilidade do desempenho de uma bucha.....</i>	<i>47</i>
5.4.1	<i>Domínio e objeto de estudo</i>	<i>47</i>
5.4.2	<i>Análise numérica – malha</i>	<i>49</i>
5.4.3	<i>Resultados.....</i>	<i>50</i>
6	Análise de sensibilidade de escoamento e de isolamento em banco de capacitores	54
6.1	<i>Descrição do problema</i>	<i>55</i>

6.2	<i>Do tratamento de dados</i>	59
6.3	<i>Redução de dimensionalidade</i>	60
6.4	<i>Resultados da redução de dimensionalidade</i>	61
6.5	<i>Agrupamento</i>	63
6.6	<i>Resultados do agrupamento</i>	66
7	Efeitos da presença de anel anti-corona em banco de capacitores	71
7.1	<i>Considerações sobre carga de isolamento</i>	72
7.2	<i>Descrição do domínio e objeto de estudo</i>	74
7.3	<i>Efeitos da presença de anel anti-corona</i>	76
7.4	<i>Efeitos da posição vertical do anel anti-corona</i>	80
8	Considerações finais	82
9	Referências	84
A	Apêndice – Recursos e validação de resolução numérica	90
B	Apêndice – Extensão dos resultados de análise de sensibilidade	94

1 Introdução

Em sistemas de potência, dispositivos isolantes e dielétricos têm elevada importância para a viabilidade técnica das redes de transporte de energia elétrica em alta tensão. A finalidade e a eficiência operativa do sistema de transporte estão diretamente ligadas à capacidade da rede transmitir potência entre suas terminações sem que ocorram perdas de função ou falhas que comprometam a vida útil dos componentes da rede e a qualidade da energia elétrica transportada. Por isso, condutores em diferentes níveis de potencial elétrico devem ser separados entre si através de elementos dedicados. Estes elementos, aqui chamados de dispositivos isolantes e dielétricos, têm a função específica de se submeter ao campo elétrico presente e garantir que não haja descarga disruptiva ao longo do caminho de isolamento, ainda que haja corrente de deslocamento, de fuga ou não. Sem tais elementos, não seria possível o transporte de energia em alta tensão, como o é amplamente praticado na sociedade.

Técnicas de análise e de ensaios são fundamentais para a seleção de um dispositivo isolante e/ou dielétrico adequado e, apenas através delas, conceitos de engenharia podem ser idealizados e submetidos a prova – permitindo, então, tomada de decisão ótima. Cita-se aqui que o uso de níveis de tensão cada vez maiores em redes de transmissão tem sido possível graças à compreensão do comportamento de materiais isolantes e dielétricos sólidos, líquidos, gasosos e de ambientes sob vácuo (1).

Um dispositivo isolante contém material isolante que, por sua vez, é aquele no qual a banda de valência é uma banda cheia, separada da primeira banda de excitação através de uma banda proibida cuja passagem de elétrons entre a banda de valência e a banda de condução demanda uma quantidade de energia grande o suficiente para causar a ruptura ou perfuração do material (2). Um sistema ou dispositivo isolante é, então, entendido como sendo o conjunto de elementos de material condutor separados por elementos de material isolante entre eles.

Entre os dispositivos isolantes, componentes como buchas e isoladores são utilizados em capacitores de potência, chaves de seccionamento, disjuntores, indutores, para-raios, resistores, torres de sustentação, transformadores, entre outros. Cabos condutores, muflas, terminações e a atmosfera de subestações isoladas a gás ou a ar também contêm componentes isolantes ou são parte de sistemas dielétricos.

No caso de buchas e isoladores, o projeto de cada elemento é escolhido de forma a (i) maximizar o desempenho do sistema isolante durante seu ciclo de vida e a (ii) minimizar o seu custo e esforço de fabricação, montagem e manutenção. Além de garantir solicitações e impedir disrupções, outras questões devem ser levadas em conta para as tomadas de decisão

de cada projeto. Entre estas questões, destacam-se: esforços mecânicos, esforços sísmicos, estanqueidade, amplitude e frequência de variações climáticas e atmosféricas, atmosferas com poluição, névoa salina e/ou outro contaminantes.

Unidades capacitivas, além de serem providas de buchas, também são projetadas com material dielétrico – posicionado em seu interior e que compõe os elementos capacitivos. A seção 2.1 discorre sobre esta característica, ainda que o presente trabalho não tenha a pretensão de avaliar aspectos de seleção e desempenho dielétrico de elementos capacitivos.

1.1 Justificativa para o estudo

O processo de seleção de buchas e isoladores de alta-tensão pode ser feito de maneira determinística ou probabilística (3).

Para a abordagem determinística, o nível de isolamento requerido é baseado em uma análise de pior caso das condições sistêmicas da aplicação e na escolha de fatores de sobredimensionamento, às vezes chamados de fatores de segurança, para acomodar eventuais incertezas.

Para a abordagem probabilística, o nível de isolamento requerido advém da combinação de uma função distribuição acumulada que descreve a capacidade de isolamento em relação às condições sistêmicas e de uma função que descreve a fenomenologia de intensidade de campo elétrico ao qual o sistema será exposto. O produto destas duas funções resulta em uma terceira função, que descreve a densidade de probabilidade de interrupção do sistema dielétrico.

Em ambos os casos, assume-se que a intensidade de campo elétrico e as condições ambientais e atmosféricas têm influência predominante no desempenho do sistema e escolhe-se uma condição de rigidez dielétrica cujo risco de interrupção seja menor do que o limite aceitável para o sistema (4).

Embora haja normas, artigos e pesquisas que tratam de seleção e desempenho de buchas e isoladores (5) (6) (7), pouco há – na literatura – publicações sobre aspectos destes dispositivos em condições de múltipla associação e, concomitantemente, sua associação com o equipamento primário – como se aplica em capacitores de potência. Também, buchas e isoladores ficam submetidos a outros esforços, além do problema de desempenho dielétrico, que demandam atenção e análise conjunta (8). Por fim, ainda há de se considerar a dificuldade

de desenvolvimento de método de ensaio do desempenho dielétrico em condições de poluição natural e em instalações completas de bancos de capacitores.

Por isso, este tema é de elevado interesse de engenheiros, projetistas e pesquisadores da área de sistemas de potência. Igualmente, torna-se importante o uso de modelos numéricos e o uso de técnicas de análise que satisfaçam os objetivos de aplicação de buchas e isoladores em capacitores de potência.

1.2 Objetivo

Este trabalho apresenta modelos para análise numérica do desempenho dielétrico de buchas e isoladores utilizados em capacitores de potência. Entre as condições de análise, além de situações ideais, alguns aspectos relacionados a poluição são verificados. Também, almeja-se a análise de sensibilidade de escoamento e de isolamento em bancos de capacitores – em situações regidas por múltiplas variáveis. Por fim, espera-se verificar alguns efeitos da presença de anel anti-corona.

Concomitantemente, busca-se organizar informações disponíveis em publicações sobre o tema. Por meio daqueles modelos e em conjunto com a literatura, espera-se contribuição à capacidade de análise crítica para a aplicação dos dispositivos aqui estudados.

1.3 Metodologia de pesquisa

A capacitação em disciplinas relativas à otimização e sistemas de potência, a revisão bibliográfica, o estudo de métodos de seleção e cenários de aplicação de buchas e isoladores de capacitores de potência e o desenvolvimento de modelos numéricos compõem as etapas de execução do presente trabalho.

A revisão bibliográfica consiste na pesquisa e análise de publicações sobre buchas e isoladores usados tanto em capacitores de potência, quanto em outros equipamentos de potência.

Ferramentas computacionais baseadas no Método dos Elementos Finitos (MEF) são usadas para a descrição matemática da geometria e para a descrição física do sistema dielétrico. O ambiente computacional utilizado contém as seguintes aplicações: (i) GMSH (9), (ii) GETDP (10), (iii) VS CODE (11) e (iv) PYTHON (12). O primeiro é um gerador de

malhas de elementos finitos, que contém funções de pós-processamento e foi desenvolvido por Christophe Geuzaine e Jean-François Remacle. O segundo baseia-se na cohomologia de De Rham (13) para determinar soluções aproximadas de sistemas de equações diferenciais parciais e foi desenvolvido por Patrick Dular e Christophe Geuzaine. O terceiro é um ambiente de edição de códigos-fonte e foi desenvolvido pela empresa Microsoft Corporation. O quarto é uma linguagem de programação de alto nível, funcional, interpretada, imperativa, orientada a objetos e de autoria de Guido van Rossum. Nela, diversas funcionalidades para manipulação de vetores e matrizes multidimensionais, além de ferramentas de edição de gráficos estão disponíveis por meio de bibliotecas de funções.

O uso conjunto e simultâneo do GMSH e do GETDP é possível através de única ferramenta: ONELAB (14). O ONELAB, adicionalmente, possui integração a uma biblioteca com funções de otimização através do Método das Assíntotas Móveis (15) e, também, às linguagens de programação C++ (16) e PYTHON.

Neste trabalho, por meio da orquestração das ferramentas computacionais elencadas, compara-se o desempenho numérico de diferentes geometrias de buchas e isoladores quando submetidos a condições usuais de aplicação em capacitores de potência.

1.4 Do documento

Considerando a justificativa para o estudo, o objetivo e a metodologia de pesquisa apresentados acima, este documento é organizado conforme aqui indicado.

O Capítulo 2 define conceitos associados a capacitores de potência, seus usos e aplicações em sistemas de potência.

O Capítulo 3 elenca e organiza a literatura acerca do tema deste trabalho.

O Capítulo 4 define o modelo físico em que se baseia as análises numéricas apresentadas neste documento. Também, no Capítulo 4 elenca-se, de forma sucinta e elementar, características relacionadas às ferramentas computacionais selecionadas para aplicação do MEF.

O Capítulo 5 contém estudos desenvolvidos em buchas e isoladores quando analisados individualmente.

Os Capítulos 6 e 7 apresentam resultados de pesquisa de aspectos de escoamento e de isolamento em bancos de capacitores. Enquanto o Capítulo 6 propõe técnicas de análise

multivariável, o Capítulo 7 investiga elementos de uniformização de campo elétrico, como anéis anti-corona, sob um critério de desempenho comparativo.

Por fim, o Capítulo 8 indica as considerações finais da pesquisa apresentada neste documento e sugere possibilidades de continuação do trabalho.

2 Fundamentos e aplicação de bancos de capacitores de potência

Capacitores de potência são amplamente utilizados em redes de transporte de energia em alta tensão e, também, em aplicações de baixa tensão. As principais razões para isso incluem melhoria da capacidade de transporte de potência da rede, melhoria de indicadores de qualidade e estabilidade de tensão. Estes benefícios são obtidos através de compensação de potência reativa e filtragem de componentes harmônicos.

Os projetos que fazem uso de capacitores de potência consideram circuitos com componentes exclusivamente passivos ou, então, circuitos com inclusão de componentes ativos – através de eletrônica de potência. Entre as aplicações de capacitores de potência em baixa tensão, por exemplo, tem-se: acionamento de motores e iluminação. De outra forma, entre as aplicações de capacitores de potência em alta tensão, tem-se: compensação série, compensação em derivação, filtragem em derivação, acoplamento de sinais de comunicação, estabilidade de tensão e de frequência.

Este trabalho aborda aplicações de capacitores de potência em alta tensão, i.e., com tensão nominal acima de 1 kV, somente.

2.1 Capacitores de potência

Diversas publicações trazem definições sobre capacitores de potência e termos relacionados a capacitores de potência. A seguir, reproduz-se algumas definições relevantes e presentes em textos normativos publicados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pela International Electrotechnical Commission (IEC).

O termo “capacitor” é definido por “dispositivo elétrico utilizado para introduzir capacitância num circuito” (17). Por sua vez, define-se “capacitor de potência” por “capacitor destinado para uso em rede de potência” (18). O termo “unidade capacitiva” é definido por “conjunto de um ou mais elementos capacitivos montados em uma só caixa com terminais acessíveis” (19). Destaca-se que, na literatura, os termos “capacitor”, “capacitor de potência” e “unidade capacitiva” são, usualmente, intercambiáveis. Ainda assim, deve-se atentar que, a depender do propósito de uma publicação, os componentes utilizados no projeto de um capacitor podem assumir terminologia equivalente à do próprio capacitor – o que demanda atenção adicional ao leitor.

Ainda no mesmo texto (19), lê-se: “o termo “capacitor” é utilizado quando não é necessário diferenciar o significado dos termos “unidade capacitiva”, “segmento” ou “fase do banco”. Verifica-se, também no mesmo texto, que “elemento capacitivo” é “parte indivisível de um capacitor de potência, consistindo em placas separadas por um dielétrico”.

No presente documento, o termo “capacitor” deve ser compreendido, simultaneamente, pelos termos “capacitor de potência” ou “unidade capacitiva”, sem prejuízo de significado. A Figura 1 contém uma representação esquemática simplificada de um capacitor.

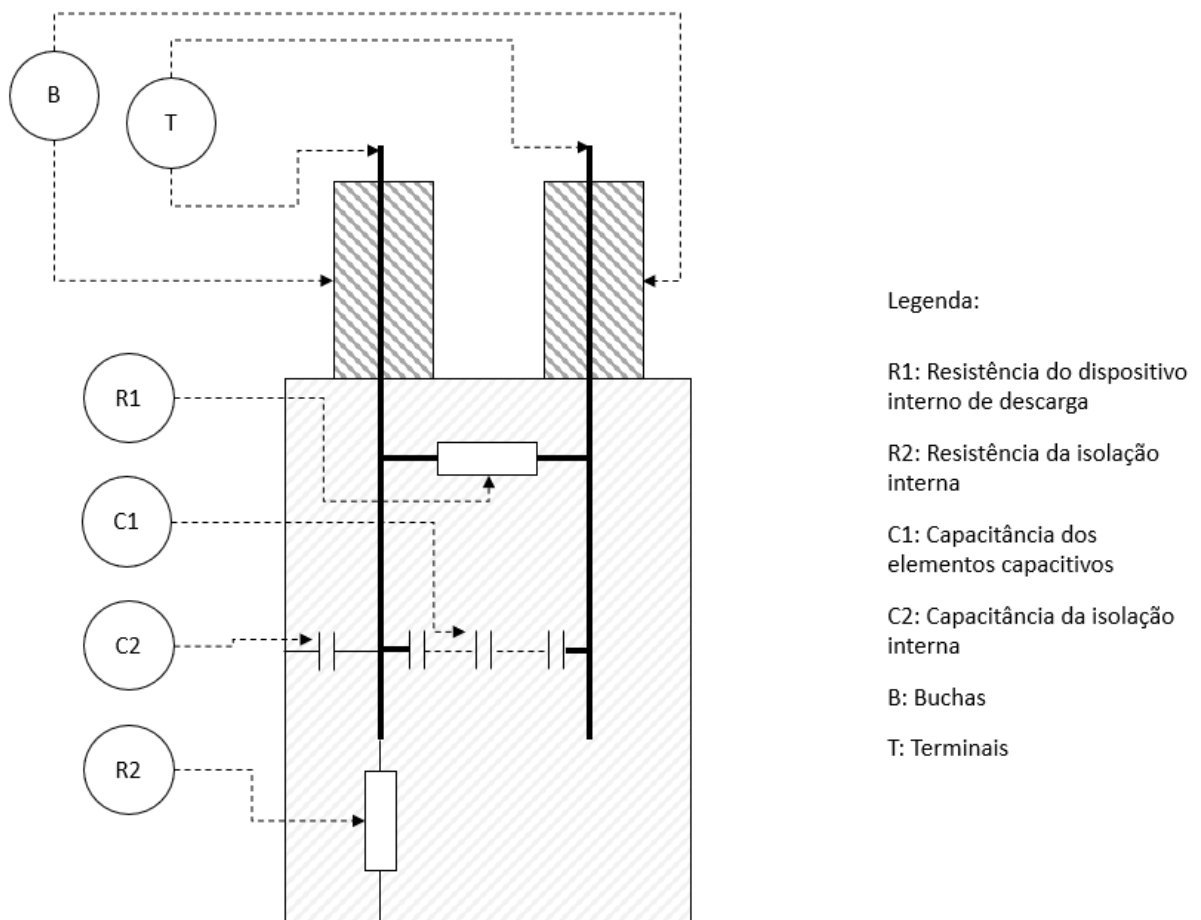


Figura 1 – Representação esquemática simplificada de um capacitor monofásico.

Fonte: adaptado de (20).

Tipicamente, capacitores de potência são construídos com um agrupamento série e paralelo entre elementos capacitivos, adicionados – opcionalmente – de fusíveis internos ou externos e de resistores de descarga - a fim de prover segurança em seu manuseio e descarga para reenergização em tempo reduzido. A Figura 2 apresenta as possibilidades usuais de

construção de capacitores. Nela, a primeira imagem da esquerda para a direita representa um capacitor com fusível interno e as demais imagens representam capacitores sem fusível interno, podendo ou não haver a inserção de fusível externo.

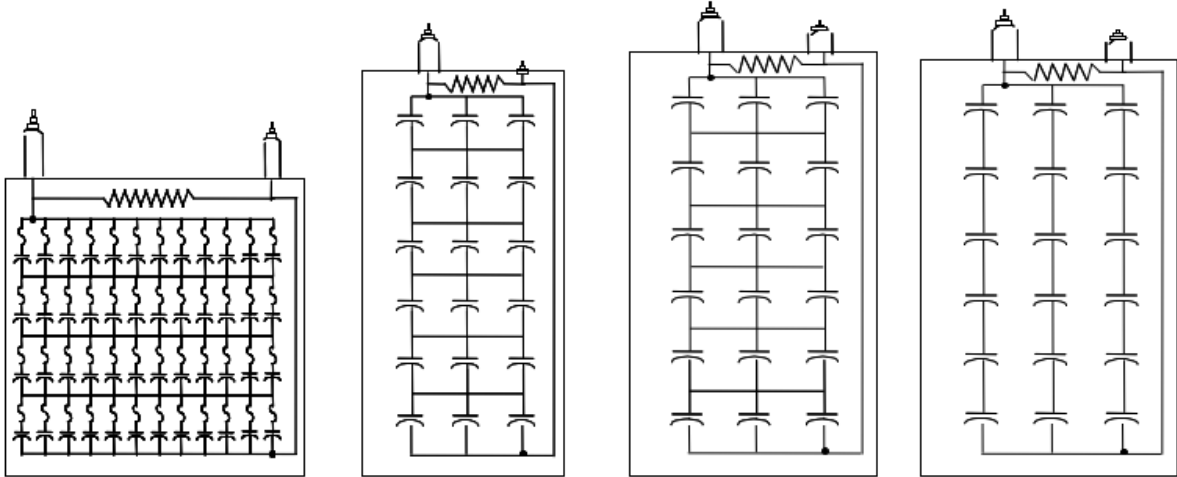


Figura 2 – Configurações típicas de conexão entre elementos capacitivos

Fonte: extraído de (20).

Já a Figura 3 apresenta as possibilidades usuais de agrupamento de capacitores em projetos de bancos de capacitores. Nela, a primeira imagem da esquerda para a direita representa um banco de capacitores constituído de capacitores com fusível interno; a imagem central representa um banco de capacitores constituído de capacitores com fusível externo; e a terceira imagem da esquerda para a direita representa um banco de capacitores sem fusíveis. Estes agrupamentos podem variar, a depender da escolha do projetista.

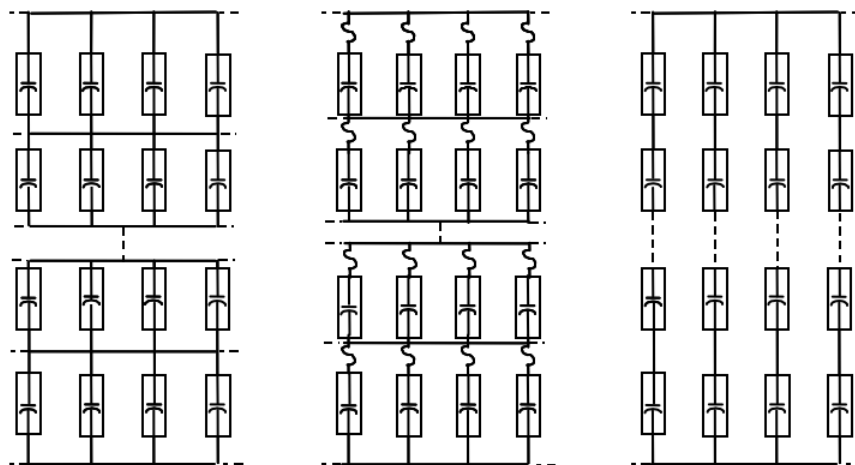


Figura 3 – Configurações típicas de conexão entre unidades capacitivas

Fonte: extraído de (20).

2.1.1 Bancos de capacitores em derivação

Por “bancos de capacitores em derivação” compreende-se a associação de ao menos duas unidades capacitivas, estando os terminais desta associação conectados entre fases do sistema (conexão delta) ou entre fase e neutro do sistema (conexão estrela). Neste caso, a associação de capacitores constitui um ramo que deriva da linha de transmissão ou de distribuição.



Figura 4 – Exemplo de banco de capacitores em derivação

Fonte: extraído de (21).

2.1.2 Bancos de capacitores série

Por “bancos de capacitores série” compreende-se a associação de ao menos duas unidades capacitivas, estando os terminais desta associação conectados em uma mesma fase

do sistema. Neste caso, há uma segmentação no meio da linha de transmissão através do banco de capacitores.

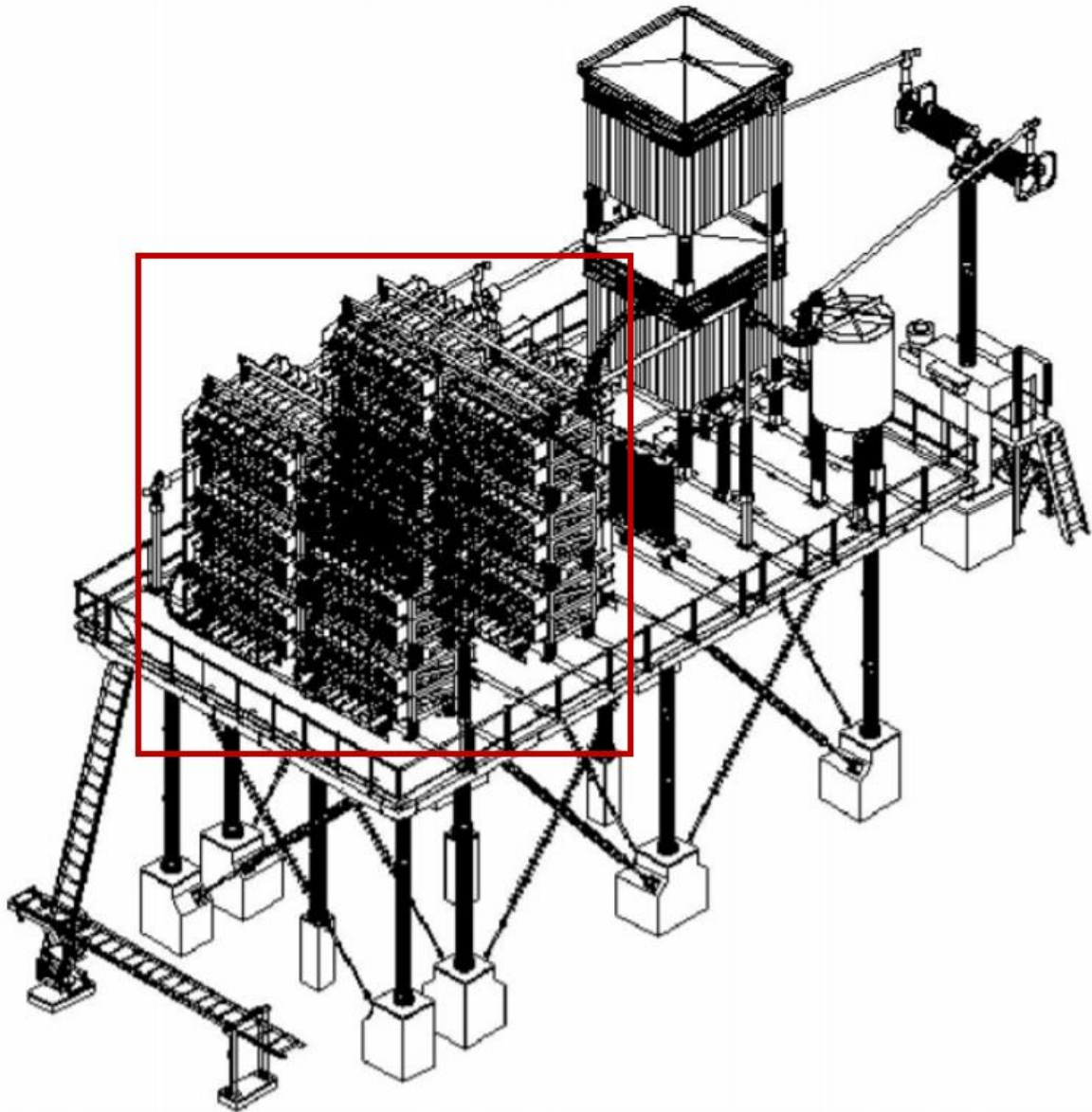


Figura 5 – Representação esquemática de uma plataforma com banco de capacitores série

Fonte: extraído de (22).

2.2 *Distância de isolamento, distância de escoamento e coordenação do isolamento*

Por “distância de isolamento”, entende-se: “distância entre duas partes condutoras, medida ao longo de um fio esticado, segundo o menor trajeto possível entre essas partes” (17).

Por “distância de escoamento”, entende-se: “menor distância entre duas partes condutoras, medida sobre a superfície de isolamento entre essas partes” (17).

Por “coordenação do isolamento”, entende-se: “seleção da suportabilidade dielétrica dos equipamentos em função das tensões que podem ocorrer no sistema ao qual estes equipamentos serão ligados, levando-se em conta as condições em que serão operados” (23).

Assim, com base apenas nas definições dos três termos supracitados, presume-se que a característica de suportabilidade dielétrica de um equipamento de potência tem relação causal com as distâncias de isolamento e de escoamento de seus componentes. Indo além, deve-se também considerar – durante a análise de coordenação do isolamento – a capacidade de regeneração do isolante ou da superfície de isolamento durante e após uma eventual perda de sua função, i.e., em caso de descarga ou de ruptura dielétrica.

2.3 *Buchas e isoladores*

Por “buchas” e por “isoladores” compreende-se os dispositivos que são utilizados em sistemas elétricos para prover, concomitantemente, as funções de fixação estrutural e de separação dielétrica entre meios condutores. Assim, de forma elementar, o desenvolvimento de uma bucha e/ou de um isolador deve atender a restrições mecânicas e elétricas.

Buchas e isoladores possuem características construtivas que se assemelham, no entanto, possuem funções distintas.

Especificamente, as buchas são destinadas a prover conexão, por meio de condutores abrigados em seu interior, entre uma região condutora específica do sistema elétrico e externa à bucha e outra região condutora específica do sistema elétrico, também externa à bucha. Buchas utilizadas para passagem de condutores entre o meio externo e o meio interno de um capacitor de potência, além de buchas utilizadas para passagem de condutores entre o meio externo e o interno de uma subestação abrigada são exemplos de aplicação. Em ambos os exemplos, além da própria estrutura da bucha, há uma segunda interface de separação entre meios – sendo esta interface adicional o conjunto da caixa e da isolamento interna do capacitor ou, ainda, a parede da subestação abrigada.

Ao contrário das buchas, isoladores não contêm condutores em seu interior. De outra forma, sua estrutura interna usual é, inteiramente, constituída de material dielétrico. Exceções se aplicam a cadeias de isoladores com elementos de fixação metálicos entre isoladores adjacentes. As extremidades dos isoladores são conectadas a elementos condutores em

potenciais elétricos distintos entre si, i.e., enquanto uma extremidade está em contato com um elemento condutor em um potencial específico, a outra extremidade está em contato com um outro elemento condutor em um outro potencial estabelecido, usualmente, diferente do primeiro. Por isso, isoladores são destinados a garantir separação elétrica entre suas extremidades, ao mesmo tempo que provê função de fixação estrutural a uma ou a ambas as extremidades.

2.4 Ruptura e perfuração

As descargas disruptivas podem ser classificadas conforme a capacidade do meio dielétrico se regenerar ou não após um evento de falha dielétrica. Também, podem ser classificadas a depender do estado físico do meio. A seguir, diferencia-se (i) ruptura e (ii) perfuração, sendo ambas modalidades de descargas disruptivas de interesse deste documento.

Uma ruptura, define-se aqui, se dá ao longo de uma superfície ou volume de isolamento e – considerando apenas os casos com isolamento a ar – a ruptura se cessa após a fonte da descarga cessar e, concomitantemente, a capacidade de isolamento se restabelecer sobre a superfície ou sobre o volume anteriormente rompido.

Uma perfuração, por sua vez, é uma falha que – considerando um volume de isolamento composto por materiais dielétricos sólidos não regenerativos – perdura indefinidamente.

Como consequência, dois aspectos de seleção de buchas e isoladores ficam definidos:

1. As buchas e os isoladores não toleram perfuração e, assim, adota-se abordagem determinística para a seleção de alguns critérios de projeto como (i) a rigidez dielétrica dos materiais isolantes e (ii) a distribuição volumétrica de tal material, i.e., a sua geometria e/ou forma.
2. As buchas e os isoladores toleram rupturas – tipicamente, em quantidade ilimitada ou, a depender das condições de solicitação e de suas consequências, em quantidade limitada – e, por isso, adota-se abordagem probabilística para satisfazer as solicitações de tensões operativas, sobretensões temporárias, de manobra e de impulso atmosféricas previstas para o equipamento – considerando distâncias de escoamento e de isolamento.

Um exemplo de perfuração pode ser visto na Figura 6.

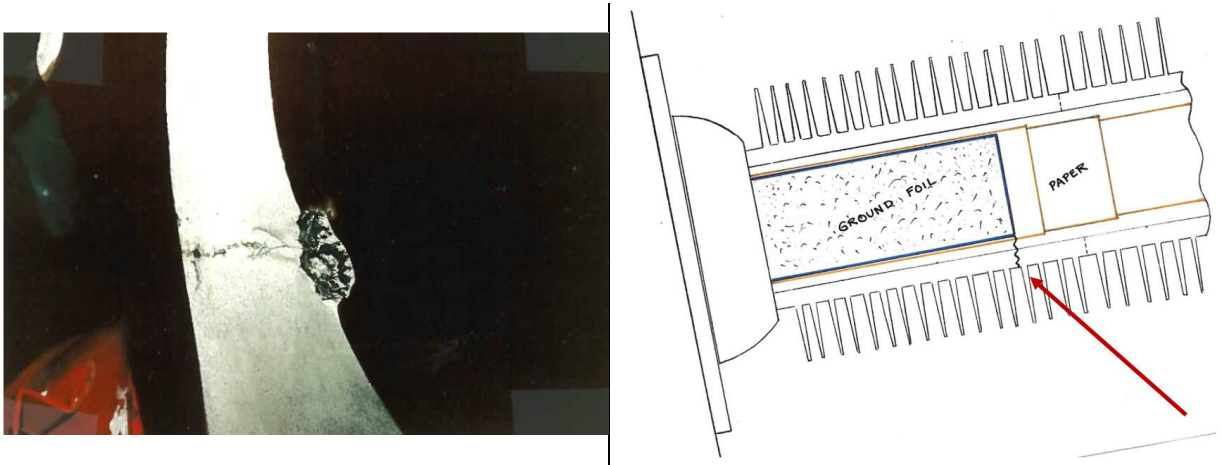


Figura 6 – Perfuração em bucha de porcelana

(a) Fotografia da bucha após evento de perfuração

(b) Representação esquemática com seta indicativa

Fonte: extraído de (24).

Na seção 3, retoma-se a discussão sobre as abordagens determinística e probabilística supracitadas.

3 Revisão bibliográfica

Aspectos de seleção e de desempenho de buchas e de isoladores para aplicações em alta-tensão é tema de discussão em diversas publicações e grupos de trabalho. Nesta seção, relaciona-se questões de interesse observadas na literatura e que, em algum grau, somam-se aos aspectos que serão tratados ao longo deste documento.

Em (20) e (25), observa-se que – ao se decidir aspectos de projeto e ao se verificar o desempenho de isolamento – é prática explícita, entre projetistas e operadores de bancos de capacitores, o uso de valores médios de intensidade de campo elétrico ao longo de regiões sob estresse. A Figura 7 é exemplo de tal prática. Nela, um ponto específico sobre a reta (em vermelho) representa a intensidade média de campo elétrico em um segmento de isolamento no ar *versus* a distância de isolamento que este segmento, consente-se, suporta em regime CA.

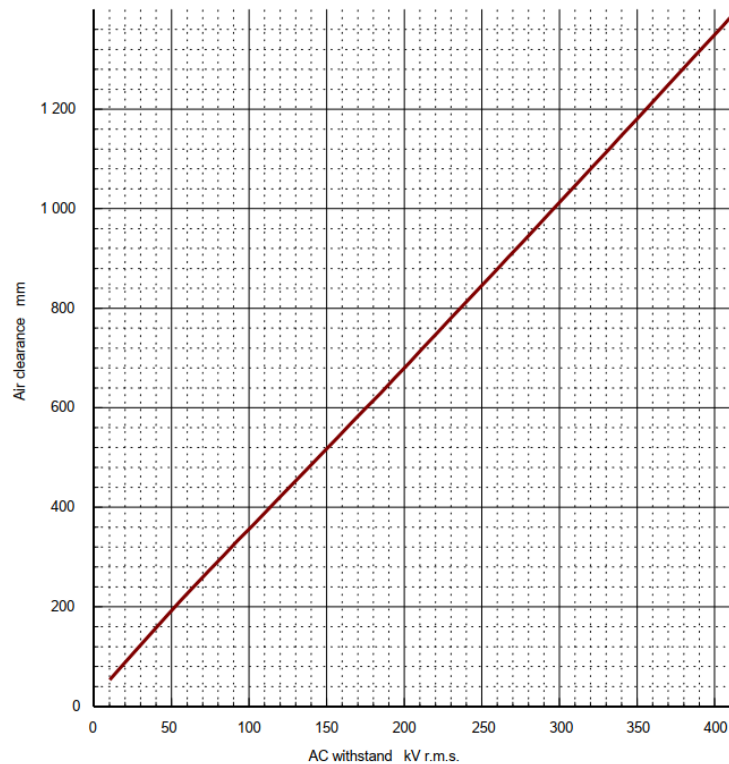


Figura 7 – Parâmetros para cálculo de isolamento em bancos de capacitores

Fonte: extraído de (20).

No caso de determinação de níveis de isolamento com relação a solicitações de impulso atmosférico ou de manobra, a metodologia apresentada em (25) é utilizada, entre outras.

Apesar da abordagem conservadora e das padronizações estabelecidas nas publicações normativas, como em (20) e (25), uma vez que as condições de uso de buchas e isoladores variam consideravelmente com especificidades de sua instalação, a ocorrência de aspectos particulares deve ser analisada. Assim, a seguir, apresenta-se questões de interesse de publicações relativas a buchas e isoladores em equipamentos de potência.

O desempenho de isoladores contaminados, em sistemas CC, é analisado em (3) – em que os autores se valeram de um conjunto de 77 publicações para suas proposições. Em (3), também, é comparado o desempenho de isoladores em regime CC e CA.

Aplicações de materiais compósitos, de porcelana e de vidro são discutidas em (26).

Quando em operação, buchas e isoladores podem ser submetidos a gelo e umidade – o que pode levar à perda de vida útil. Em (27) e (28), tais tópicos são discutidos.

O ponto de início de descarga Corona em gotas d'água e seus efeitos potenciais são discutidos em (29) e (30).

Com frequência e dada sua relevância ao desempenho de buchas e de isoladores, também se discute: índices cerâmicos, tensão de cantiléver, fadiga mecânica, índices de sismologia, métodos de estanqueidade e temperatura de operação. As publicações (31), (32), (33), (34) e (35) tratam, cada qual ao seu modo, especificamente destes aspectos.

Em (36), o autor discute técnicas de restauração de buchas cujo tempo de serviço é estendido. Já em (37), explora-se os efeitos de altas altitudes, de 2800 m a 4500 m, sobre o desempenho de isoladores.

Sob influência de tantos aspectos e variáveis, o projeto e a análise de um componente pode se tornar complexo. Para avaliar o risco de descarga, por exemplo, duas abordagens são frequentes: (i) determinística (38) e (ii) probabilística (39). A primeira abordagem visa cobrir uma condição de pior caso e, como indicado pelo autor, é baseada na suportabilidade à severidade de campo elétrico imposta no local de aplicação, em conjunto com fatores de mitigação de risco, para garantir sobredimensionamento e cobertura em relação a eventuais aspectos desconhecidos. A última abordagem assume funções estatísticas que descrevem tanto a densidade de ocorrências, em relação à tensão disruptiva, quanto a probabilidade de descargas. O múltiplo destas duas funções resulta em uma terceira função - a densidade de probabilidade. Esta última representa o risco de descarga durante um evento de solicitação.

Apesar de suas diferenças, tanto a abordagem determinística quanto a probabilística exigem definições iniciais sobre as condições ambientais do local de instalação. Em (40), (41) e (42), requisita-se, por exemplo, distâncias de escoamento e de escoamento mínimas para cada caso de seleção.

No aspecto construtivo, há diversas técnicas de projeto de buchas e de isoladores aplicáveis a equipamentos de potência, como se vê em (43), (44) e (45). Em cada caso de aplicação, simultaneamente ao critério tecnológico, avalia-se a sua viabilidade econômica.

Por fim, e citando-se novamente o aspecto de contaminação, é prática comum a adoção de classes de poluição, como se vê na Tabela 1, vide (46), (47) e (48).

Tabela 1 – Parâmetros associados às classes de poluição

Classe de poluição	Descrição	ESDD $[\frac{mg}{cm^2}]$	Distância de escoamento específica [mm/kV]			
			Isolador de porcelana e vidro		Isolador polimérico	
			CA	CC	CA	CC
Leve	Região não-industrial e/ou agrícola e/ou montanhosa e/ou distante ao menos de 20 km do mar.	de 0,03 a 0,06	$16\sqrt{3}$	39	$12\sqrt{3}$	29
Moderada	Região industrial sem poluição atmosférica ou de efluentes químicos e/ou não próxima ao mar.	de 0,10 a 0,20	$20\sqrt{3}$	47	$15\sqrt{3}$	35
Intensa	Região industrial com poluição atmosférica ou de efluentes químicos e/ou próxima ao mar.	de 0,30 a 0,60	$25\sqrt{3}$	59	$19\sqrt{3}$	44
Muita intensa	Região industrial sujeita à poluição com particulado condutor ou com poluição atmosférica ou muita próxima ao mar ou a deserto.	maior do que 0,60	$31\sqrt{3}$	72	$24\sqrt{3}$	54

Em cada publicação, a depender dos seus objetivos e disponibilidade de dados, cada classe de poluição é referenciada de acordo com um ou mais entre os seguintes parâmetros: (i) constituição físico-química e (ii) severidade da poluição, (iii) taxas de depósito de poluição solúvel e não solúvel, (iv) densidade de depósito de sal, (v) densidade superficial de depósito de sal aparente, (vi) densidade superficial de depósito de sal equivalente (ESDD) e (vii) densidade superficial de depósito não-solúvel (NSDD) (49) (50).

Ao longo deste documento, outras informações e estudos específicos – como técnicas de ensaio – em buchas e de isoladores serão indicados pontualmente, onde se fizer pertinente.

4 Modelagem do problema de desempenho dielétrico

Em um sistema isolante hipotético, consideremos que uma fonte de tensão é aplicada a um elemento condutor. Havendo tensão suficiente, a distribuição de potencial elétrico ao longo do sistema pode resultar em intensidade de campo elétrico demasiadamente alta em um ou mais locais particulares do sistema. Neste caso, o comportamento dos elementos isolantes nas proximidades destes locais é submetido a uma condição de estresse que – se não houver supressão da fonte de tensão – pode resultar em falha de desempenho e, então, sua propriedade isolante deixa de ser percebida. Esta falha é percebida por uma descarga disruptiva ou por uma ruptura e implica alteração local ou total do meio, deixando este de ser isolante e passando a ser condutor.

Em isolantes gasosos, como o ar, a condução da descarga se dá através de ionização e, conseqüente, condução por gás ionizado. Esta condução pode ter dependência primária da fonte tensão ou, então, pode ser automantida – em um processo de dependência secundária. No caso de condução em gás automantida, os portadores de carga necessários ao processo de descarga podem se originar de emissão eletrônica devido ao campo elétrico intenso – i.e. arco – ou podem se originar pelo bombardeio iônico ou eletrônico na superfície emissora da descarga – i.e. eflúvio (51). O efeito corona, por exemplo, é um eflúvio.

A liberação iônica ou eletrônica durante o processo de ruptura parcial incrementa o estresse do sistema dielétrico. Ainda que, eventualmente, o sistema dielétrico tenha capacidade de se regenerar minimamente, sob ação das fontes usuais em sistemas de potência – contínua ou alternada senoidal – o efeito cumulativo de liberação de portadores de cargas e a manutenção da fonte de tensão podem resultar em expansão do tamanho da região sob descarga parcial ou em surgimento de novos locais de descarga. Trata-se de um fenômeno de natureza estocástica (52) e, como consequência de sua ocorrência, uma avalanche e uma descarga total se tornam possíveis (53).

Considerando a natureza complexa dos eventos supracitados, modelos matemáticos adequados devem ser elaborados. Restringindo-se a análise, o desempenho de um sistema isolante pode ser avaliado, simplificadamente, pela sua capacidade de inibir a descarga disruptiva entre os elementos condutores que o constituem. Para tanto, deve-se comparar a rigidez dielétrica dos materiais do sistema isolante e a distribuição da intensidade de campo elétrico no sistema. A seguir, apresenta-se a formulação do modelo assumido.

4.1 Formulação do modelo eletrodinâmico

Dado a natureza dielétrica do problema, assume-se caráter resistivo-capacitivo predominante, de forma que eventuais efeitos magnéticos são desprezíveis no domínio de estudo. Ainda, em parte do domínio considera-se condutividade σ não-nula – de forma que o modelo eletrostático não satisfaz a análise. Por isso, aplica-se a formulação do modelo eletrodinâmico, conforme desenvolvido em (54) e apresentado a seguir.

O vetor campo elétrico \vec{E} é igual ao oposto do gradiente do potencial elétrico escalar V e pode ser representado por:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (1)$$

A lei de Gauss, em sua forma diferencial, pode ser escrita como:

$$\rho = \nabla \cdot \mathbf{D} \quad (2)$$

Na equação 2, ρ é a densidade volumétrica de carga e \mathbf{D} é a densidade de fluxo elétrico. A equação de continuidade de estado indica que o divergente da densidade de corrente é igual ao oposto da taxa de variação da densidade de cargas, e isso pode ser escrito como:

$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{J}} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

Para um material linear, a densidade de fluxo elétrico $\vec{\mathbf{D}}$ e a densidade de corrente $\vec{\mathbf{J}}$ podem ser escritos como:

$$\vec{\mathbf{D}} = \epsilon \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{\mathbf{J}} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

Substituindo (4) em (2), temos:

$$\rho = \nabla \cdot \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

Substituindo (5) e (6) em (3), temos:

$$\nabla \cdot \sigma \vec{E} = - \frac{\partial(\nabla \cdot \epsilon \vec{E})}{\partial t} \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \left(\sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (8)$$

Admitindo regime permanente senoidal, a expressão para descrever campo elétrico pode ser escrita como:

$$\vec{E} = \mathbf{E} * e^{j\omega t} \quad (9)$$

Substituindo (9) em (8), temos:

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon) \vec{E} = 0 \quad (10)$$

E, por fim, substituindo (1) em (10), resulta em:

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon) \nabla V = 0 \quad (11)$$

Dessa forma, resolve-se (11), com suas devidas condições de contorno, para a obtenção do potencial elétrico escalar V no domínio de estudo. O campo elétrico \vec{E} é, por sua vez, obtido pela aplicação de (1).

4.2 Sobre o Método dos Elementos Finitos

O MEF é parte de um conjunto de métodos numéricos utilizados em aplicações de engenharia há sete décadas. Destaca-se, entre suas vantagens, as suas versatilidade e

facilidade de implementação para resolução de problemas com elevado grau de complexidade. Em contraponto, é um método que demanda considerável capacidade de computação. Durante o período desde o início do seu surgimento até os dias atuais, o contínuo desenvolvimento e a penetração na sociedade de computadores mais capazes permitem que o MEF seja cada vez mais escolhido como ferramenta para resolução de problemas de engenharia. Informações devidamente contextualizadas e o desenvolvimento de técnicas numéricas utilizadas no MEF podem ser vistas na literatura (55).

Considerando as mesmas vantagens citadas no parágrafo anterior, para as análises que decorrem ao longo deste trabalho, optou-se por usar o MEF e, como indicado na seção 1.3, construiu-se – no GMSH – o modelo geométrico do domínio de estudo com buchas e isolares de capacitores para pré e pós-processamento das resoluções numéricas. Ainda, implementou-se – no GETDP – a formulação do modelo eletrodinâmico visto na seção 4.1.

Menciona-se aqui, sem intenção de exaurir o motivo de escolha, que em todos os casos apresentados neste texto, fez-se uso da Triangulação de Delaunay (56) para a discretização do domínio. Na matemática, a Triangulação de Delaunay constitui uma abordagem de discretização do espaço através de uma determinada seleção de pontos tal que os triângulos resultantes se aproximem de triângulos equilátero.

5 Desempenho de buchas e de isoladores – casos individuais

Nesta seção, as geometrias de uma bucha e de um isolador aplicáveis a bancos de capacitores são descritas. Faixas de escolha das principais características são indicadas e, através de casos selecionados, os desempenhos individuais são observados.

Ainda que, usualmente, ao sistema de interesse deste trabalho – i.e. bancos de capacitores de potência – raramente se aplique uso individual de buchas ou de isoladores, tal análise justifica-se como subsídio para observação de geometrias com aplicação simultânea e múltipla daqueles componentes.

5.1 Descrição paramétrica de bucha e isoladores

A seguir, na Figura 8, observa-se a geometria de uma bucha tipicamente utilizada em unidades capacitivas (57), contendo 6 saias, 35 mm de altura por saia e 50 mm de raio. Em seu interior, encontra-se um cabo condutor cuja seção transversal possui 7 mm de raio. Descreve-se tal bucha analiticamente com elementos geométricos simples: arcos de circunferência e segmentos retilíneos, representando – assim – uma construção real. O software GMSH é utilizado para o modelo geométrico computacional.

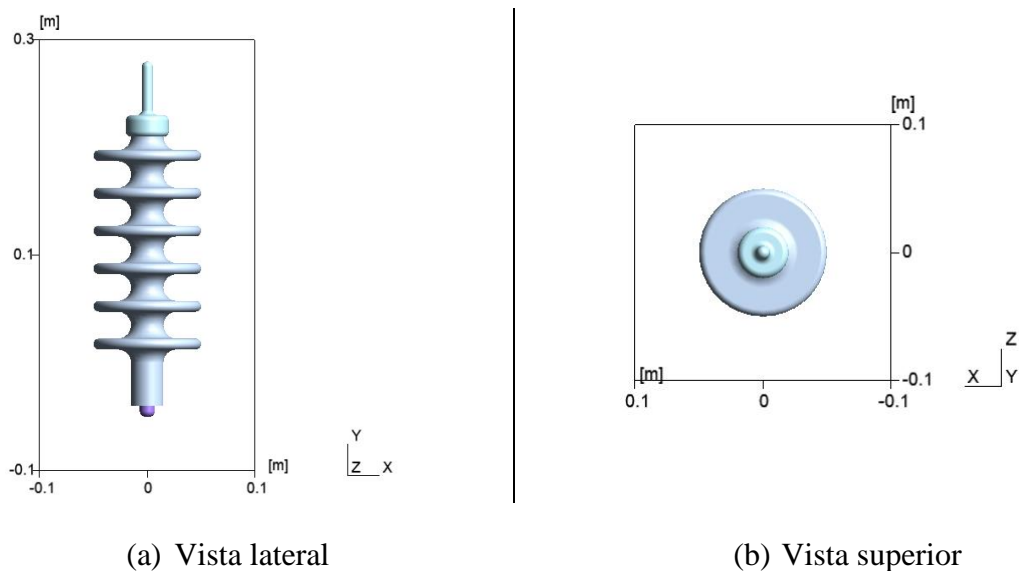


Figura 8 – Uma bucha com seis saias

Na seção 2.2, as distâncias de escoamento e de isolamento são definidas. Tais distâncias estão entre os principais parâmetros de projeto de buchas e de isoladores. Para o exemplo escolhido, elas podem visualizadas, respectivamente, nas partes (a) e (b) da Figura 9.

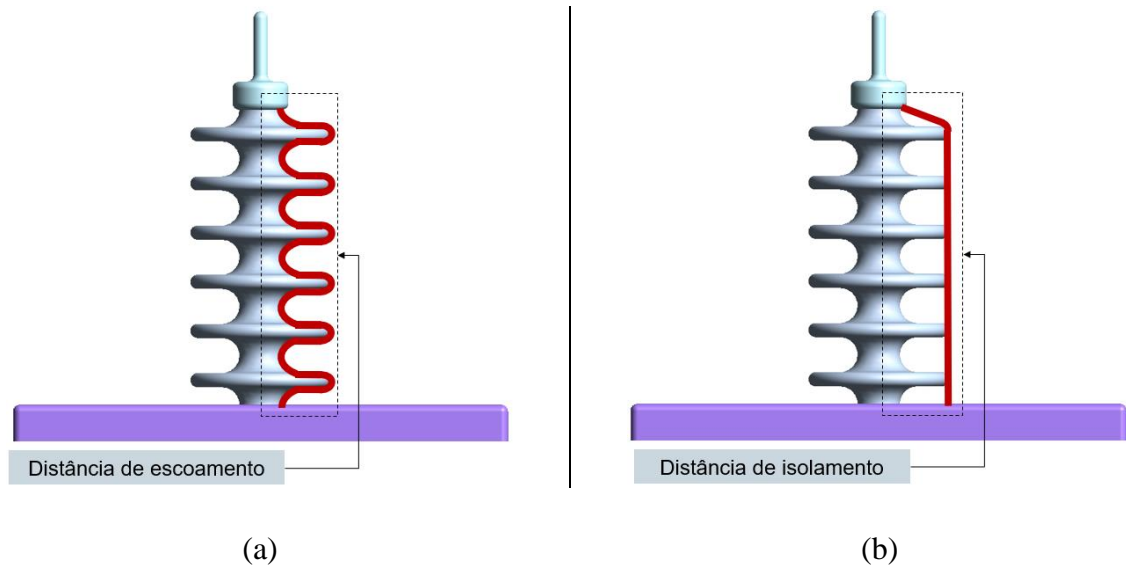


Figura 9 – Distâncias de escoamento e de isolamento

Com o objetivo de se computar as distâncias de escoamento e de isolamento de um conjunto de buchas, o mesmo modelo utilizado para a parametrização da bucha da Figura 8 é utilizado. Para tanto, elenca-se um conjunto de buchas e, como variáveis, decide-se 3 de seus parâmetros, conforme a Tabela 2. Com estes parâmetros, ficam definidos 1344 possíveis casos de configuração da bucha. Como grandeza de interesse, adicionalmente, computa-se o volume de material dielétrico de cada caso.

Tabela 2 – Conjunto de parâmetros elencados para uma bucha

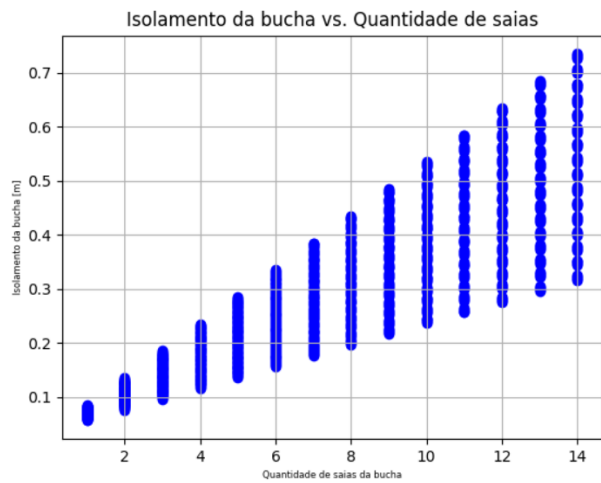
Parâmetro	Valor mínimo	Valor máximo	Incremento
Quantidade de saias	1	14	1
Altura de cada saia	20 mm	50 mm	2 mm
Raio	45 mm	55 mm	2 mm

A Figura 10 mostra os valores assumidos pela distância de escoamento, pela distância de isolamento e pelo volume de material dielétrico de uma bucha em função da quantidade de saias – para todos os casos - restritos às faixas citadas na Tabela 2.

(a) Distância de escoamento



(b) Distância de isolamento



(c) Volume



Figura 10 – Características de uma bucha vs. quantidade de saias

Assumindo-se, ao acaso, um volume de interesse de material dielétrico igual a 750 cm^3 , através da Figura 10, nota-se que é possível a construção de uma bucha que tenha de 6 a 11 saias – a depender dos parâmetros escolhidos para o raio e para a altura de cada saia.

Na Tabela 3, de forma particular, destaca-se o resultado de casos limítrofes para buchas com 1, 6 e 14 saias.

Tabela 3 – Características de buchas – alguns casos

Caso selecionado	Distância de escoamento [mm]	Distância de isolamento [mm]	Volume de material dielétrico [cm ³]
1 saia 1 20 mm de altura por saia 45 mm de raio por saia	71	56	66
1 saia 2 50 mm de altura por saia 55 mm de raio por saia	109	85	133
6 saias 3 20 mm de altura por saia 45 mm de raio por saia	428	156	394
6 saias 4 50 mm de altura por saia 55 mm de raio por saia	651	335	799
14 saias 5 20 mm de altura por saia 45 mm de raio por saia	1000	316	919
14 saias 6 50 mm de altura por saia 55 mm de raio por saia	1520	735	1863

Ainda na Tabela 3, fixando-se a quantidade de saias e selecionando-se, adequadamente, a altura e o raio de cada saia, nota-se que é possível incrementar a distância de escoamento em 52% em relação ao menor valor da faixa, para a mesma quantidade de saias. Em contrapartida, o volume de material dielétrico é acrescido de 102%.

As distâncias de escoamento e de isolamento, como definidas, também são aplicáveis a isoladores. Elas estão relacionadas ao desempenho dielétrico do componente, seja ele uma bucha ou um isolador. Espera-se que tal desempenho seja tão melhor quanto maiores forem aquelas distâncias. Em contrapartida, o volume de material dielétrico da bucha está associado ao seu custo de industrialização. Tal custo é tão maior quanto maiores são (i) os recursos requisitados durante os processos fabris e (ii) os esforços logísticos ao longo da cadeia de suprimento. No caso de uso de técnicas emergentes de manufatura aditiva (58), a decisão sobre o volume de uma bucha é, particularmente, relevante para a sua composição de custo.

5.2 Seleção de bucha e isoladores

A seleção de buchas e de isoladores é uma tarefa que demanda conhecimento prévio sobre o sistema de aplicação e sobre o desempenho de componentes-candidatos. Considerando-se os diversos aspectos a serem observados, indicados na seção 3, esta tarefa pode se tornar exaustiva.

De forma generalista, o tomador de decisão precisa (i) identificar componentes-candidatos, (ii) avaliar as condições ambientais e de solitação dielétrica, (iii) dimensionar as características do componente escolhido e (iv) avaliar o desempenho correspondente.

No primeiro passo, a identificação de componentes envolve a análise de materiais e construções adequadas ao uso pretendido.

No segundo passo, deve-se obter informações do local de aplicação – preferencialmente – vindas de componentes semelhantes e em operação circunvizinha. No caso de instalações em corrente contínua, na ausência de instalações anteriores, a extrapolação de dados de instalações em corrente alternada pode ser oportuna. Neste último caso, atenção especial às condições de extrapolação deve ser tomada – uma vez que a interação dielétrica entre um dado componente e a poluição local é influenciada pelo regime de operação e sua polaridade. Por fim, o recurso da estimativa de parâmetros de severidade ambiental também pode ser aplicado com base em estações de coleta ou em modelagem numérica.

No terceiro passo, com base em dados de operação anteriores, vindas de aplicação em campo ou de ambiente laboratorial, deduz-se a capacidade de isolamento do componente-escolhido. Com isso, a sua construção pode ser iniciada. Na ausência de dados anteriores, modelos numéricos, em conjunto com ensaios laboratoriais, tornam-se essenciais.

No quarto passo, submete-se o componente à prova. Adverte-se que, ainda que se tenha todos os aspectos ambientais e operativos para a seleção do componente, a reprodução destes aspectos – em ambiente controlado – é uma tarefa exigente. Em qualquer caso, à qualificação do componente escolhido, soma-se os resultados de ensaios artificiais com os relatos e experiência de seu uso final em situações diversas.

Na presente seção, parâmetros típicos para a seleção de buchas e isoladores em bancos de capacitores são elencados. Assim, e considerando o conjunto de buchas descritas na seção 5.1, exercita-se a escolha de uma bucha. Como objetivo da seleção, decide-se por buchas-candidatas cujos parâmetros satisfazem as classes de poluição (46) indicados na Tabela 4. Nesta também, a tensão de interesse corresponde à solitação dielétrica durante operação. A rigor, esta tensão é obtida após definição da máxima tensão de operação continuamente

aplicada sobre a bucha que, por sua vez, é determinada pela (i) máxima tensão de operação do banco de capacitores, pelo (ii) conteúdo harmônico no espectro de tensão, pela (iii) quantidade de unidades capacitivas em série no banco e pela (iv) máxima quantidade de unidades capacitivas em série em um mesmo nível do banco de capacitores. Valores usuais para tal tensão, em buchas sob regime harmônico permanente, se limitam a 25 kV. A distância de escoamento requerida, nesta situação, é conforme a última coluna da Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros para seleção

Classe de poluição	Distância de escoamento específica $\sqrt{3} * [mm/kV]$	Tensão de interesse [kV]	Distância de escoamento requerida [mm]
Leve	16	20	554
Moderada	20	20	693
Intensa	25	20	866
Muito intensa	31	20	1074

Ao se fixar o raio da bucha em 50 mm e a altura de cada saia em 35 mm (tais parâmetros equivalem aos valores médios das faixas indicadas na Tabela 2), as buchas que atendem aos requisitos aqui indicados ficam determinadas e seus parâmetros estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Classes de poluição compatíveis com os parâmetros

Quantidade de saias na bucha	Distância de escoamento [mm]	Distância de isolamento [mm]	Volume de material dielétrico [cm ³]	Classe de poluição atendida para a tensão de interesse de 20 kV
1	90	70	95	-
2	180	105	191	-
3	270	140	286	-
4	360	175	381	-
5	450	210	477	-
6	540	245	572	-
7	630	280	667	Leve
8	720	315	763	Moderada
9	810	350	858	Moderada
10	900	385	953	Intensa
11	990	420	1049	Intensa
12	1080	455	1144	Muito intensa
13	1170	490	1239	Muito intensa
14	1260	525	1335	Muito intensa

Observa-se, na Tabela 5, que a bucha com 6 saias – como aqui descrita - não satisfaz a distância de escoamento mínima de 554 mm para a classe de poluição leve. Para esta última classe, deve-se optar pela bucha com 7 saias, minimamente.

Como alternativa para incrementar a distância de escoamento, pode-se considerar o raio interno de cada saia variável ao longo do perfil descrito pela superfície externa da bucha. Tal detalhamento pode ser visto na Figura 11. Assim, a bucha com 6 saias passa a ter 556 mm de distância de escoamento, ao invés de 540 mm . Assim, ela passar a satisfazer a condição de uso para a classe de poluição leve.

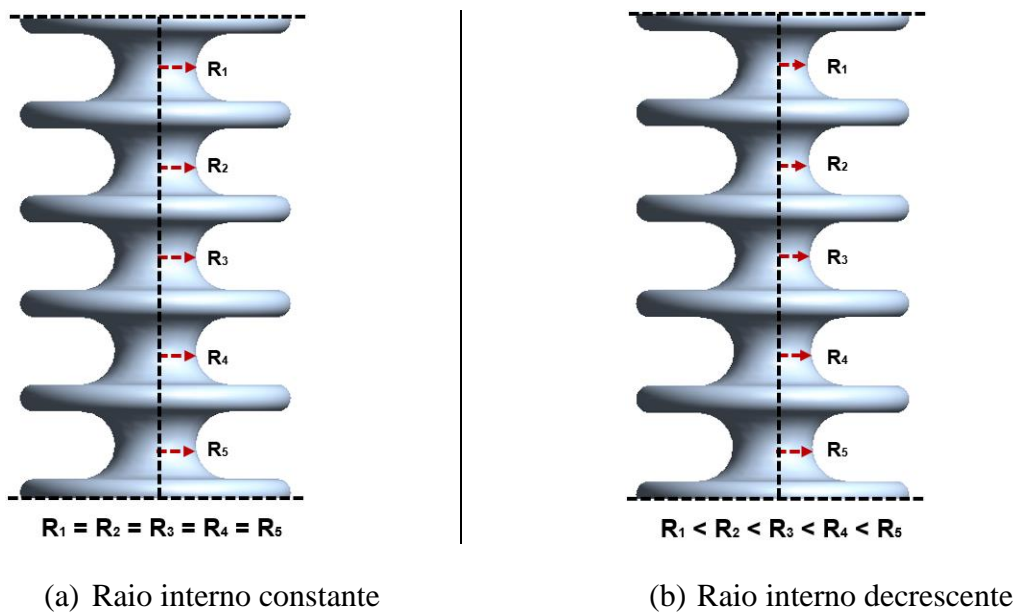


Figura 11 – Detalhe do raio interno da representação de uma bucha com 6 saias

A distância de isolamento, pela sua própria definição, não é afetada pela modificação construtiva indicada na Figura 11.

Sem prejuízo ao exercício de seleção, o fluxo de decisão para a escolha de um isolador ocorre de forma análoga. No caso de um isolador, aspectos de estanqueidade não se aplicam. Porém, em bancos de capacitores, isoladores têm elevada importância nos aspectos de sustentação do banco – o que implica relevância à análise de sua suportabilidade mecânica.

5.3 Análise de sensibilidade do desempenho de um isolador

Nesta seção, através da formulação apresentada na seção 4.1, em conjunto com o MEF, busca-se comparar o desempenho de isoladores quando submetidos a diferentes condições de poluição. Os seguintes passos serão usados.

Algoritmo 1 – Sequência de passos adotados para análise de sensibilidade de isolador

```

Início

// entradas: passos de 1 a 5
// saída: passo de 6

passo 1 - Definir domínio de estudo
passo 2 - Definir objetos de estudo: um isolador para banco de
capacitores, com 9 saias, e apresentado em 2 diferentes perfis geométricos
passo 3 - Elencar 1 objeto de estudo, entre os 2 definidos
passo 4 - Elencar condições de contorno
passo 5 - Elencar condição de poluição, entre as 3 definidas
passo 6 - Computar variável de interesse: intensidade de campo elétrico na
circunvizinhança do isolador
passo 7 - Retornar aos passos de 3 a 5 até computar todos os objetos de
estudo definidos no passo 2

Fim

```

Define-se, a seguir, o domínio de estudo, a geometria do isolador, as condições de contorno e de poluição.

5.3.1 Domínio e objeto de estudo

O domínio de estudo, para a análise numérica, é composto por um cubo de lado cujo comprimento é 1 m. O objeto de estudo, um isolador, é disposto no centro do domínio. Os materiais que compõem o domínio de estudo estão identificados na Tabela 6. Assume-se invariáveis as características elétricas – para uma frequência de rede de 60 Hz e para a temperatura ambiente de 20 °C (59).

As condições de poluição são extraídas de (60).

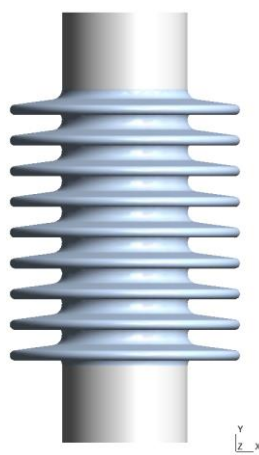
Tabela 6 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo

Identificação do material	Descrição	Permissividade relativa []	Condutividade elétrica [S/m]
1	Isolante: ar	1	$1,0 \times 10^{-10}$
2	Isolante: porcelana	6	$1,0 \times 10^{-14}$
4	Condutor: terminal superior de aço	∞	$1,5 \times 10^{+6}$
5	Condutor: terminal inferior de aço	∞	$1,5 \times 10^{+6}$
6.1	Camada de poluição leve ou insignificante	15	$1,0 \times 10^{-8}$
6.2	Camada de poluição média	15	$1,0 \times 10^{-6}$
6.3	Camada de poluição intensa ou severa	15	$1,0 \times 10^{-4}$

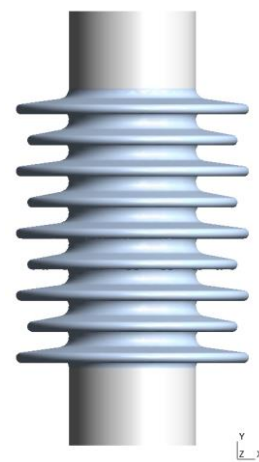
Parametricamente, o isolador selecionado tem as características indicadas na Tabela 7, em que duas configurações de saias são apresentadas: (i) saias iguais e (ii) saias desiguais. A diferença entre as duas configurações corresponde à alternância geométrica indicada na Figura 12.

Tabela 7 – Características do isolador

Quantidade de saias []	Distância de escoamento [mm]	Distância de isolamento [mm]	Altura por saia [mm]
9 (9+0)	1430	405	40
9 (5+4)	1300	405	40



(a) Sais iguais



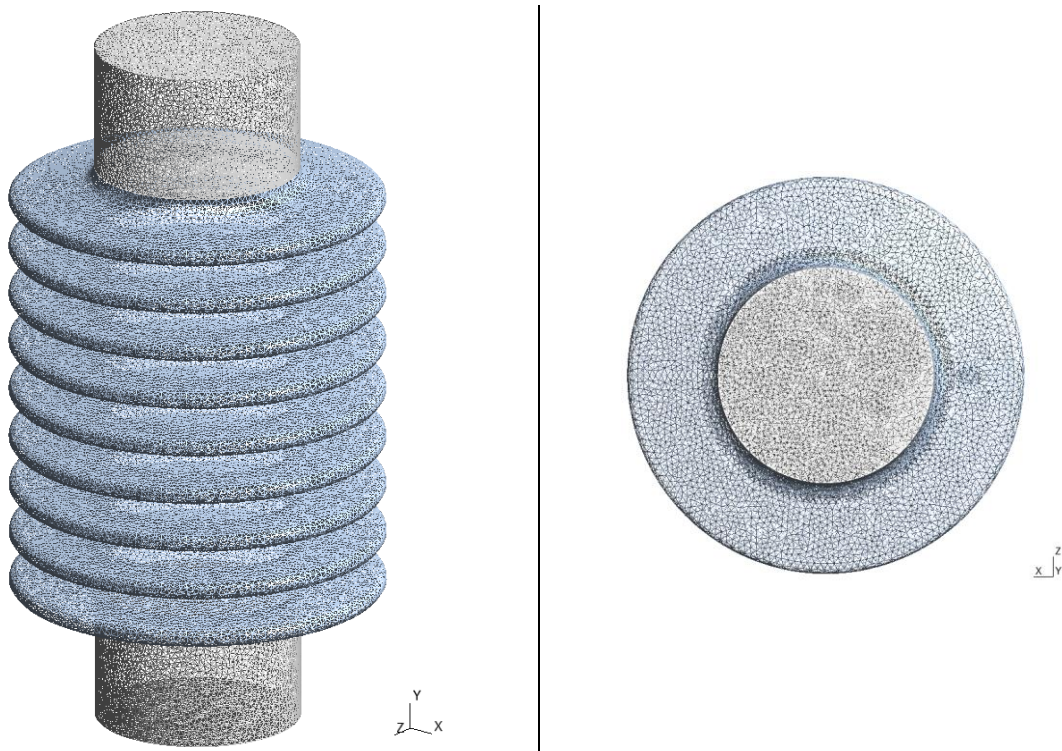
(b) Sais desiguais

Figura 12 – Duas configurações de um isolador com 9 saias

O caso de estudo considera uma diferença de potencial de 40 kV entre a região superior e a região inferior do isolador.

5.3.2 Análise numérica – malha

A Figura 13 contém duas imagens representativas da malha de elementos finitos utilizada para o isolador sob estudo. Em ambas as imagens, há representações das arestas dos elementos finitos. Em todos os casos, alocou-se 3.118.515 elementos com tamanho variável, sendo que a discretização do domínio foi feita de forma a concentrar elementos nas proximidades e no interior do isolador, utilizando-se de tetraedros. Na Figura 13, os elementos referentes ao ar no entorno do isolador estão omitidos.



(a) Vista dimétrica

(b) Vista superior

Figura 13 – Discretização do objeto de estudo: isolador com 9 saias

5.3.3 Resultados

As distribuições de potencial elétrico escalar e de intensidade de campo elétrico são aqui apresentados. Dada a simetria presente na geometria do isolador, os resultados dos seis casos analisados são apresentados sobre um segmento de escoamento e de isolamento.

A Figura 14 apresenta a distribuição de potencial elétrico escalar resultante sobre um segmento de escoamento. Os gráficos superiores indicam resultados em que – sobre a superfície do isolador – considera-se nível de poluição leve; os gráficos intermediários, nível de poluição média; os gráficos inferiores, nível de poluição alto.

Constata-se que, com o aumento da contaminação, maior é a uniformidade na variação do potencial elétrico ao longo do perfil do isolador e entre saias consecutivas, i.e., a cada 40 mm de altura.

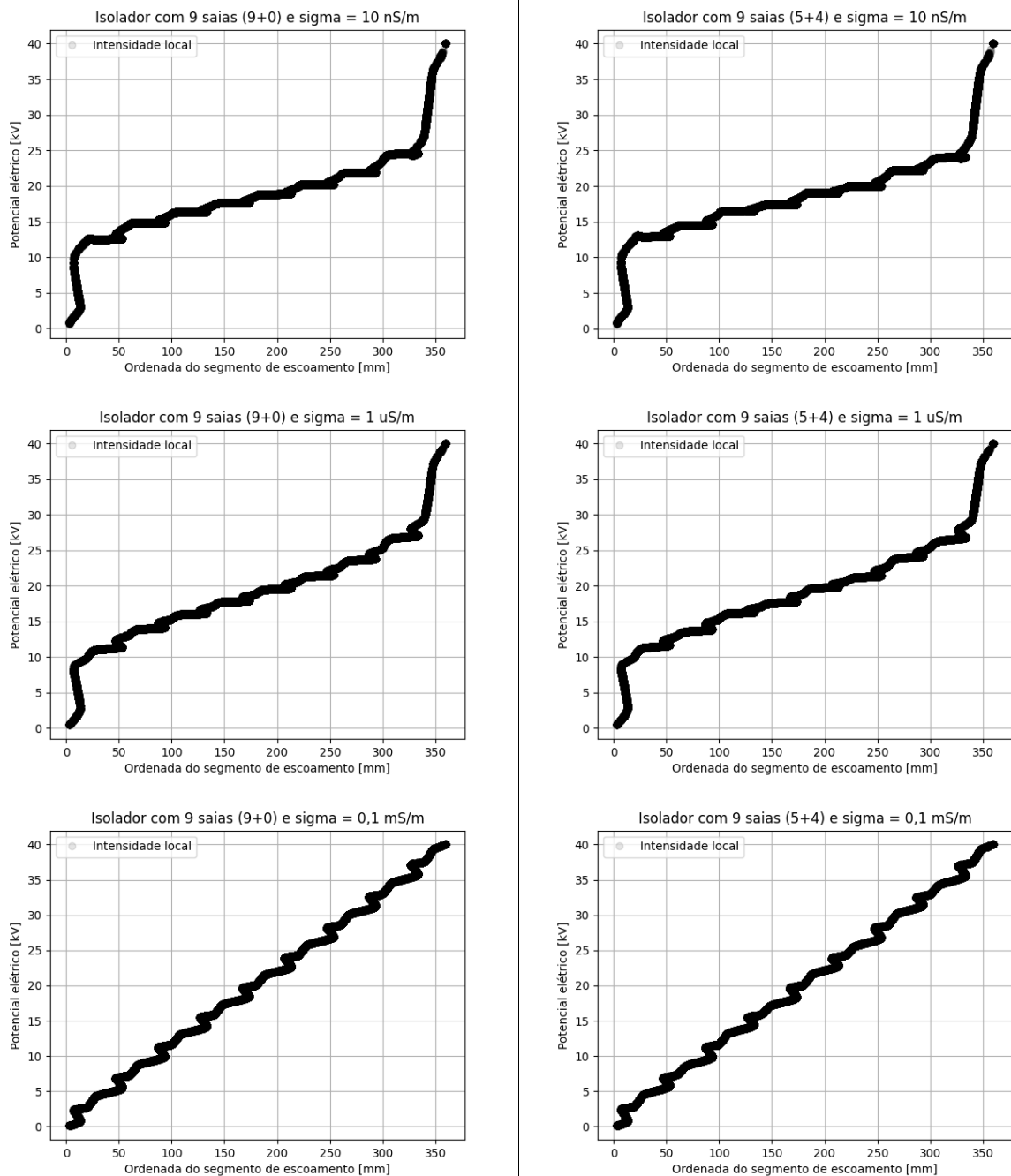


Figura 14 – Potencial elétrico escalar ao longo do escoamento – isolador com 9 saias

A Figura 15 apresenta a intensidade de campo elétrico resultante sobre um segmento de escoamento. Os gráficos estão ordenados da mesma forma que na Figura 14.

Verifica-se que, com o aumento da contaminação, os valores máximos de intensidade de campo elétrico são reduzidos – ao mesmo tempo em que, como supracitado, o estresse se uniformiza. Ainda que os valores médios tenham todos a mesma ordem de grandeza, os valores médios dos casos de menor nível de poluição são em torno de 10% maiores do que os valores médios dos casos correspondentes com maior nível de poluição.

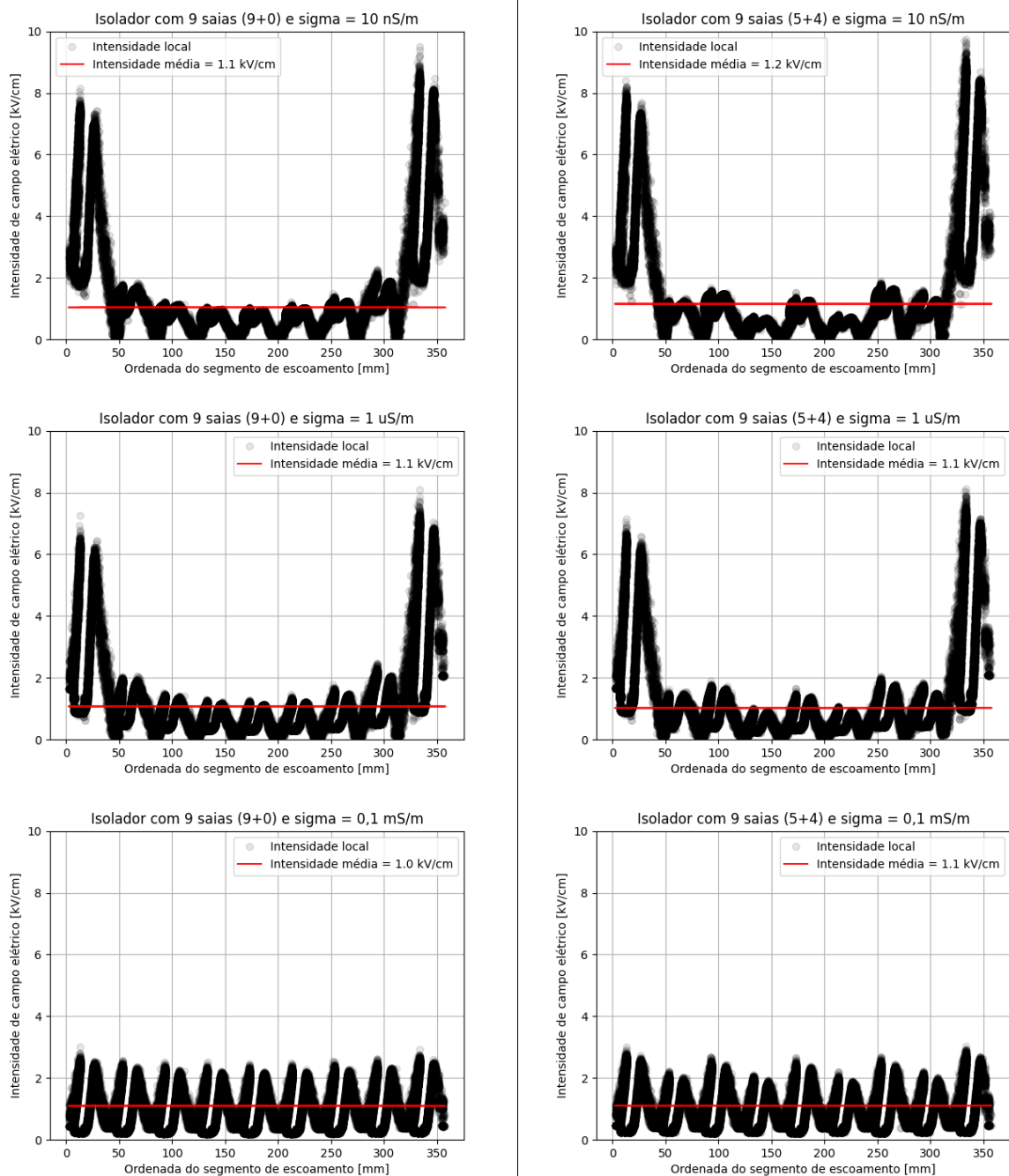


Figura 15 – Intensidade de campo elétrico ao longo do escoamento – isolador com 9 saias

A Figura 16 apresenta a intensidade de campo elétrico resultante sobre um segmento de isolamento. Os gráficos estão ordenados da mesma forma que na Figura 14.

No caso do isolamento, observa-se que as intensidades médias de campo elétrico crescem consideravelmente com o aumento do nível de poluição. Ao se comparar os casos correspondentes de construções com (i) saias iguais e (ii) desiguais, nota-se menor dispersão nestes últimos. Eventualmente, tal observação sugere menos trechos de descarga local preferencial.

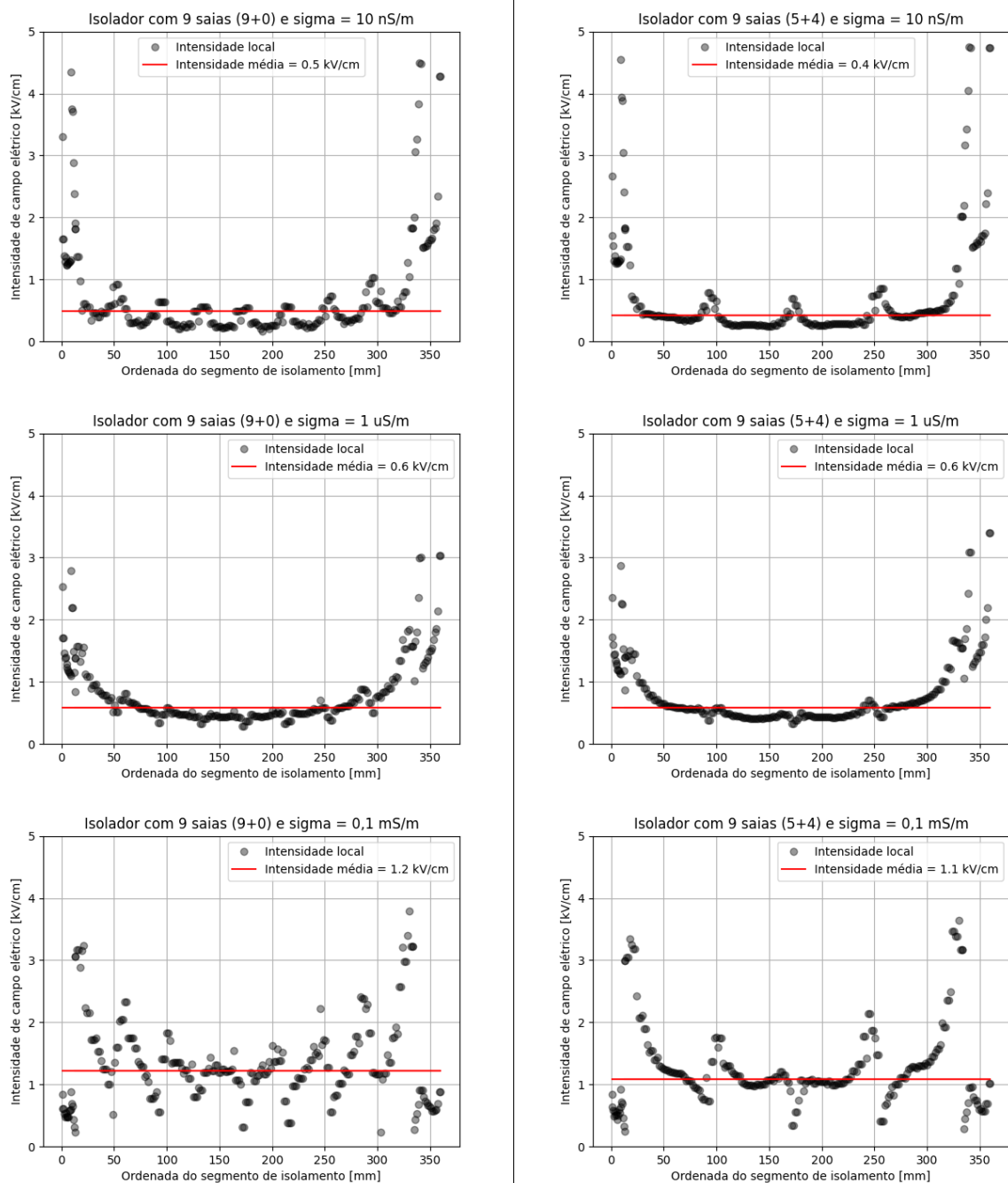


Figura 16 – Intensidade de campo elétrico ao longo do isolamento – isolador com 9 saias

5.4 Análise de sensibilidade do desempenho de uma bucha

Nesta seção, através da formulação apresentada na seção 4.1, em conjunto com o MEF, busca-se comparar o desempenho de buchas quando submetidas às mesmas condições ambientes. As buchas selecionadas são parametrizadas conforme seção 5.1. Para a análise, os seguintes passos serão usados.

Algoritmo 2 – Sequência de passos adotados para análise de sensibilidade de bucha

Início

// entradas: passo 1 a passo 3
// saída: passo 5

passo 1 - Definir domínio de estudo

passo 2 - Definir objetos de estudo: uma bucha para unidade capacitiva, com 1 a 14 saias, tendo 2 perfis geométricos por saia

passo 3 - Elencar 1 objeto de estudo, entre 28 possíveis

passo 4 - Definir condições de contorno

passo 5 - Ensaiar o modelo numérico através do MEF e computar grandezas de interesse: intensidade de campo elétrico na circunvizinhança da bucha

passo 6 - Retornar aos **passos de 3 a 5** até ensaiar todos os objetos de estudo definidos no **passo 2**

Fim

O domínio de estudo, a geometria da bucha e as condições de contorno de cada caso de estudo são definidos conforme a seguir.

5.4.1 Domínio e objeto de estudo

O domínio de estudo, para análise numérica, é composto por um cubo de lado cujo comprimento é 1 m. O objeto de estudo é disposto conforme sua montagem em uma caixa metálica de uma unidade capacitiva. A rigor, unidades capacitivas monofásicas possuem 2 terminais, ao menos. Para o estudo aqui descrito, o conjunto da bucha e da unidade capacitiva é simplificado, tendo apenas 1 terminal e 1 bucha. Esta simplificação objetiva a análise sem influência de um segundo terminal e sua respectiva bucha. Para uma quantidade fixa de saias, os 2 perfis de raio interno indicados na Figura 11 são estudados.

Os materiais que compõem o domínio de estudo estão identificados na Tabela 8. Assume-se invariáveis as características elétricas da Tabela 8 - para uma frequência de rede de 60 Hz e para a temperatura ambiente de 20 °C (59).

Tabela 8 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo

Identificação do material	Descrição	Permissividade relativa []	Condutividade elétrica [S/m]
1	Isolante: ar	1,0	$1,0 \times 10^{-10}$
2	Isolante: porcelana	6,0	$1,0 \times 10^{-14}$
3	Dielétrico: óleo	2,6	$1,0 \times 10^{-12}$
4	Condutor: cordoalha e terminal de Cobre	∞	$6,0 \times 10^{+7}$
5	Condutor: caixa de aço inoxidável	∞	$1,5 \times 10^{+6}$

Na Figura 17, pode-se ver o domínio e o objeto de estudo. Nela, identifica-se os materiais 2, 4 e 5 através de setas. Os materiais 1 e 3 preenchem o sistema, sendo que o material 1 está contido entre os limites do domínio de estudo e os limites externos do objeto de estudo, enquanto o material 3 está contido entre os limites internos do objeto de estudo. Na Figura 17, a bucha contém 7 saias.

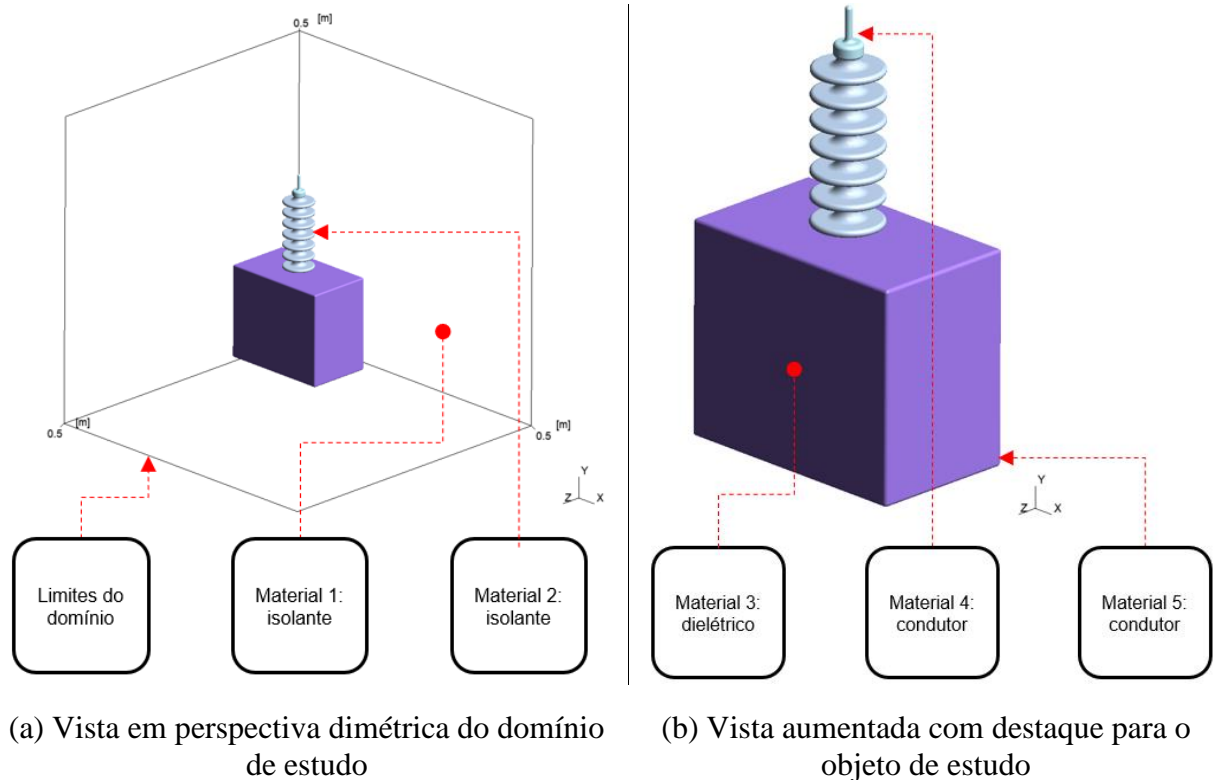


Figura 17 – Domínio e objeto de estudo contendo 1 bucha com 7 saias

Condições de contorno pertinentes são impostas. Um potencial de 20 kV é considerado no condutor interno à bucha e em seu terminal superior (equivale ao material 4 da Figura 17) e um potencial de 0 V é considerado em toda a superfície metálica da unidade capacitiva (equivale ao material 5 da Figura 17).

Para cada um dos 14 casos, os resultados da distribuição de potencial elétrico escalar e da intensidade de campo elétrico em uma seção transversal da bucha são computados sobre uma seção transversal, por sua vez definida conforme a Figura 18.

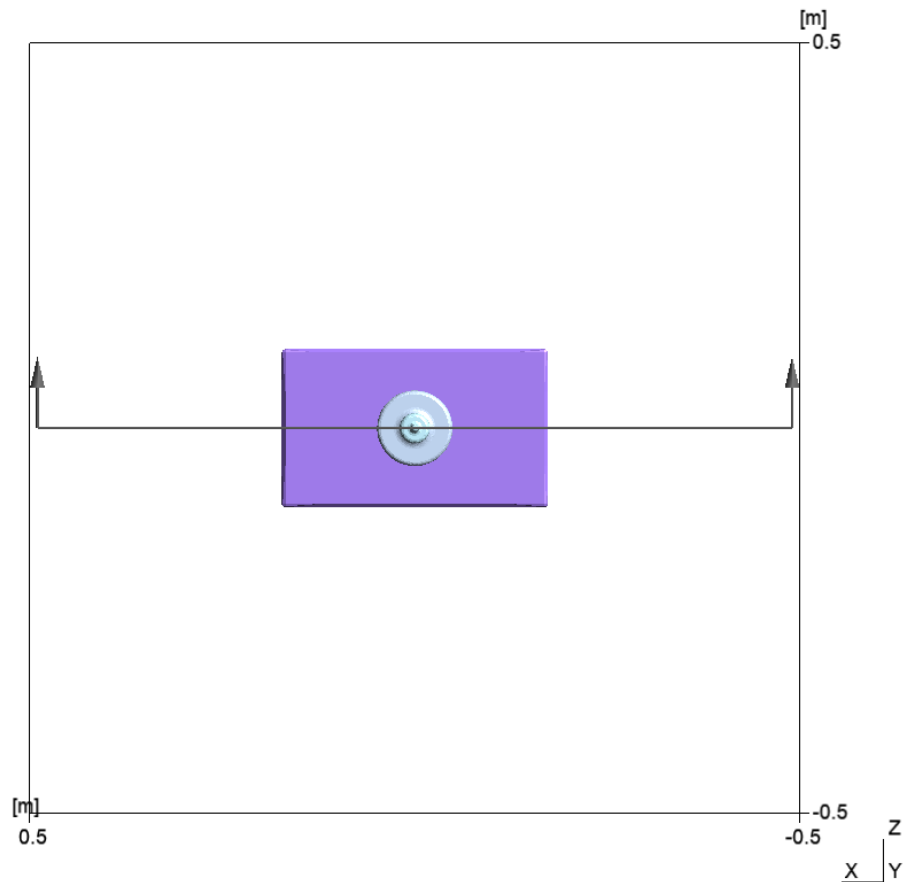


Figura 18 – Seção transversal da bucha

5.4.2 Análise numérica – malha

A Figura 19 contém duas imagens da malha de elementos finitos utilizada para a bucha com 7 saias. Em ambas as imagens há representações das arestas dos elementos finitos. Alocou-se 1.016.973 elementos com tamanho variável, sendo que a discretização do domínio foi feita de forma a concentrar elementos nas proximidades e no interior da bucha. A superfície da caixa da unidade capacitiva foi discretizada através de triângulos. Os demais

componentes foram discretizados através de tetraedros. Na Figura 19, os elementos referentes ao ar no entorno da bucha estão omitidos.

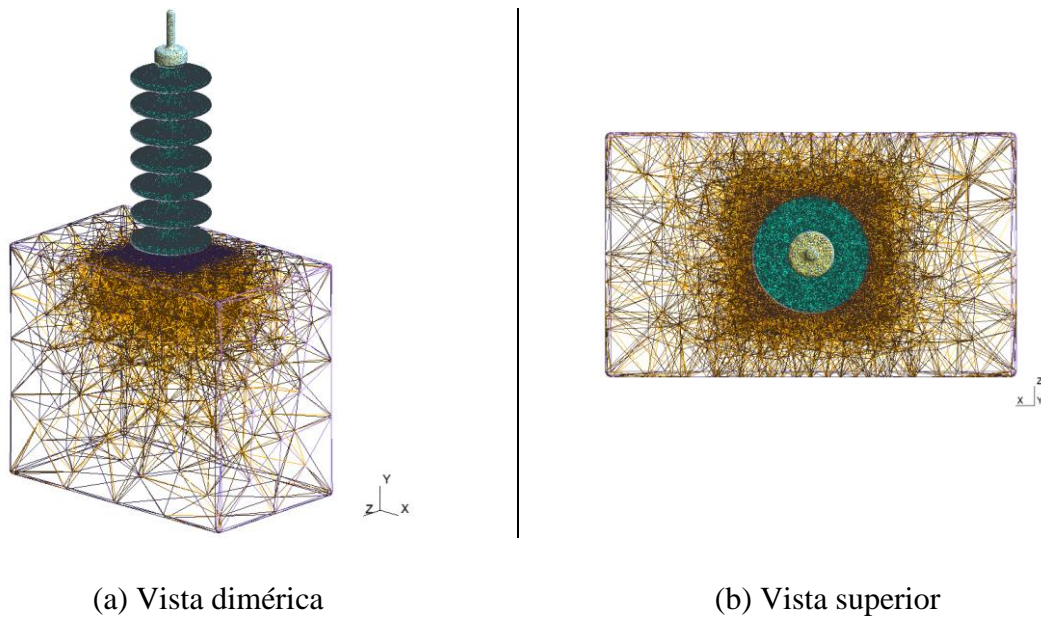


Figura 19 – Discretização do objeto de estudo: bucha com 7 saias

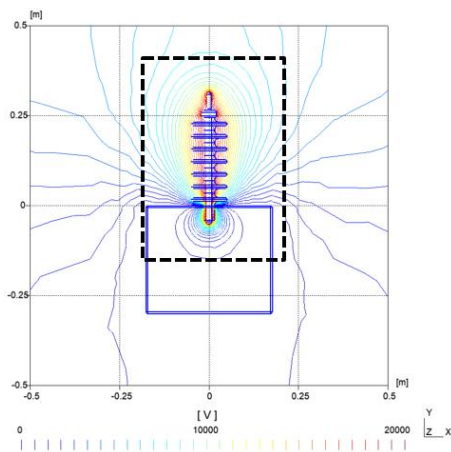
Analogamente, no caso da bucha de 14 saias, para discretização do domínio, alocou-se 1.669.774 elementos.

5.4.3 Resultados

As distribuições de potencial elétrico escalar e de intensidade de campo elétrico resultantes são aqui verificadas. Escolhe-se sobre segmentos de escoamento e de isolamento no plano transversal conforme Figura 18.

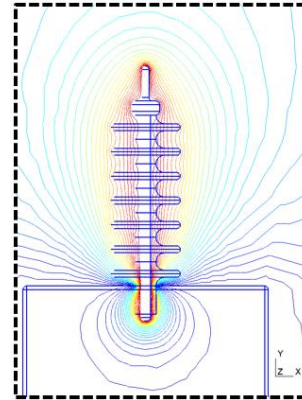
Nas partes a.1 e b.1 da Figura 20, 30 linhas equipotenciais são definidas para ilustração do resultado numérico, sendo que a cor azul se refere ao potencial de 0 V e a vermelha se refere ao potencial de 20 kV. A legenda pode ser vista na parte inferior da figura. A parte b.2 contém faixas com a representação gráfica da intensidade de campo elétrico. Neste caso, a cor vermelha se refere a regiões com intensidade de campo elétrico igual ou maior do que 3 kV/cm, enquanto a azul se refere a regiões com intensidade de campo elétrico que tende a zero. Nota-se, de imediato, que as linhas equipotenciais apresentam maior

concentração na região inferior da bucha, onde há a transição entre a superfície superior da caixa da unidade capacitiva e o seu interior.



(a) Vista seccional do domínio de estudo.

(a.1) Representação gráfica de 30 linhas equipotenciais.



(b) Destaque na região tracejada.

(b.1) Na figura superior: representação gráfica de 30 linhas equipotenciais.

(b.2) Na figura inferior: representação gráfica da intensidade de campo elétrico.

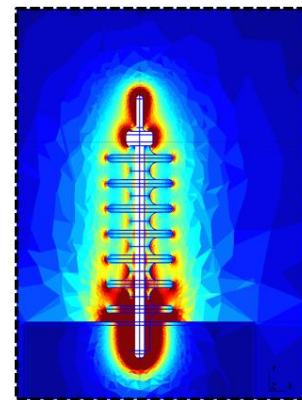


Figura 20 – Resultado para o caso de 1 bucha com 7 saias

Na Figura 21, a seguir, os resultados ao longo da superfície de buchas são apresentados graficamente para os casos com (i) 6 e com (ii) 14 saias.

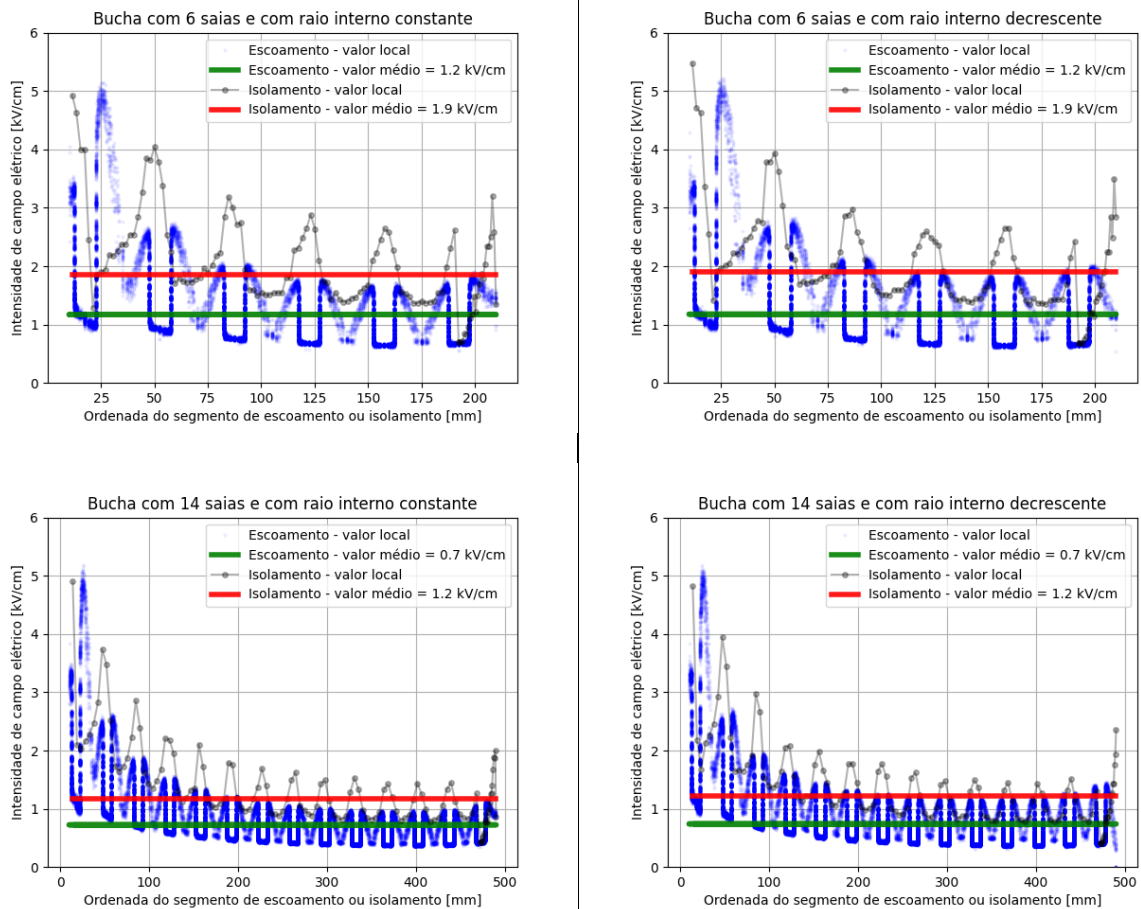


Figura 21 – Intensidade de campo elétrico em buchas

Nas condições propostas, comparando-se os resultados para os casos com 6 e com 14 saias, tem-se:

- A intensidade média de campo elétrico ao longo da distância de escoamento decresce de 1,2 kV/cm para 0,7 kV/cm, ao variar a quantidade de saias de 6 para 14 saias.
- A intensidade média de campo elétrico ao longo da distância de isolamento decresce de 1,9 kV/cm para 1,2 kV/cm, ao variar a quantidade de saias de 6 para 14 saias.
- Independentemente da quantidade de saias, a máxima intensidade de campo elétrico ao longo das distâncias de escoamento e de isolamento localiza-se na saia mais inferior de cada bucha, atingindo 5 kV/cm.
- Ao diminuir-se o raio interno das saias, de forma a aumentar ligeiramente as distâncias de escoamento, a intensidade média de campo elétrico ao longo de tais distâncias não sofre alteração relevante – ainda que a intensidade local de

campo elétrico seja incrementada nas saias mais elevadas ao comparar-se com o caso análogo, cujo raio interno das saias é mantido constante.

Nas condições propostas, os resultados para todos os casos estão na Tabela 9.

Especificamente para os casos com 6 e com 14 saias, verifica-se uma redução de 42% na intensidade média de campo elétrico sobre a superfície de escoamento e uma redução de 37% na intensidade média de campo elétrico sobre o segmento de isolamento. À comparação direta destes resultados não se deve atribuir que o modelo numérico representa o desempenho uma bucha real. Técnicas experimentais, como o método dos acréscimos e decréscimos (61), devem ser adotadas.

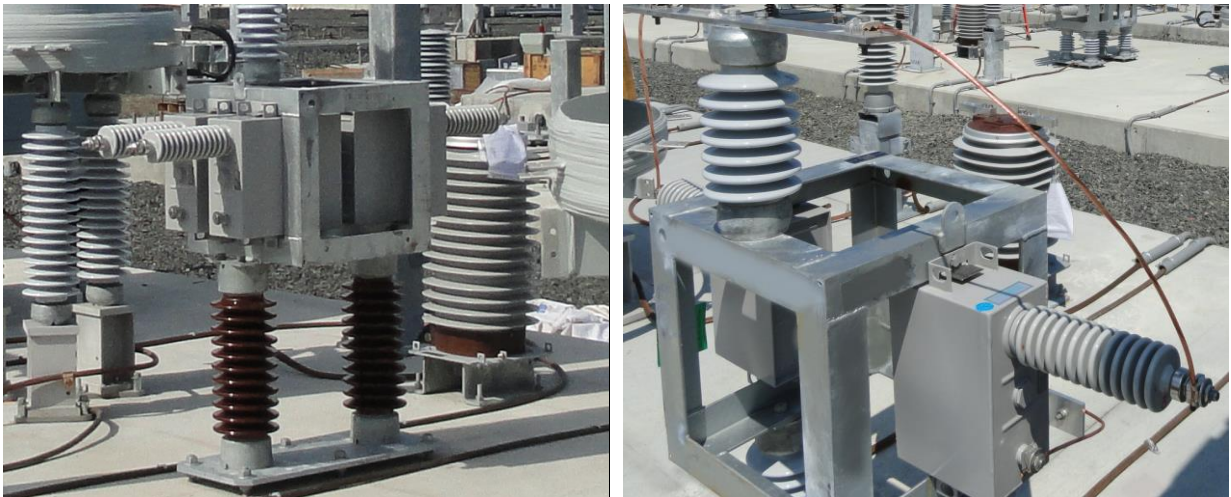
Tabela 9 – Resultados de intensidade de campo elétrico ($\|E_m\|$) em bucha

Quantidade de saias / Raio interno []	Distância de escoamento [mm]	Distância de isolamento [mm]	$\ E_m\ $ escoamento [kV/cm]	$\ E_m\ $ isolamento [kV/cm]
1 / constante	90	70	2,0	4,5
1 / decrescente	91	70	2,0	4,6
2 / constante	180	105	1,8	2,5
2 / decrescente	182	105	1,8	2,5
3 / constante	270	140	1,6	2,3
3 / decrescente	275	140	1,6	2,4
4 / constante	360	175	1,4	2,2
4 / decrescente	368	175	1,4	2,2
5 / constante	450	210	1,3	2,0
5 / decrescente	462	210	1,3	2,0
6 / constante	540	245	1,2	1,9
6 / decrescente	556	245	1,2	1,9
7 / constante	630	280	1,1	1,8
7 / decrescente	652	280	1,1	1,9
8 / constante	720	315	1,0	1,7
8 / decrescente	748	315	1,0	1,7
9 / constante	810	350	1,0	1,6
9 / decrescente	844	350	1,0	1,6
10 / constante	900	385	0,9	1,5
10 / decrescente	942	385	0,9	1,5
11 / constante	990	420	0,9	1,4
11 / decrescente	1039	420	0,9	1,4
12 / constante	1080	455	0,8	1,3
12 / decrescente	1138	455	0,8	1,3
13 / constante	1170	490	0,8	1,1
13 / decrescente	1237	490	0,8	1,0
14 / constante	1260	525	0,7	1,2
14 / decrescente	1337	525	0,7	1,2

Todos os resultados gráficos correspondentes à Tabela 9 encontram-se no apêndice B.

6 Análise de sensibilidade de escoamento e de isolamento em banco de capacitores

Na seção 5, características de buchas e isoladores são observadas em situações de uso individual. Na Figura 22, são visualizados dois casos de uso que se aproximam daquela condição. Na Figura 22(a), duas unidades capacitivas são dispostas em uma face do banco. Na Figura 22(b), uma unidade capacitiva é disposta em uma face do banco. Em ambos os casos, outros elementos estão presentes e que afetam a simetria e a isolação do sistema, como: (i) segundo terminal conectado diretamente à superfície externa da unidade capacitivas e (ii) disposição de condutor acima da bucha.



(a) Caso de uso 1

(b) Caso de uso 2

Figura 22 – Unidades capacitivas com uma única bucha

Fonte: extraído de (62)

Na Figura 23, são apresentados dois casos de uso semelhantes e em que os bancos de capacitores são dispostos em diversos níveis. Na Figura 23(a), observa-se três torres, cada qual operando uma fase do sistema. Na Figura 23(b), observa-se a presença de oito buchas em uma mesma face de um único nível do banco.

De forma a estudar interações entre as conexões dos múltiplos terminais e buchas presentes neste caso, um modelo representativo de um banco de capacitores de potência é definido. Através da variação discreta de três parâmetros elementares, um conjunto de diferentes casos é analisado com base na distribuição da intensidade de campo elétrico resultante.

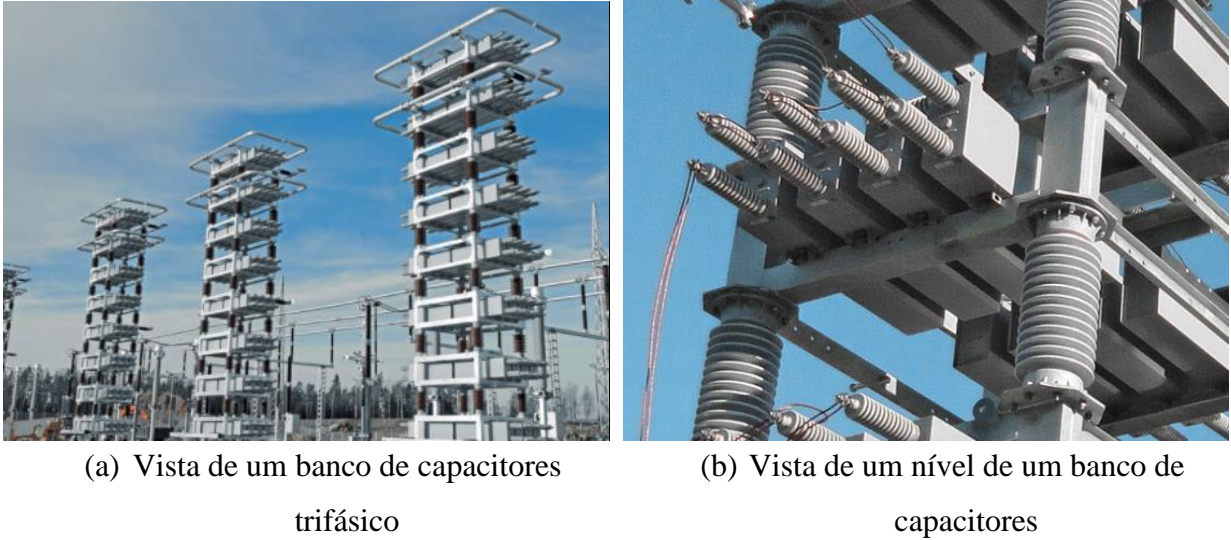


Figura 23 – Banco de capacitores e uso de múltiplos componentes

Fonte: extraído de (62)

6.1 Descrição do problema

Na Figura 24, observa-se um modelo representativo de um nível de um banco de capacitores. Cada unidade capacitiva é representada com duas buchas. As unidades são ligadas entre si através de cabos condutores.

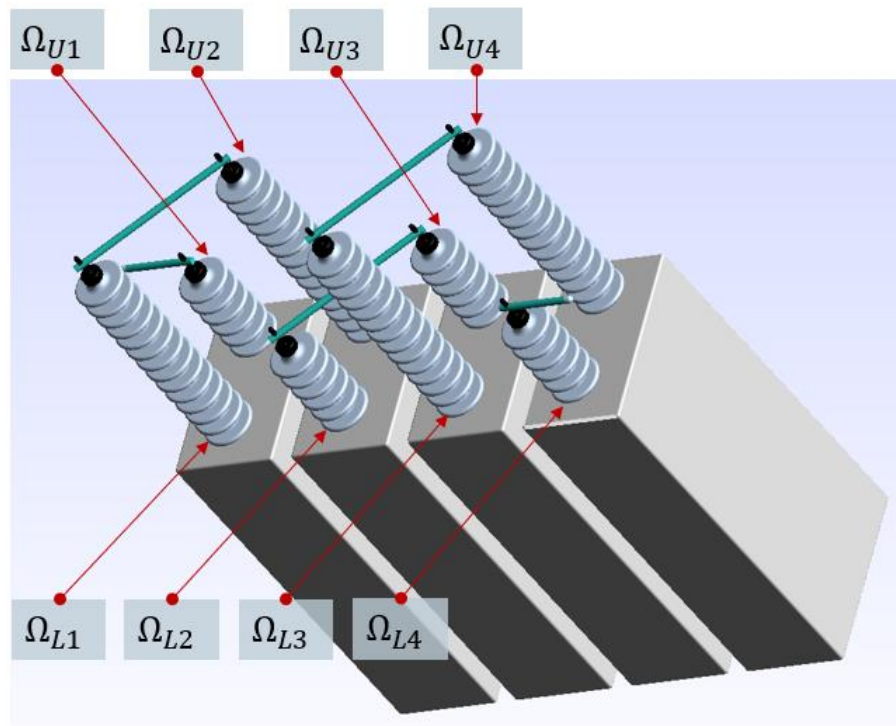


Figura 24 – Vista da região de interesse: 4 capacitores, suas buchas e conexões

O modelo foi descrito no GMSH, com componentes usados em uma aplicação real, de forma a representar – ainda que sob simplificações – uma face de um nível de um banco de capacitores. A Tabela 10 identifica os materiais considerados e os seus parâmetros pertinentes (59).

Tabela 10 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo

Identificação do material	Descrição	Permissividade relativa []	Condutividade elétrica [S/m]
1	Isolante: ar	1,0	$1,0 \times 10^{-10}$
2	Isolante: porcelana	6,0	$1,0 \times 10^{-14}$
3	Dielétrico: óleo	2,6	$1,0 \times 10^{-12}$
4	Condutor: cordoalha e terminal de Cobre	∞	$6,0 \times 10^{+7}$
5	Condutor: caixa de aço inoxidável	∞	$1,5 \times 10^{+6}$

No problema elencado, a isolação do sistema dielétrico – composto pelas buchas e pelo ar no entorno delas – é um aspecto importante e possui geometria não-trivial. Por conta disso, um estudo multivariável é proposto com as seguintes restrições:

- A distância horizontal entre unidades capacitivas é escolhida entre 50 mm e 250 mm, com passos de 50 mm. Assim, cinco distâncias são possíveis: 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm e 250 mm. A Figura 25 ilustra esta restrição.
- Para cada bucha representada, opta-se por variar a quantidade de saias em uma faixa de 6 a 14 saias, com incrementos de uma saia.
- Para cada caso de estudo, restringe-se que as buchas do conjunto $\Omega_A = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$ tenham a mesma quantidade de saias entre si.
- Para cada caso de estudo, restringe-se que as buchas do conjunto $\Omega_B = \{\Omega_{L1}, \Omega_{U2}, \Omega_{L3}, \Omega_{U4}\}$ tenham a mesma quantidade de saias entre si.
- A quantidade de saias das buchas do conjunto Ω_A independe da quantidade de saias das buchas do conjunto Ω_B . Assim, 81 combinações são possíveis.

Ao todo, 405 diferentes casos são definidos.

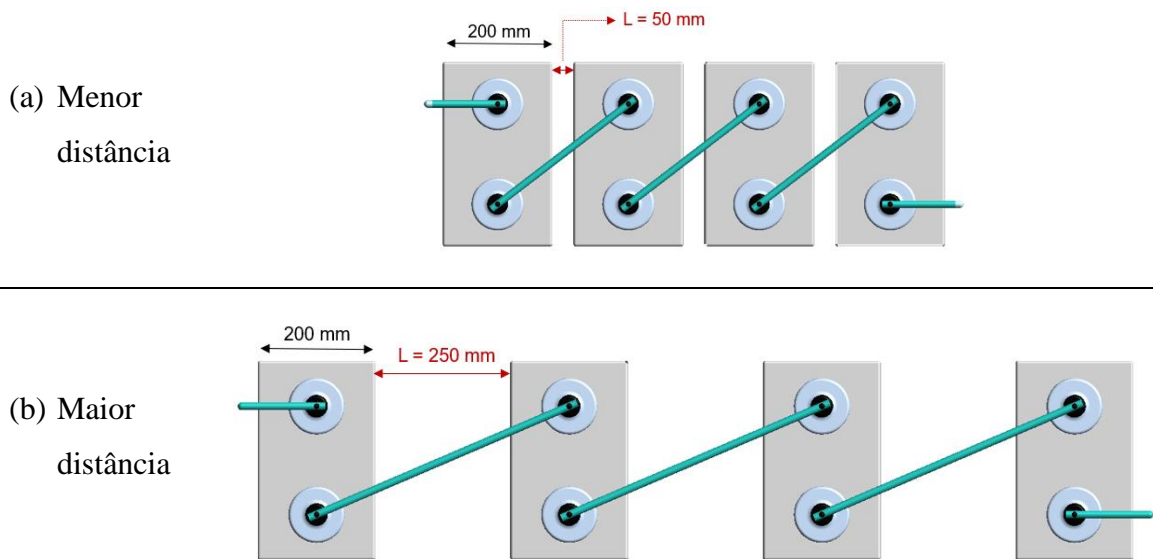


Figura 25 – Distância entre unidades capacitivas adjacentes

Em cada caso, condições pertinentes são impostas ao banco de capacitores de acordo com a Figura 26. Essas condições equivalem às que são encontradas no 3º nível, em uma torre hipotética que tenha o total de 5 níveis e tensão no seu barramento de entrada equivalente a $V_{referência} = 345kV = 200 * \sqrt{3}$. A escolha do 3º nível dá-se, meramente, por ser o nível intermediário do banco. Em uma eventual reprodução do estudo para os demais níveis, vale-se da mesma estratégia de análise, sem prejuízo para o seu objetivo.

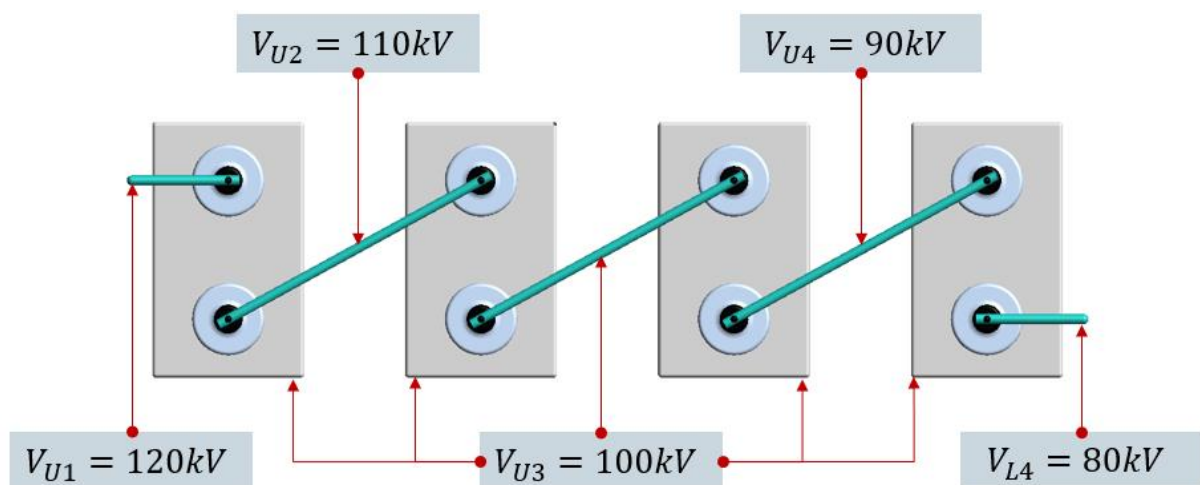


Figura 26 – Condições de contorno

Neste nível, foram verificadas as distribuições de intensidade de campo elétrico ao longo de 8 superfícies de escoamento – 1 de cada bucha – e, também, as distribuições de intensidade de campo elétrico ao longo de 19 segmentos de isolamento.

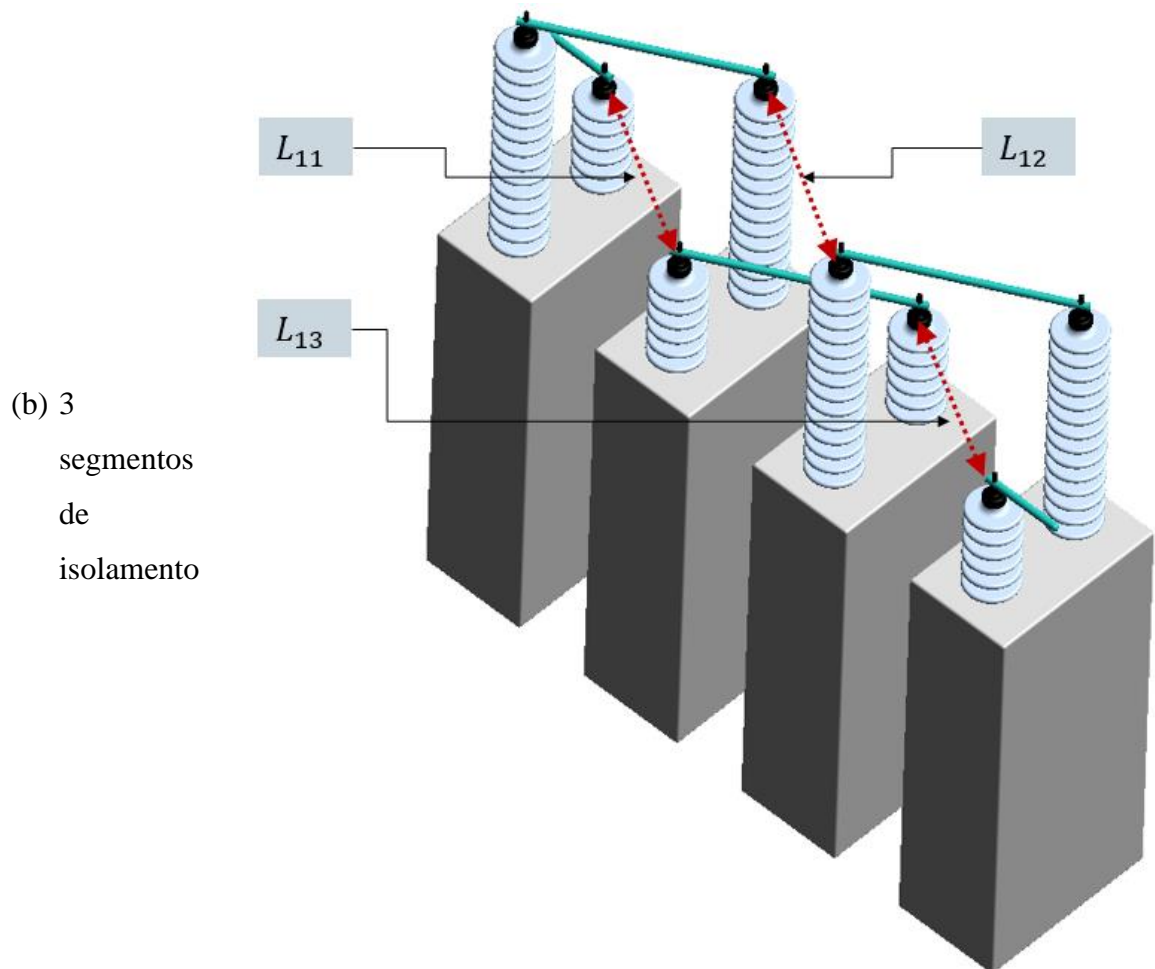
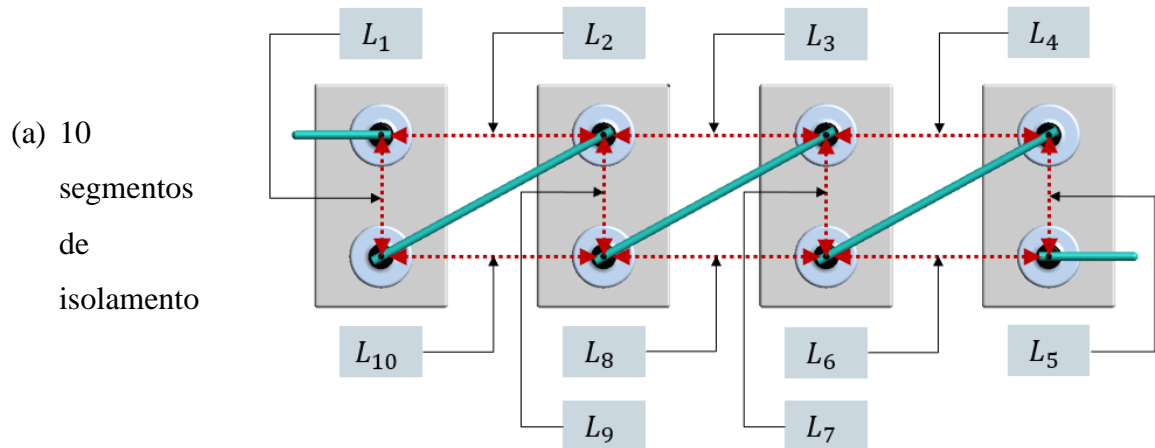


Figura 27 – Segmentos de interesse: 1º ao 13º segmento

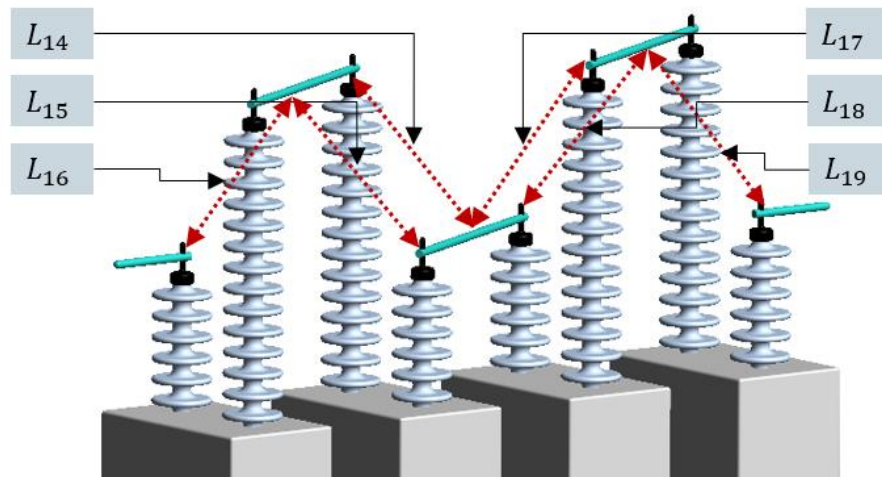


Figura 28 – Segmentos de interesse: 14º ao 19º segmento

Com este problema, pretende-se obter uma representação declarativa que permita observações e o exercício analítico sobre tais observações.

6.2 Do tratamento de dados

No problema tratado nesta seção, um volumoso conjunto de dados é gerado a cada um dos 405 casos. Na fase de pós-processamento, via MEF, as variáveis de isolamento são constituídas de 1000 pontos cada; enquanto as variáveis de escoamento, de 15308 pontos cada. Assim, há 141.464 pontos por caso e, no total dos casos, um conjunto de 57.292.920 pontos sob análise.

De forma a simplificar o conjunto de dados, para cada variável representativa de um segmento ou superfície, computa-se o valor médio da intensidade do campo elétrico sobre a região correspondente. Desta forma, restringe-se as variáveis de isolamento e de escoamento a um único valor cada e, então, no total, um conjunto de $27 * 405 = 10.935$ valores é analisado. Este conjunto, destaca-se, tem origem nas mesmas 27 distribuições de intensidade de campo elétrico elencadas no item 6.1.

Não se pretende julgar, no presente documento, a hipótese de que o valor médio da distribuição de campo elétrico é condição suficiente para a análise de desempenho do sistema dielétrico. Porém, adota-se que tal hipótese é, de alguma forma, representativa de desempenho comparativo – tanto nos segmentos de isolamento quanto nas superfícies de escoamento. Na seção 3, verifica-se que tal hipótese é assumida em normas que regem projeto e aplicação de

buchas aplicáveis a bancos de capacitores (20). Destaca-se que – ainda que outra hipótese fosse assumida, tal como (i) análise por máximos ou (ii) análise por desvio-padrão – o sistema sob análise é comparado consigo mesmo. Desta forma, obtém-se a vantagem de que inferências significantes podem ser realizadas com parâmetros aritméticos simples (63) desde que se preserve a covariância entre os dados. Os resultados que originaram a Tabela 9 sugerem satisfação a este requisito – uma vez que, naquela Tabela, é possível relacionar intensidade de campo elétrico resultante com, por exemplo, a quantidade de saias de cada caso. No campo da Teoria da Informação, atesta-se a plausibilidade de tais inferências através de técnicas de codificação e de transmissão de informação (64).

6.3 *Redução de dimensionalidade*

Para que o conjunto de 27 variáveis aqui descrito permita inferências, é necessário elencar uma técnica de análise. Assim, opta-se por um método com capacidade de projeção linear em espaços de menor dimensão do que o espaço original: a Análise de Componentes Principais (ACP), também chamada por *transformada de Karhunen-Loève* (65). Na ACP, ao reduzir a dimensão do conjunto original, um problema de autovalores é resolvido – com a restrição de que as novas dimensões (i.e. componentes) sejam minimamente não-correlacionáveis e que, em cada componente, a variância seja maximizada (66). Destaca-se, como característica da ACP, entre outros, a sua capacidade de representação compacta de um espaço multivariável. O algoritmo 3 (65) descreve o passo-a-passo de sua execução.

Algoritmo 3 – Análise de Componentes Principais

```

Início

// entrada: passo 1
// saída: passo 8.4
// critério de parada: passo 10

passo 1 - Define-se o conjunto de dados contendo as observações  $\{x_n\}$ , com
 $n = 1, \dots, N$ . A variável  $x_n$  possui dimensão  $D$ .
passo 2 - De início, considera-se a projeção do conjunto de dados em um
espaço unidimensional ( $M = 1$ ). Define-se, convenientemente, a direção deste
espaço através de um vetor unitário  $\mathbf{u}_1$  com  $D$  dimensões, de forma que
 $\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_1 = 1$ 
passo 3 - Projeta-se cada ponto  $x_n$ , resultando em  $\mathbf{u}_1^T x_n$ 
passo 4 - Calcula-se o valor médio  $\bar{x} = \sum_{n=1}^N x_n$ 
passo 5 - Calcula-se o valor médio  $\mathbf{u}_1^T \bar{x}$ 
passo 6 - Calcula-se a matriz de covariância  $\mathbf{S} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})(x_n - \bar{x})^T$ 
passo 7 - Calcula-se a variância  $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \{\mathbf{u}_1^T x_n - \mathbf{u}_1^T \bar{x}\}^2 = \mathbf{u}_1^T \mathbf{S} \mathbf{u}_1$ 
passo 8 - Maximiza-se a variância projetada  $\mathbf{u}_1^T \mathbf{S} \mathbf{u}_1$  com relação a  $\mathbf{u}_1$ 
(restrição de maximização deriva da condição de normalização  $\mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_1 = 1$ )
passo 8.1 - Define-se um multiplicador de Lagrange  $\lambda_1$ 
passo 8.2 - Deriva-se  $\mathbf{u}_1^T \mathbf{S} \mathbf{u}_1 + \lambda_1 * (1 - \mathbf{u}_1^T \mathbf{u}_1)$  em relação a  $\mathbf{u}_1$  e zera-se
passo 8.3 - Observa-se que, neste caso,  $\mathbf{S} \mathbf{u}_1 = \lambda_1 \mathbf{u}_1$ .
passo 8.4 - Manipula-se e conclui-se que  $\lambda_1 = \mathbf{u}_1^T \mathbf{S} \mathbf{u}_1$ . Assim, a variância é
máxima quando  $\mathbf{u}_1$  equivale ao autovetor com o maior autovalor  $\lambda_1$ .
passo 9 - Define-se, convenientemente, a direção de um novo espaço através
de um vetor unitário  $\mathbf{u}_2$  com  $D$  dimensões, de forma que  $\mathbf{u}_2^T \mathbf{u}_2 = 1$  e que  $\mathbf{u}_2$ 
seja ortogonal a  $\mathbf{u}_1$ .
passo 10 - volta-se ao passo 2 até que se tenha atingido a quantidade
desejada de componentes principais

//  $\mathbf{u}_1$  é a 1ª componente principal
//  $\mathbf{u}_2$  é a 2ª componente principal

Fim

```

6.4 Resultados da redução de dimensionalidade.

Após gerar cada um dos 405 casos, a partir do Algoritmo 3, reduz-se o espaço de 27 dimensões a um espaço de duas dimensões. Destaca-se que o espaço original, em cada dimensão, contém o resultado da intensidade média de campo elétrico sobre uma dada região.

A Figura 29 apresenta o resultado do espaço reduzido, considerando as duas componentes da ACP. Os pontos são apresentados em tonalidade cinza. Em um dado ponto, quanto mais densa é a sua tonalidade, aproximando-se do preto, maior é a sobreposição de

resultados. É possível observar que a distribuição dos dados, pelo subespaço bidimensional, possui aspecto de lúnula.

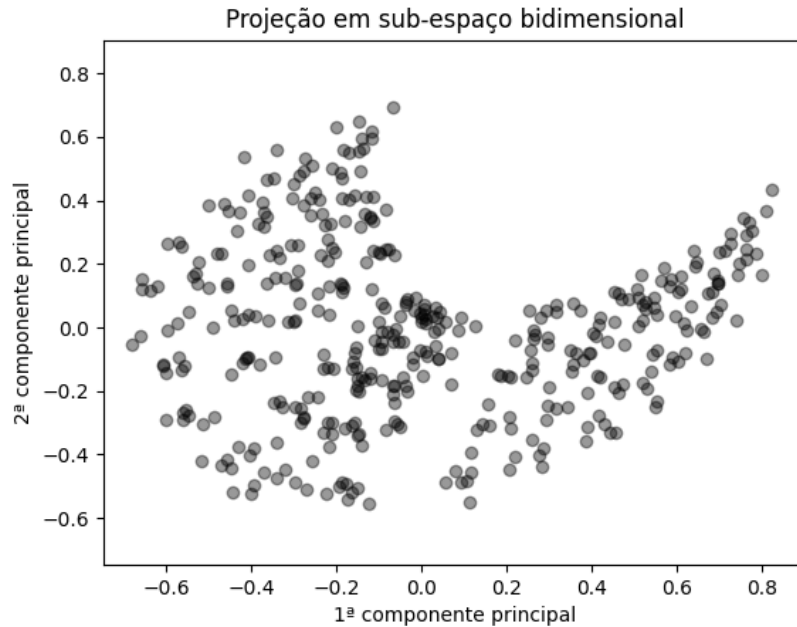


Figura 29 – Resultados da ACP para os 405 casos de estudo

A Figura 30 apresenta, em variação percentual acumulada, a variância explicada da ACP para 25 cenários de redução de dimensionalidade. Com esta análise, pode-se verificar quão bem o subespaço reduzido representa o espaço original.

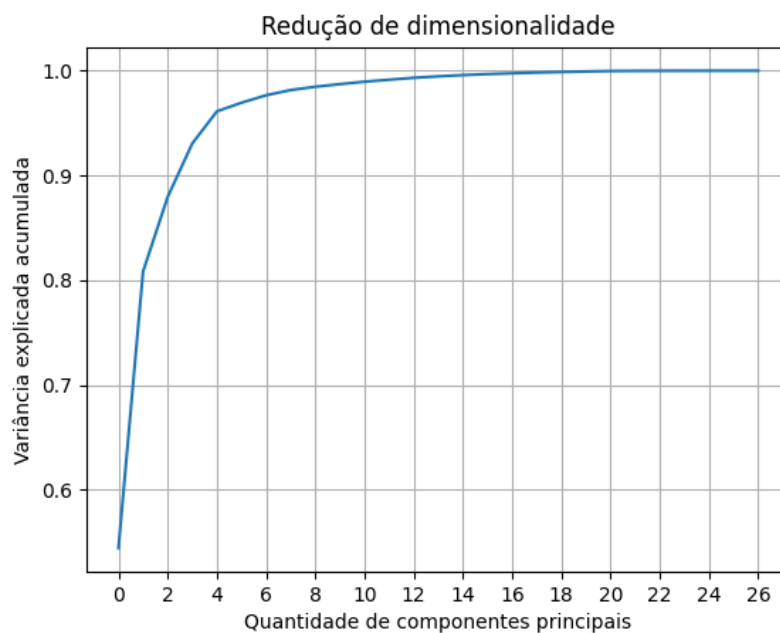


Figura 30 – Variância explicada acumulada vs. Quantidade de componentes principais

No 1º cenário, o espaço original de 27 dimensões é reduzido para um subespaço de apenas 1 dimensão; no 25º cenário, para um subespaço de 26 dimensões. Neste último, 100% da covariância presente no espaço original é mantida no subespaço reduzido. Naquele, preserva-se 81% da covariância. Em uma análise intolerante à perda de informação, 16 dimensões são suficientes para manter 100% da covariância do conjunto original.

No cenário de interesse, com 2 dimensões, 88% da covariância é preservada.

6.5 Agrupamento

No problema original, como definido na seção 6.1, três variáveis críticas impactam diretamente as distâncias de escoamento e de isolamento presentes e, por consequência, o desempenho do sistema dielétrico. Por isso, em uma dada aplicação, a tomada de decisão sobre os valores de projeto para aquelas variáveis deve ser feita com rigor. Ao mesmo tempo, um elevado número de possíveis cenários pode ser um entrave para o tempo alocado à tomada de decisão.

Uma vez definido e reduzido – via ACP - o conjunto de 405 casos computados, a extração de características de interação entre as 27 variáveis originais se torna uma tarefa de menor complexidade. A vantagem de se conhecer tais características é a de subsidiar a tomada de decisão de forma quantitativa, em um conjunto multivariável e com menor esforço. Com isto, escolhe-se uma técnica de agrupamento de dados para a análise do resultado apresentado na Figura 29.

O método *k-means* é vastamente utilizado em problemas de segmentação de dados (67). Particularmente, escolhe-se este método para a categorização do conjunto de resultados aqui obtidos. O algoritmo 4 (67) descreve o passo-a-passo de sua execução.

Algoritmo 4 – Método *k-means*

Início

// entradas: passo 1 e passo 2
// saída: passo 6

passo 1 - Define-se o conjunto de dados contendo as observações $\{x_n\}$, com $n = 1, \dots, N$. Cada observação x_n possui dimensão D .

passo 2 - Define-se uma quantidade K de centroides. Esta quantidade definirá a quantidade de partições.

passo 3 - Inicializa-se um conjunto de centroides $\{m_k\}$, com $n = 1, \dots, K$. Cada centroide possui dimensão D .

passo 4 - A partir do conjunto $\{m_k\}$, atribui-se cada observação x_n a um centroide m_k

passo 5.1 - Calcula-se a variância total do agrupamento $\sum_{k=1}^K N_k \sum_{n=1}^N (x_i - m_k)^2$ em relação a $\{m_k\}$

passo 5.2 - Atualiza-se as posições do conjunto de centroides $\{m_k\}$ de forma a minimizar a variância total do agrupamento.

passo 6 - Repete-se os passos 5.1 e 5.2 até que a variância total computada seja invariável.

Fim

O uso do método *k-means* pressupõe a decisão de quantas partições (67) devem ser escolhidas no agrupamento. Neste texto, considerando os aspectos de isolamento e de escoamento que originaram o conjunto de dados sob análise, opta-se por agrupamentos de 2 a 7 partições. Usa-se a análise de silhueta (68) para analisar cada agrupamento e, com base nela, decidir pela melhor escolha de particionamento.

O algoritmo 5 (68) descreve o passo-a-passo da execução da análise de silhueta.

Algoritmo 5 – Análise de silhueta

Início

// entradas: passo 1 e passo 2

// saídas: passo 7

passo 1 - Elenca-se o conjunto de dados contendo as observações $\{x_n\}$, com $n = 1, \dots, N$. Cada observação x_n possui dimensão D .

passo 2 - Elenca-se o agrupamento de interesse contendo as partições $\{C_k\}$ e seus respectivos centroides m_k , com $k = 1, \dots, K$. K é a quantidade de partições.

passo 3 - Para cada ponto x_i pertencente a uma determinada partição C_k , calcula-se $a_{x_i} = \frac{1}{\|C_k\|-1} \sum_{\substack{x_j \in C_k \\ x_i \neq x_j}} d(x_i, x_j)$.

// $\|C_k\|$ equivale à quantidade total de observações contidas na partição C_k

// $d(x_i, x_j)$, neste texto, equivale à distância de Manhattan entre x_i e x_j

// quanto menor é o valor de a_{x_i} , mais assertiva é a atribuição de a_{x_i} à C_k

passo 4 - Para cada ponto x_i pertencente a uma determinada partição C_k , calcula-se $b_{x_i} = \text{mínimo}_{C_m \neq C_k} \left(\frac{1}{\|C_m\|} \sum_{x_j \in C_m} d(x_i, x_j) \right)$.

// b_{x_i} equivale à menor distância média entre o ponto x_i e todos os pontos de uma determinada partição C_k na qual o ponto x_i não está contido

// A partição C_k , então, é a partição vizinha ao ponto x_i

passo 6 - Para cada ponto x_n calcula-se o seu coeficiente de silhueta s_{x_i} .

passo 6.1 - se $a_{x_i} < b_{x_i}$, $s_{x_i} = 1 - \frac{a_{x_i}}{b_{x_i}}$

passo 6.2 - se $a_{x_i} = b_{x_i}$, $s_{x_i} = 0$

passo 6.3 - se $a_{x_i} > b_{x_i}$, $s_{x_i} = \frac{b_{x_i}}{a_{x_i}} - 1$

passo 6.4 - Calcula-se o valor médio dos coeficientes de silhueta \bar{s} .

passo 7 - Avalia-se o perfil de cada silhueta.

// Quanto mais adequado é o agrupamento, i.e., quanto mais adequadas são as atribuições dos pontos às suas partições, mais característico é o perfil de cada silhueta.

// Cada silhueta deve exceder o valor de \bar{s}

Fim

6.6 Resultados do agrupamento

Os particionamentos realizados no conjunto bidimensional de 405 pontos, visto na Figura 29, é apresentado a seguir. Aplica-se o Algoritmo 5 em agrupamentos de 2 a 7 partições e, então, apresenta-se graficamente os seus resultados.

Na Figura 31, observa-se o resultado do agrupamento com 2 partições.

No primeiro gráfico, que contém a projeção das duas componentes principais – à esquerda, vê-se duas regiões. Em uma das regiões, os pontos são apresentados na cor cinza. Na outra região, os pontos são apresentados na cor verde. Em cada região, apresenta-se um ponto central identificado por “0” ou por “1”. Este ponto central é definido como o centroide da partição. Conforme o Algoritmo 4, os centroides representam os pontos em que a variância total do agrupamento é mínima. As duas partições possuem uma fronteira formada por um segmento linear. Pontos à direita da fronteira pertencem à partição cujo centroide é “0”, enquanto pontos à esquerda da fronteira; à partição cujo centroide é “1”. Os pontos em uma dada partição possuem considerável grau de similaridade entre si, quando comparados com os pontos de outra região.

No segundo gráfico, são apresentadas as silhuetas de cada partição – à direita. Cada ponto do domínio, entre os 405 pontos, compõe a abscissa com um valor entre -1 e +1 através de seu coeficiente de silhueta. A linha tracejada, em vermelho, define o valor médio dos coeficientes de silhueta do agrupamento. Observa-se que a silhueta relativa ao centroide “0” possui uma largura (eixo da ordenada), aproximadamente, duas vezes menor do que a largura (eixo da ordenada) relativa ao centroide “1”.

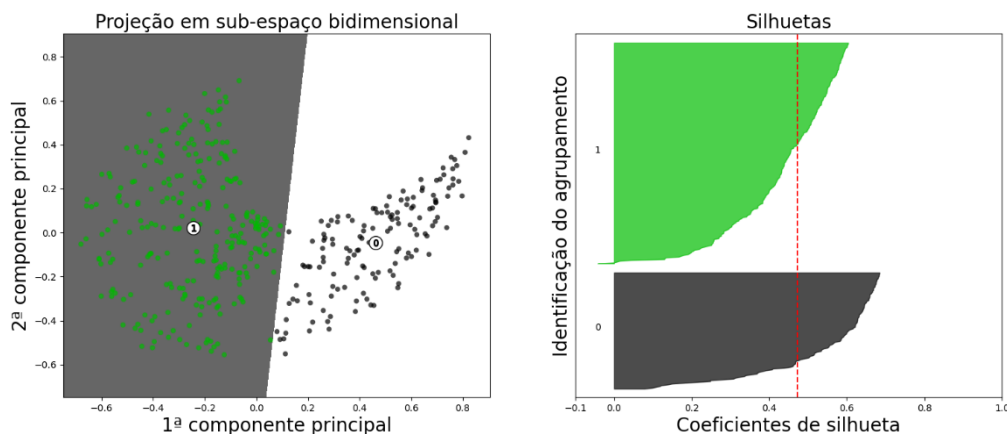


Figura 31 – Análise de silhueta com 2 partições

Analogamente ao resultado do agrupamento com 2 partições, indicado anteriormente, observa-se os resultados com 3 a 7 partições desde a Figura 32 até a Figura 36.

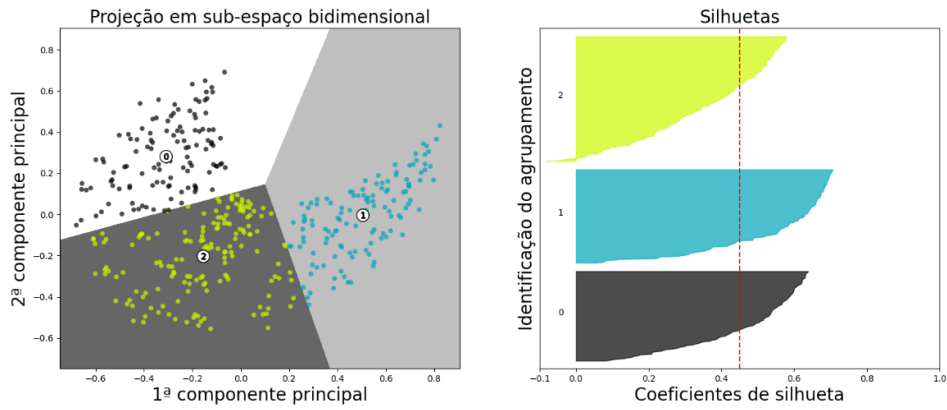


Figura 32 – Análise de silhueta com 3 partições

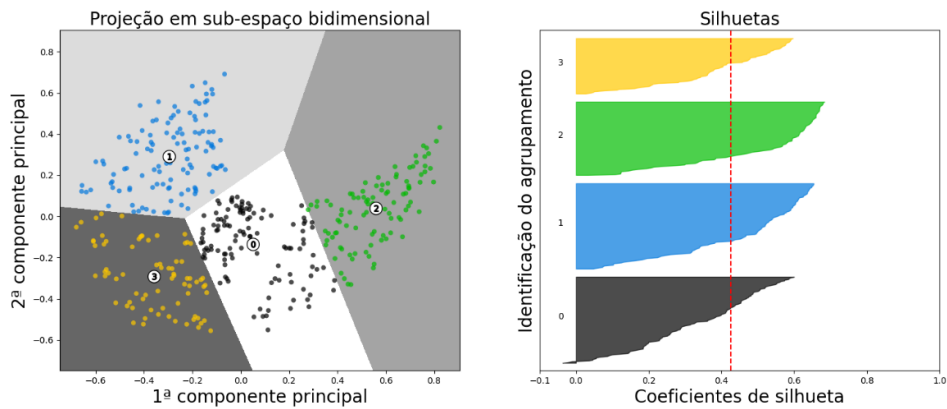


Figura 33 – Análise de silhueta com 4 partições

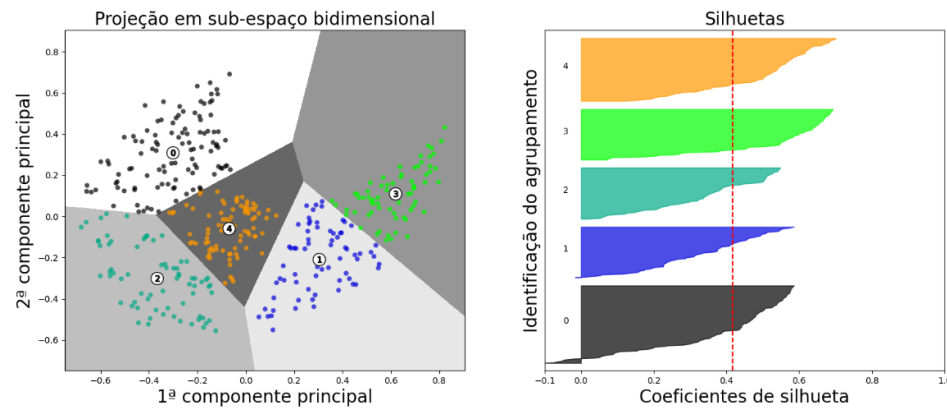


Figura 34 – Análise de silhueta com 5 partições

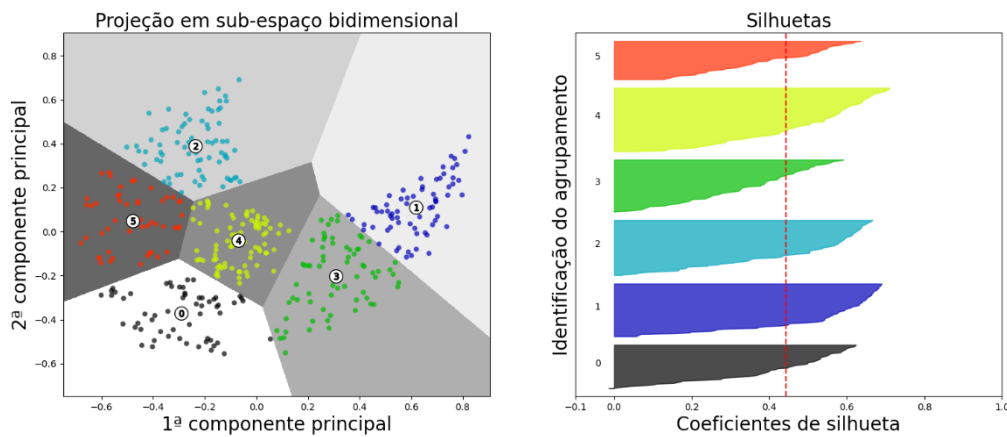


Figura 35 – Análise de silhueta com 6 partições

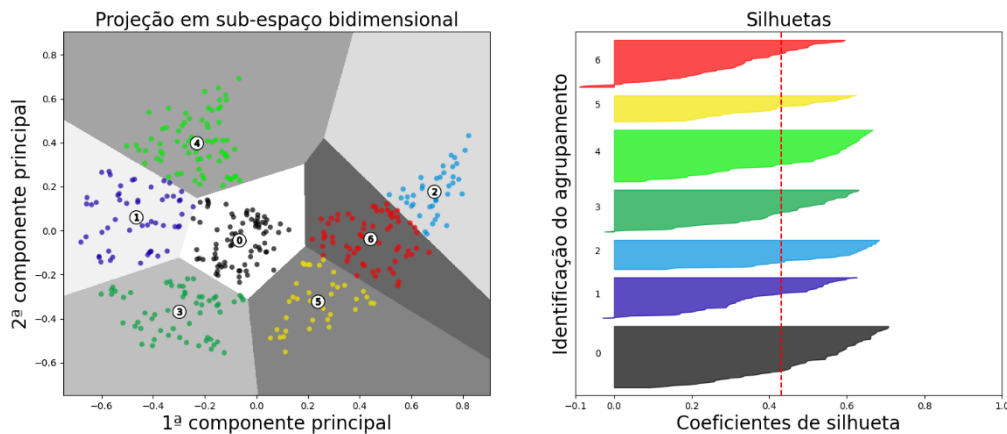


Figura 36 – Análise de silhueta com 7 partições

Em todos os agrupamentos propostos, o valor médio dos coeficientes de silhueta é superado por cada silhueta. Assim, satisfaz-se a condição necessária de validação dos particionamentos.

Em cada agrupamento, a largura (eixo da ordenada) relativa a cada partição é comparada com as demais larguras. Quanto menor a dispersão das larguras, mais uniformemente distribuídos – entre as partições – são os pontos do agrupamento. Sob este critério, as silhuetas do agrupamento com 4 partições apresentam o perfil mais regular entre todos os agrupamentos.

Desta forma, a partir do agrupamento com 4 partições, visto na Figura 33, a seguir, destaca-se pontos referentes aos casos limítrofes do conjunto original de 405 casos ensaiados via MEF.

Na Figura 37, 12 pontos são destacados:

- Os pontos **0, 1, 2 e 3** (em vermelho) advém de casos em que a distância entre unidades capacitivas adjacentes é de 50 mm; os pontos **4, 5, 6 e 7** (em verde), de casos em que a distância entre unidades capacitivas adjacentes é de 150 mm; os pontos **8, 9, 10 e 11** (em azul), de casos em que a distância entre unidades capacitivas adjacentes é de 250 mm.

Observa-se que os pontos em vermelho – referentes aos casos em que a distância entre unidades capacitivas é menor, de $D_1 = 50 \text{ mm}$ – estão próximos à fronteira curvilínea mais extensa da lúnula. De outra forma, os pontos em azul – referentes aos casos em que a distância entre unidades capacitivas é maior, de $D_3 = 250 \text{ mm}$ – estão próximos à fronteira curvilínea menos extensa da lúnula. No subespaço bidimensional, estas 2 observações sugerem que os 81 casos de $D_1 = 50 \text{ mm}$ são mais suscetíveis à variação da quantidade de saias das buchas do que os 81 casos de $D_3 = 250 \text{ mm}$.

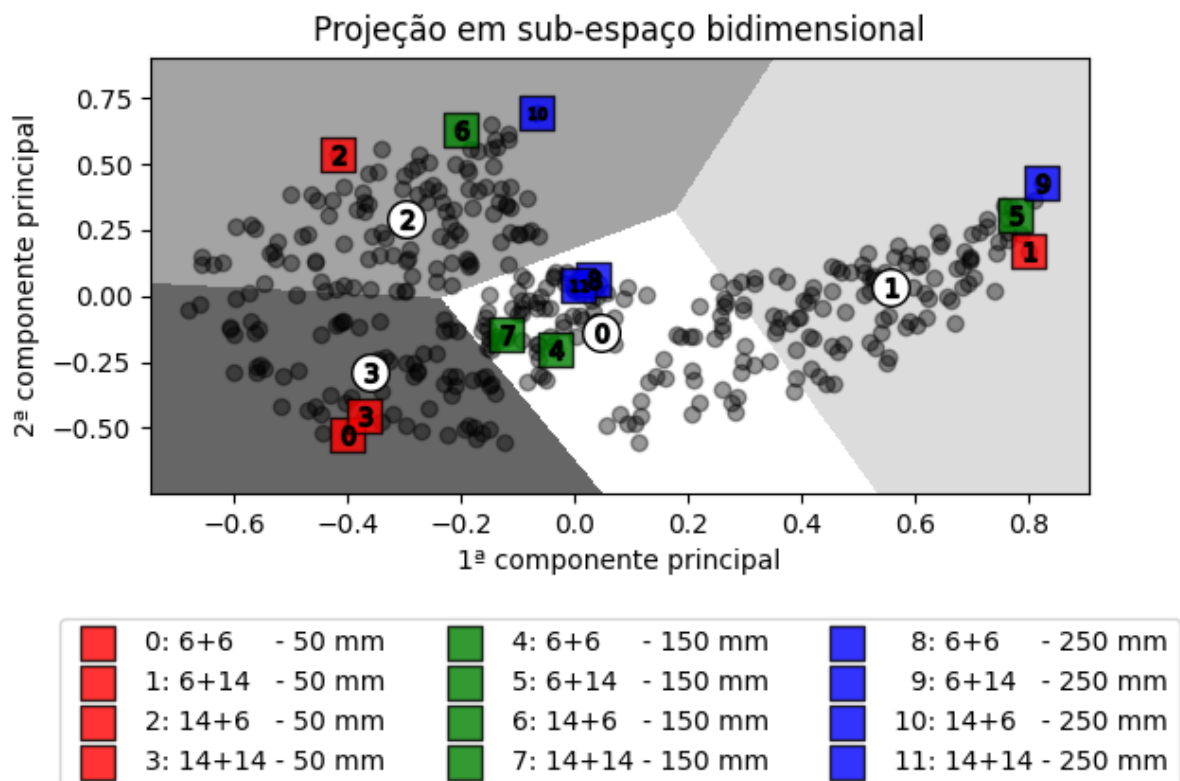


Figura 37 – Observações destacadas em 4 partições

Ainda, entre os 12 pontos destacados na Figura 37, tem-se:

- Os pontos **0, 1, 4, 5, 8 e 9** representam casos em que as buchas do conjunto $\Omega_A = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$ contêm 6 saias, enquanto as demais buchas contêm 6 ou 14 saias.
- Os pontos **2, 3, 6, 7, 10 e 11** representam casos em que as buchas do conjunto $\Omega_A = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$ contêm 14 saias, enquanto as demais buchas contêm 6 ou 14 saias.

Considerando as condições de contorno indicadas na Figura 26, observa-se que:

- i) quando as buchas do conjunto $\Omega_A = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$ têm maior distância de escoamento do que as buchas do conjunto $\Omega_B = \{\Omega_{L1}, \Omega_{U2}, \Omega_{L3}, \Omega_{U4}\}$, o caso correspondente é agrupado na partição 1.
- ii) quando as buchas do conjunto $\Omega_A = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$ têm menor distância de escoamento do que as buchas do conjunto $\Omega_B = \{\Omega_{L1}, \Omega_{U2}, \Omega_{L3}, \Omega_{U4}\}$, o caso correspondente é agrupado na partição 2.

Assim, a partição 1 representa menor risco de descarga sobre superfícies de bucha, uma vez que as buchas Ω_{U1} e Ω_{L4} – presentes no conjunto Ω_A – estão submetidas à maior diferença de potencial elétrico, de 20 kV, entre todas as buchas. Analogamente, a partição 2 representa maior risco de descarga sobre superfícies de bucha.

Também, observa-se que:

- iii) quando as buchas do conjunto $\Omega_A = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$ têm a mesma distância de escoamento do que as buchas do conjunto $\Omega_B = \{\Omega_{L1}, \Omega_{U2}, \Omega_{L3}, \Omega_{U4}\}$, o caso correspondente é agrupado nas partições 0 e 3.

Por fim, a partição 3 – que contém os casos correspondentes aos pontos **0 e 3**, de $D_1 = 50 \text{ mm}$ – representa maior risco de ruptura. Analogamente, a partição 0 – que contém os casos correspondentes aos pontos **4, 7, 8 e 11**, de $D_2 = 150 \text{ mm}$ e de $D_3 = 250 \text{ mm}$ – representa menor risco de descarga.

Os resultados apresentados nesta seção também se encontram em (69).

7 Efeitos da presença de anel anti-corona em banco de capacitores

Entre as técnicas de mitigação de risco de falha dielétrica em sistemas de isolamento, tem-se a aplicação de anel anti-corona. Este componente é escolhido de forma a uniformizar o campo elétrico sobre regiões de interesse. Tipicamente, em equipamentos como para-raios, chaves-seccionadoras e disjuntores, tais regiões são as terminações de buchas e isoladores.

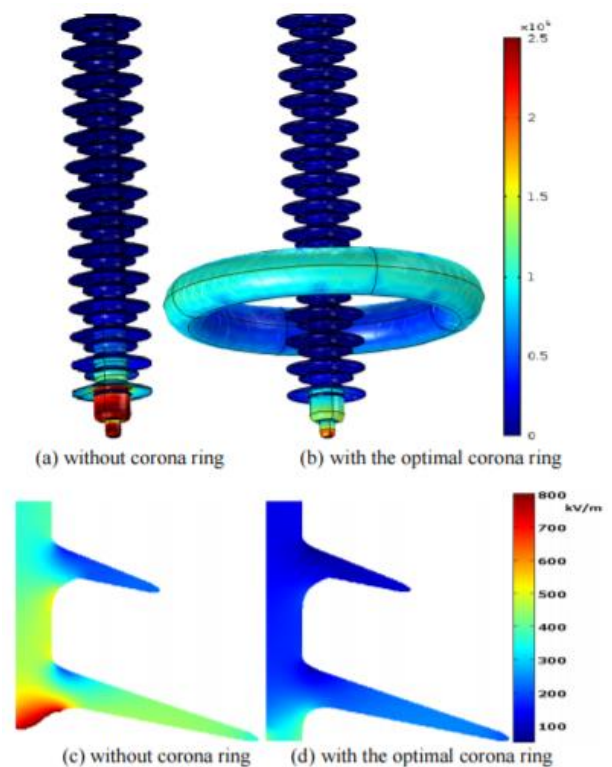
Em todos os casos, o uso ótimo do anel anti-corona é estabelecido ao circunscrever um ou mais locais em que a intensidade de campo elétrico deve ser controlada. Entre as variáveis de decisão para a aplicação de um anel, têm-se: (i) o tamanho do raio de uma seção transversal do anel, e (ii) a distância entre o anel e os locais cujos efeitos de sua presença deseja-se impor (70).

Na Figura 38, pode-se ver exemplos de uso de anel anti-corona. Na parte (b) da mesma Figura, ilustra-se o efeito da atenuação e, também, da uniformização do campo elétrico sobre saias de um isolador.



(a) Chave rápida com aneis anti-corona

Fonte: extraído de (24).



(b) Representação de isolador

Fonte: extraído de (71).

Figura 38 – Exemplos de aplicação de aneis anti-corona

Na presente seção, a aplicação de anéis anti-corona a uma representação de um banco de capacitores é feita. São estudados os efeitos da presença do anel, quando comparados com a sua ausência. Também, estuda-se a localização preferencial do anel, ao se deslocar a sua posição vertical.

7.1 Considerações sobre carga de isolamento

Como visto nas seções 5 e 6, o meio de isolamento no entorno de buchas e conexões de um banco de capacitores é afetado por múltiplas variáveis e, assim, uma técnica de análise deve ser empregada para se obter observações representativas do sistema. Geralmente, avalia-se a intensidade de campo elétrico entre pontos pré-determinados no domínio de estudo. Esta avaliação tende a bem revelar locais de máximos e mínimos ao longo do segmento ou superfície que contêm tais pontos. No entanto, outros métodos eficientes também são utilizados na literatura.

De forma equivalente, o problema aqui proposto – análise dos efeitos de uso de anel anti-corona – requer uma técnica capaz de bem representar o desempenho dielétrico. Para tanto, aplica-se o método apresentado em (72). Nele, considerando uma região entre condutores contendo materiais dielétricos distintos, adota-se a “carga de isolamento” (72) (tradução nossa de *insulation load*) como critério de desempenho da alocação dos materiais dielétricos. A carga de isolamento é definida através do seguinte termo:

$$I = \int_{\Omega_1} |E_m|^2 d\Omega \quad (12)$$

sendo que Ω_1 é a região que contém material dielétrico.

Considerando-se um volume fixo de materiais dielétricos, em um domínio de estudo em que o reposicionamento destes materiais é possível enquanto as suas fontes são estritamente fixas, a maximização da carga de isolamento ocorre ao se deslocar materiais dielétricos de maior rigidez a locais em que a intensidade de campo elétrico é maior. Assim, diminui-se o risco de ruptura ou descarga.

No caso de buchas de unidades capacitivas, de forma oposta, a atenuação da intensidade de campo elétrico ao longo de suas superfícies é deveras importante – uma vez que descargas parciais podem levar à deterioração e perda de desempenho da bucha,

conforme exemplificado na Figura 39. Por isso, ao se fixar a geometria das buchas, a minimização da carga de isolamento corresponde à diminuição do risco de falha dielétrica nestes componentes.

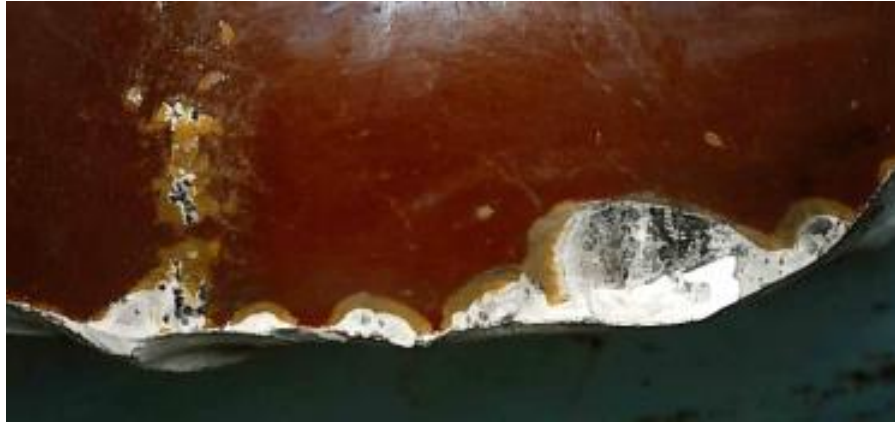


Figura 39 – Deterioração de uma superfície de material isolante devido a descarga

Fonte: extraído de (24).

Neste trabalho, a carga de isolamento é computada na fronteira entre a superfície da bucha e o ar no seu entorno, i.e., ao longo de toda a superfície de escoamento de cada bucha elencada – conforme Figura 40.

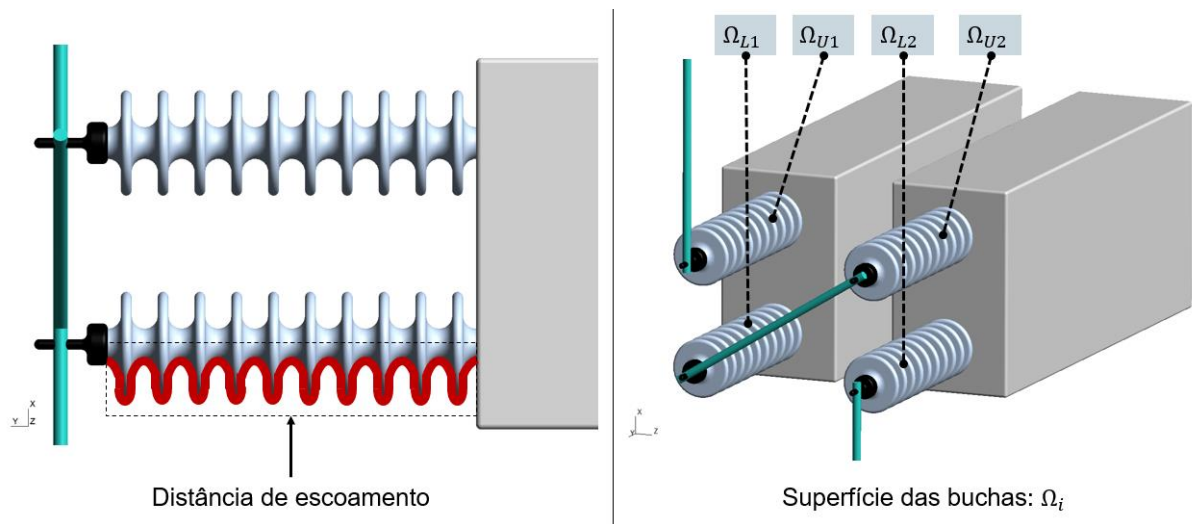


Figura 40 – Superfícies de cômputo da carga de isolamento: Ω_i

7.2 Descrição do domínio e objeto de estudo

Para o desenvolvimento da análise pretendida, um banco de capacitores é representado conforme se vê na Figura 41 e na Figura 42. São representadas 10 unidades capacitivas, dispostas em 5 níveis verticais, com 2 unidades por nível. As buchas de cada unidade capacitiva são compostas por 10 saias de porcelana, com uma distância de escoamento de 900 mm. Cada unidade capacitiva é conectada a uma unidade adjacente através de um condutor. Aneis anti-corona são posicionados no nível mais elevado do banco e, também, acima dele. Cada anel possui 150 mm de diâmetro e sua seção transversal é circular. No total, incluindo os anéis, o objeto de estudo tem 4 m de altura, 2 m de comprimento e 2 m de largura. Simplificações são adotadas, de forma que os isoladores entre níveis e os isoladores da base do banco não são considerados. Em qualquer caso, as dimensões destes componentes estão representadas no modelo.

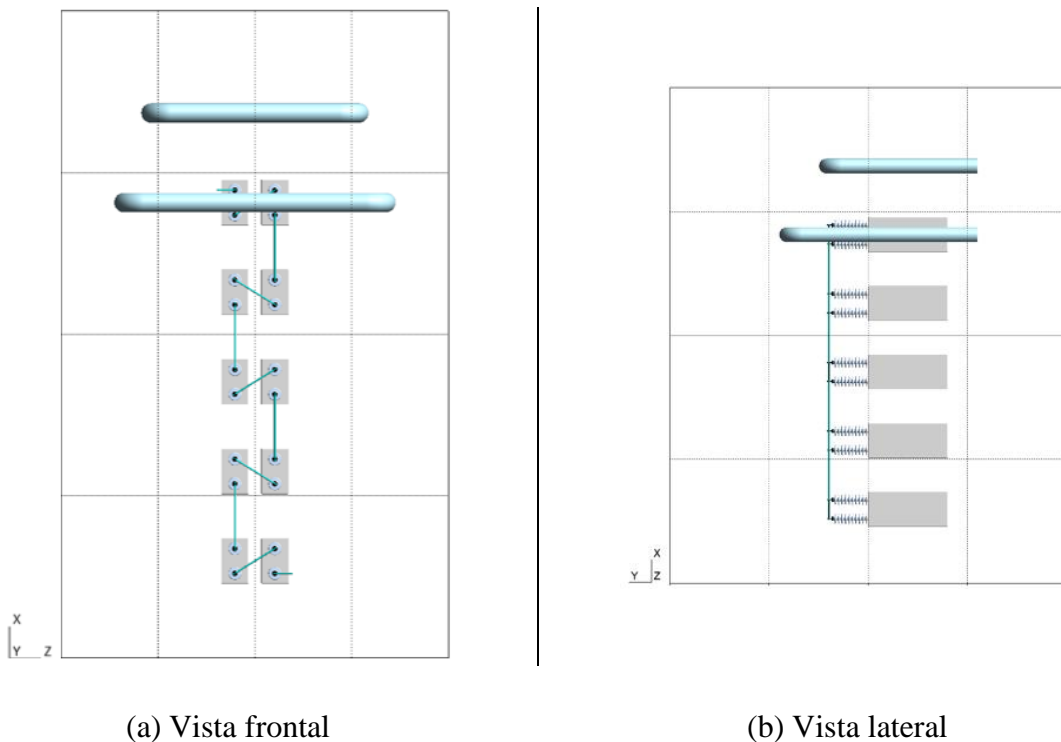
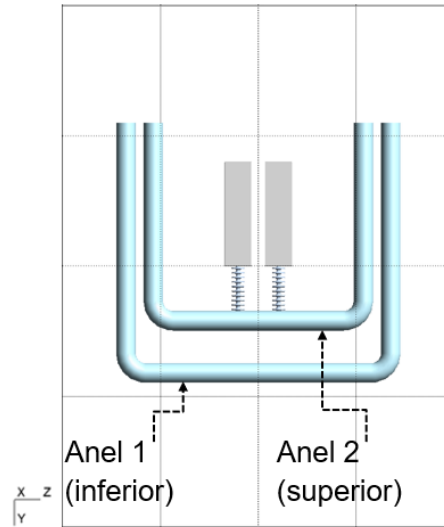


Figura 41 – Modelo representativo de um banco de capacitores com 2 anéis anti-corona



(a) Vista superior

Figura 42 – Modelo representativo de um banco de capacitores com 2 anéis anti-corona

Os materiais que constituem o domínio e seus principais atributos estão apresentados na Tabela 11. Assume-se invariáveis as características elétricas, para uma frequência de rede de 60 Hz e para a temperatura ambiente de 20 °C (59).

Tabela 11 – Características dos materiais que compõem o domínio e objeto de estudo

Identificação do material	Descrição	Permissividade relativa []	Condutividade elétrica [S/m]
1	Isolante: ar	1,0	$1,0 \times 10^{-10}$
2	Isolante: porcelana	6,0	$1,0 \times 10^{-14}$
3	Dielétrico: óleo	2,6	$1,0 \times 10^{-12}$
4	Condutor: cabo e terminal de Cobre	∞	$6,0 \times 10^{+7}$
5	Condutor: caixa de aço inoxidável	∞	$1,5 \times 10^{+6}$
6	Condutor: anel de Alumínio	∞	$3,7 \times 10^{+7}$

Condições de contorno são impostas aos terminais, aos cabos, às caixas das 10 unidades capacitivas e aos anéis anti-corona. Para o banco de capacitores, adota-se uma tensão de operação de referência equivalente a $V_{referência} = 345kV = 200 * \sqrt{3}kV$. Assim, cada unidade capacitiva, entre seus terminais, está submetida a uma diferença de potencial de 20 kV. O modelo apresentado na seção 4 é usado.

7.3 Efeitos da presença de anel anti-corona

São analisados 3 casos: (i) ausência de anel anti-corona, (ii) presença de um anel anti-corona e (iii) presença de dois anéis anti-corona.

Para cada caso, a distribuição de potencial elétrico escalar será apresentada em 2 planos de corte, conforme a Figura 43. Ambos os planos de corte coincidem com o terminal da unidade capacitiva cuja condição de contorno possui o maior valor, que é de 200 kV. Esta unidade se encontra no nível mais elevado do banco de capacitores.

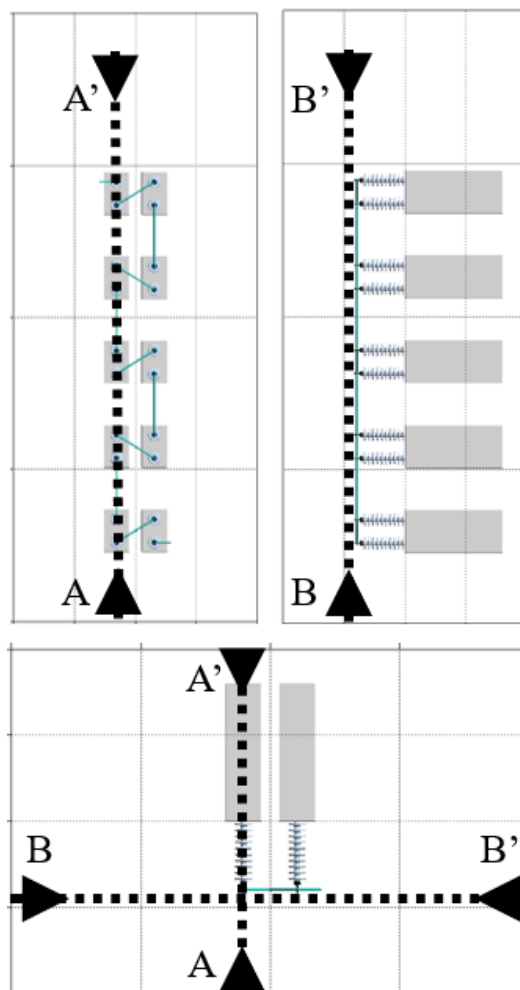


Figura 43 – Planos de corte para apresentação de resultados

Ilustrativamente, são apresentadas 30 linhas equipotenciais na Figura 44 e na Figura 45. Nelas, observa-se que – na ausência de anéis anti-corona – as linhas equipotenciais resultantes são equidistantes entre si ao longo dos níveis e nos seus entornos, exceto no nível mais elevado do banco de capacitores. Esta observação sugere uniformidade de campo elétrico no eixo vertical. Tal condição de uniformidade também se faz presente nas

proximidades dos terminais das unidades capacitivas, porém – nestes locais – a presença de terminais e cabos condutores distorce as componentes vertical e horizontal do campo elétrico.

No nível mais elevado, ainda no caso sem anéis, percebe-se maior concentração de linhas equipotenciais ao redor dos terminais das 4 buchas. Infere-se, assim, que a intensidade de campo elétrico é maior nestes locais.

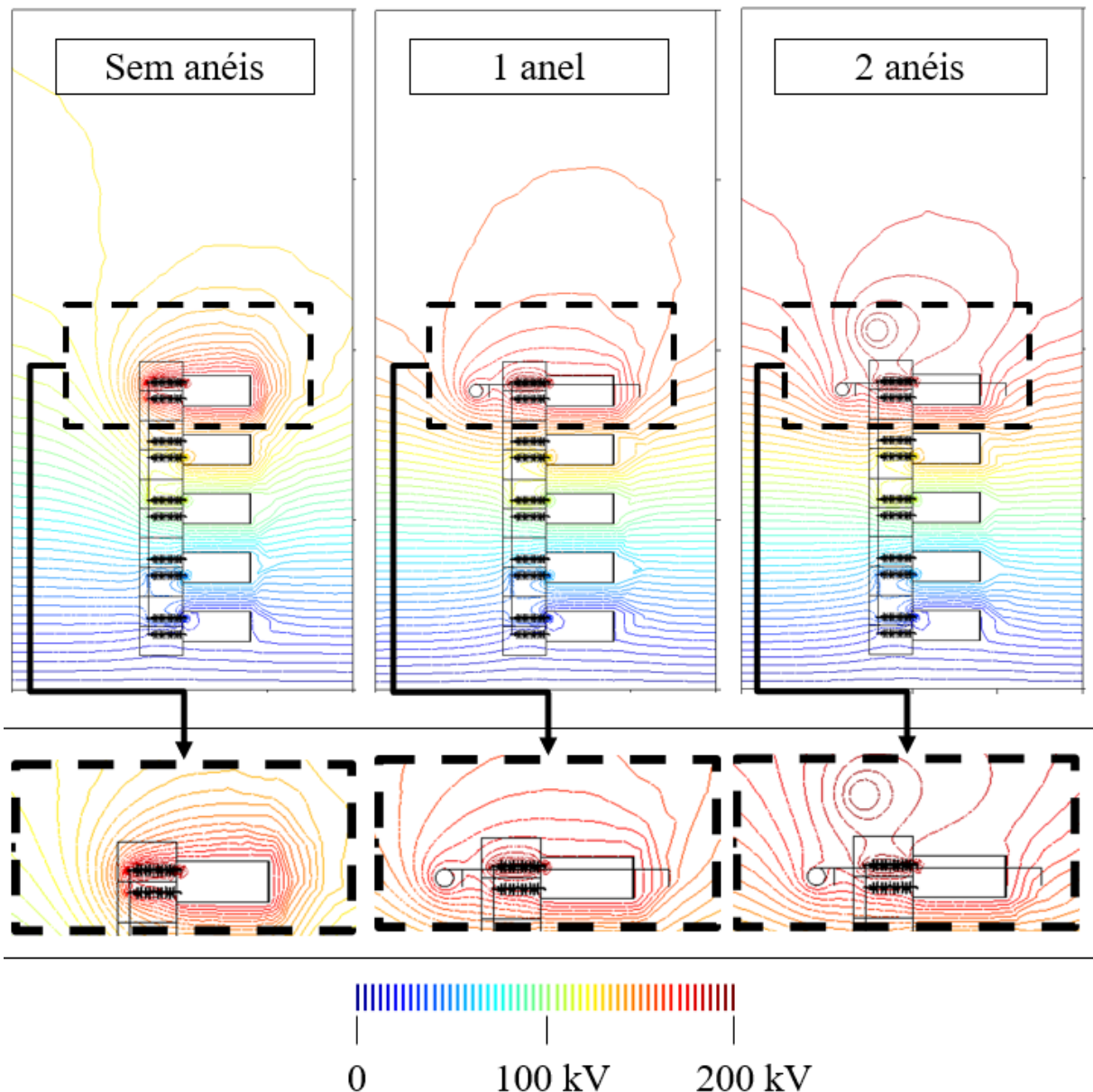


Figura 44 – Resultados do potencial elétrico escalar sobre o plano de corte AA'

Ao se comparar os 3 casos – sem e com anéis – não se percebe diferença relevante na distribuição de equipotenciais nos 4 níveis inferiores. Com isso, nas condições propostas, o efeito da presença de anel anti-corona no nível superior tende a ser mínimo sobre os níveis

inferiores. Ressalta-se, porém, que – em aplicações reais – a presença de névoa, chuva, depósitos de material contaminante ou outros sedimentos não deve se apresentar uniformemente distribuída ao longo do banco. Com isso, não se deve extrapolar o resultado ilustrado sem uma análise rigorosa e estendida destas condições para os níveis inferiores.

A presença do 2º anel contribui com a equipotencialização da região mais elevada, acima do último nível do banco de capacitores, conforme pode ser observado na Figura 45. Com isso, incrementa-se a uniformização do campo elétrico, nesta região.

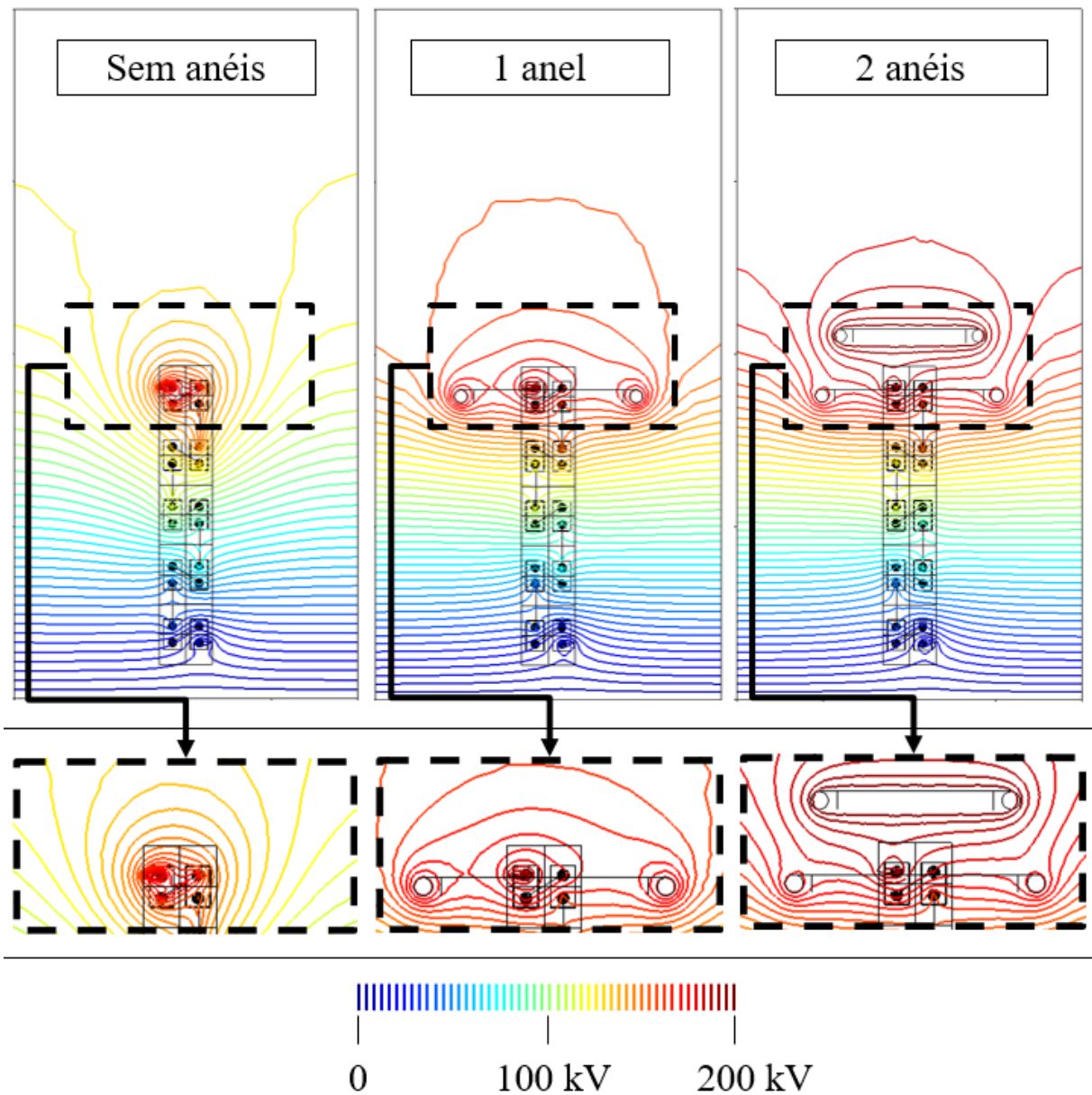


Figura 45 – Resultados do potencial elétrico escalar sobre o plano de corte BB'

Na Figura 46, pode-se ver o resultado da análise numérica após o cômputo da carga de isolamento. Aplica-se a equação (12) sobre as superfícies de todas as 4 buchas do nível superior, i.e., sobre $\Omega_i = \{\Omega_{U1}, \Omega_{L2}, \Omega_{U3}, \Omega_{L4}\}$, e soma-se seus valores. Para cada caso elencado, sem ou com anéis, a carga de isolamento (I'_i) é apresentada em uma escala relativa, de 0 a 100%, e definida conforme a Equação (13).

$$I'_i = \frac{I_i - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (13)$$

sendo que I_i é a carga de isolamento absoluta de um caso específico, I_{\min} é a menor carga de isolamento absoluta entre todos os casos, e I_{\max} é a maior carga de isolamento absoluta entre todos os casos.

Desta forma, a ausência de anel anti-corona corresponde a uma carga de isolamento de 100%; enquanto a presença dos 2 anéis anti-corona, a uma carga de isolamento de 0%. Também, a presença de apenas 1 anel anti-corona, no nível superior, corresponde a uma carga de isolamento de 24%, na mesma escala. Como resultado, ao se excluir outros fatores, um único anel anti-corona tende a reduzir, significativamente, riscos de falha dielétrica.

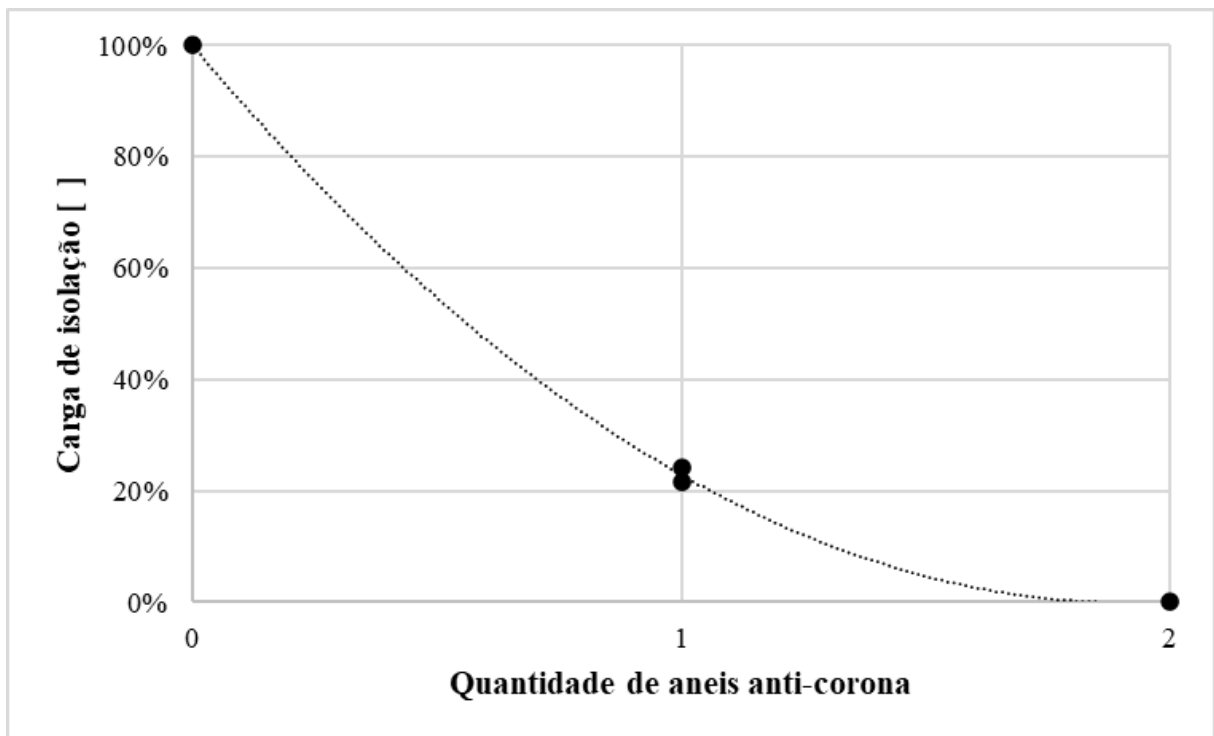


Figura 46 – Carga de isolamento vs. Quantidade de anéis anti-corona

Se, de outra forma, queira-se optar pela presença de 1 único anel anti-corona, seletivamente localizado acima do último nível do banco – i.e., “anel 2” conforme a Figura 42 – a carga de isolamento resultante é de 22%. Tal resultado é equivalente àquele com presença de 1 único anel anti-corona no próprio nível superior – i.e., “anel 1” conforme a Figura 42. Por fim, as simplificações adotadas e indicadas na seção 7.2, correspondem a isoladores que, em aplicações reais, são instalados nos segmentos entre unidades capacitivas. Sob as condições propostas, o resultado visto na Figura 44 indica que tais segmentos estão submetidos a campo elétrico uniforme. Assim, espera-se pouco ou nenhum prejuízo para a análise desenvolvida.

7.4 Efeitos da posição vertical do anel anti-corona

Busca-se mapear o resultado da carga de isolamento ao se modificar a posição vertical do anel anti-corona. Na representação esquemática do banco de capacitores, considera-se a presença de apenas 1 anel anti-corona, sendo este equivalente ao “anel 1” – vide Figura 42.

São elencados 13 casos equidistantes, com passos de 40 mm entre eles. Destes, na Figura 47, visualiza-se os casos limítrofes e o caso intermediário. Entre a posição limite superior ($X_{m\acute{a}x}$) e a posição limite inferior ($X_{m\grave{i}n}$), há 480 mm de distância. A saber, no modelo, a distância entre níveis é de 693 mm e a altura da caixa da unidade capacitiva é de 343 mm.

As mesmas condições de contorno assumidas na seção 7.3 são mantidas nesta seção.

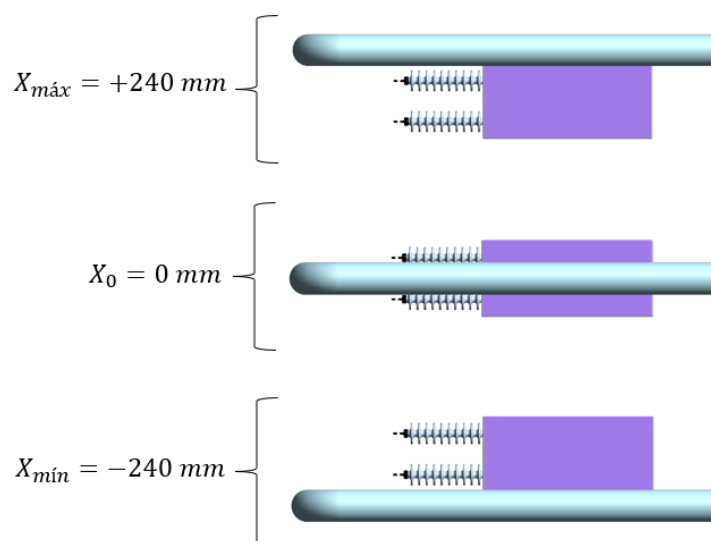


Figura 47 – Algumas posições do anel anti-corona

Os resultados podem ser vistos na Figura 48. Como visto na seção 7.3, a alocação do anel na posição intermediária ($X_0 = 0 \text{ mm}$) contribuirá significativamente para a atenuação da intensidade de campo elétrico na superfície das buchas. Este efeito é consequência da uniformização da distribuição do potencial elétrico escalar em todo o meio dielétrico circunscrito pelo anel.

Nas posições limítrofes, observa-se que a carga de isolamento é máxima ($I'_{X_{min}} = 100\%$) quando a posição do anel é mínima ($X_{min} = -240 \text{ mm}$) e que a carga de isolamento vale $I'_{X_{máx}} = 73\%$ quando a posição do anel é máxima ($X_{máx} = +240 \text{ mm}$). Desta forma, a posição mais elevada sugere menor risco de desempenho dielétrico à operação das buchas do que a posição mais inferior.

Nota-se, também, que há 2 mínimos locais ($I'_{X=+80\text{mm}} = 0\%$ e $I'_{X=-80\text{mm}} = 3\%$). Levando-se em conta (i) apenas os 13 casos elencados, (ii) a homogeneidade do meio e (iii) a métrica da carga de isolamento, otimiza-se a posição vertical do anel anti-corona quando $X_{ótimo} = +80 \text{ mm}$.

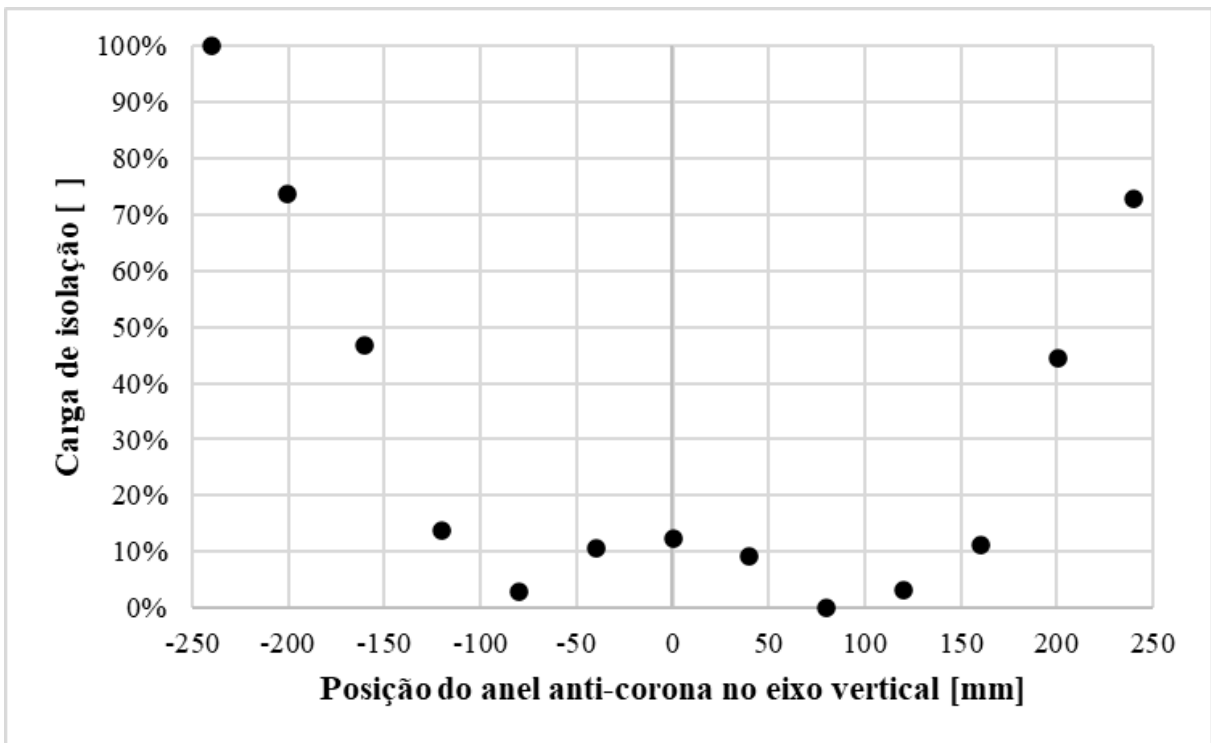


Figura 48 – Carga de isolamento vs. Posição do anel anti-corona

Os resultados apresentados nesta seção também se encontram em (73).

8 Considerações finais

Conforme indicado na seção 1.1, a análise de desempenho de sistemas dielétricos é fundamental em sistemas de transmissão de energia. Também, são muitos os parâmetros que influenciam o desempenho de buchas e isoladores para capacitores de potência. De um lado, por exemplo, ensaios laboratoriais tendem a representar parte do conjunto dos parâmetros que influenciam o problema. Por isso, tais ensaios são primordiais. De outra forma, porém, ambientes laboratoriais de alta-tensão são restritos em capacidade. No caso específico de bancos de capacitores, a realização de ensaios em escala real, em ambiente laboratorial ou de operação comercial, é tarefa árdua.

Modelos numéricos, de outra forma, antecipam a compreensão de problemas multivariáveis e, oportunamente, complementam resultados laboratoriais. No presente estudo, as seções 5, 6 e 7 corroboram para esta afirmação.

Na seção 5, observa-se que depósitos de poluição sobre a superfície de isoladores uniformizam a intensidade de campo elétrico sobre ela – ao mesmo tempo em que elevam o valor médio da intensidade. Nesta mesma seção, constata-se – com o incremento da quantidade de saias – a importância das distâncias de escoamento e de isolamento no controle da intensidade de campo elétrico na superfície de buchas.

Na seção 6, uma análise multivariável é feita. Nela, demonstra-se – por meio de algoritmos de aprendizagem de máquina – correlação fenomenológica entre as decisões do projetista e as suas consequências. Assim, um problema inverso é determinado e, por meio do seu desenvolvimento, pode-se inferir padrões de desempenho de escoamento e de isolamento em bancos de capacitores quando comparados entre si.

Na seção 7, vê-se que o desempenho de sistemas dielétricos pode ser avaliado sob o critério da “carga de isolamento”, em que uma quantidade limitada de material dielétrico suporta o estresse sobre ela imposto pela fonte. Também, ilustra-se a influência de anéis anti-corona e as posições ótimas de sua aplicação em um banco de capacitores.

O presente trabalho e a análise crítica que dele decorre sugerem diversas oportunidades de continuidade de pesquisa, entre as quais, destaca-se:

- Modelos de análise de desempenho sob chuva, sob assimetria de poluição, sob regime transitório e sob eventos de energização.
- Métodos de ensaios estatísticos – como acréscimos e decréscimos; sob condições de poluição artificial e natural.

- Avaliação de vida útil de isoladores e buchas com base em aspectos de escoamento e isolamento;
- Avaliação de proteção e monitoramento de bancos de capacitores com base em aspectos de escoamento e isolamento.

9 Referências

1. **LOOMS, J. S. T.** *Insulators for High Voltages*. 1ª (3ª reimp.). Londres : The Institution of Engineering and Technology, 2006. p. 261.
2. **CALLISTER JR., W. D. e RETHWISCH, D. G.** *Fundamentals of Materials Science and Engineering: an Integrated Approach*. 8ª. Nova Iorque : John Wiley & Sons, Inc., 2012. p. 910.
3. **ENGELBRECHT, C. S., et al.** *Outdoor Insulation in Polluted Conditions: Guidelines for Selection and Dimensioning - Part 2: The DC Case*. Paris : Cigré, 2012. p. 87.
4. **SOLOMONIK, E. A., et al.** Methods of statistical dimensioning of the outdoor insulation with respect to polluted conditions. *IEEE Russia Power Tech*. 2005, pp. 1-8.
5. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 5032: Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada*. 3ª. Rio de Janeiro : ABNT, 2014. p. 61.
6. —. *NBR 5034: Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV*. 2ª. Rio de Janeiro : ABNT, 2014. p. 28.
7. **AOUABED, FATIHA, et al.** Finite Element Modelling of electric field and voltage distribution on a silicone insulating surface. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. abril de 2018, Vol. 25, 2, pp. 413-420.
8. **OLIVETO, NICHOLAS e REINHORN, ANDREI.** Evaluation of as-installed properties of transformer bushings. *Engineering Structures*. maio de 2018, Vol. 162, pp. 29-36.
9. **GEUZAIN, C. e REMACLE, J.-F.** Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. maio de 2009, pp. 1309-1331.
10. **DULAR, P., et al.** A general environment for the treatment of discrete problems and its application to the finite element method. *IEEE Transactions on Magnetics*. setembro de 1998, pp. 3395-3398.
11. **KHAN, O. M. A. e HABIB, K.** *Developing Multi-Platform Apps with Visual Studio Code*. 1ª. Birmingham : Packt, 2020. p. 334.
12. **LANGTANGEN, H. P.** *A Primer on Scientific Programming with Python*. 2ª. Berlim : Springer, 2011. p. 706.
13. **PELLIKKA, M., et al.** Homology and cohomology computation in finite element modeling. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 5, outubro de 2013, Vol. 35, pp. 1195-1214.

14. **GEUZAINÉ, C., et al.** ONELAB: Open Numerical Engineering LABoratory. *Colloque National en Calcul des Structures - CSMA: Giens*. 2013, 11.
15. **SVANBERG, K.** The method of moving asymptotes - a new method for structural optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. janeiro de 1987, pp. 359-373.
16. **OSTROWSKI, A. e GACZKOWSKI, P.** *Software Architecture with C++*. 1ª. Birmingham : Packt, 2021. p. 540.
17. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 5456: Eletricidade geral - terminologia*. 2ª. Rio de Janeiro : ABNT, 2010. p. 151.
18. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION.** *IEC 60050-436: International electrotechnical vocabulary – chapter 436: power capacitors*. 1ª. Genebra : IEC, 1990. p. 26.
19. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 8763: Capacitores série para sistemas de potência*. 2ª. s.l. : ABNT, 1998. p. 25.
20. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION.** *IEC 60871-1: Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V - Part 1: General*. Genebra : IEC, 2014.
21. **MOXLEY, R., POPE, J. e ALLEN, J.** *Capacitor bank protection for simple and complex configurations*. College Station, TX : IEEE Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2012. pp. 436-441.
22. **KIRSCHNER, L., et al.** *Increasing Chuanyu Grid-to-Central China Mains Grid Power Transfer Capability by 550kiV Fixed Series Capacitor FSC Fengie*. Chongqing : IEEE International Conference on Power System Technology, 2006. pp. 1-5.
23. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** *NBR 6939: Coordenação do isolamento*. 3ª. Rio de Janeiro : ABNT, 2018. p. 15.
24. **MCDERMID, W. e BLACK, T.** External flashovers, related insulation failures and corrective measures in converter stations of Nelson River bipole 1 and bipole 2. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. dezembro de 2014, Vol. 21, 6, pp. 2406-2414.
25. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION.** *Insualtion co-ordination - Part 2: application guidelines*. Genebra : IEC, 2018. p. 318.
26. **JIANG, X., et al.** Comparison of DC Pollution Flashover Performances of Various Types of Porcelain, Glass, and Composite Insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2ª, 2008, Vol. 23.

27. **Farzaneh, M. e al, et.** Selection of station insulators with respect to ice and snow - part I: technical context and environmental exposure. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1^a, 2005, Vol. 20.
28. **PHILLIPS, A. J., CHILDS, D. J. e SCHNEIDER, H. M.** Aging of nonceramic insulators due to corona from water drops. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 3^a, 1999, Vol. 14.
29. —. Water drop corona effects on full-scale 500 kV non-ceramic insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1^a, 1999, Vol. 14.
30. **PHILLIPS, A. J., JANDRELL, I. R. e REYNDERS, J. P.** Modelling and measurement of the corona inception point on a water droplet as a function of air pressure. *International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*. 1994, Vol. 1.
31. **LÉVESQUE, F., et al.** Experimental Study of Dynamic Bending Stiffness of ACSR Overhead Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 5^a, 2015, Vol. 30.
32. **GRASES, J., et al.** Seismic behaviour of toughened glass station post insulators for 800 kV networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 3^a, 1989, Vol. 4.
33. **BELLORINI, S., et al.** Seismic qualification of transformer high voltage bushings. *IEEE Transactions on Power Delivery*. outubro de 1998, Vol. 13, 4, pp. 1208-1213.
34. **AVILAPRIYA, F., et al.** *Electric field calculation and material optimization of 765kV bushing using FEA*. Chennai : IEEE - International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication, 2015. pp. 64-70.
35. **CHEON, H. G., et al.** Insulation Design of 60 kV Class Bushing at the Cryogenic Temperature. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 3^a, 2010, Vol. 20.
36. **GARCIA-COLON, V. R.** Restoring reliability of aged bushings. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. 1^a, 2009.
37. **JIANG, X., et al.** Study on AC pollution flashover performance of composite insulators at high altitude sites of 2800-4500m. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1^a, 2009, Vol. 16.
38. **DISSADO, L. A.** Predicting electrical breakdown in polymeric insulators. From deterministic mechanisms to failure statistics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 5^a, 2002, Vol. 9.
39. **ENGELBRECHT, C. S., GUTMAN, I. e HARTINGS, R.** A practical implementation of statistical principles to select insulators with respect to polluted conditions on overhead a.c. lines. *IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, Russia*. 2005.

40. **INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS.** *IEEE Std 18-2002: Standard for Shunt Power Capacitors.* Nova Iorque : IEEE, 2013. p. 39.
41. **INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS.** *IEEE Std 824-2004: Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems.* Nova Iorque : IEEE, 2005. p. 53.
42. —. *IEEE Std 1427-2006: Guide for Recommended Electrical Clearances and Insulation Levels in Air Insulated Electrical Power Substations.* Nova Iorque : IEEE, 2007. p. 50.
43. **GOFF, M. B. e ELTOM, A. H.** *Oil filled bushing secrets revealed.* Lake Buena Vista, FL : IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2013. pp. 1-9.
44. **VOLK, M., et al.** Pultruded thermoplastic composites for high voltage insulator applications. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* agosto de 2020, Vol. 27, 4, pp. 1280-1287.
45. **WEI, H. J., CHERNEY, E. A. e JAYARAM, S.** *Improvements to the performance of silicone rubber housed composite bushings by means of a resistive coating.* Indianapolis, IN : IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004. pp. 324-327.
46. **INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMISSION.** *IEC/TS 60815-2: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems.* Genebra : IEC, 2008.
47. —. *IEC/TS 60815-3: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 3: Polymer insulators for a.c. systems.* Genebra : IEC, 2008.
48. —. *IEC/TS 60815-4: Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions – Part 4: Ceramic and glass insulators for a.c. systems.* Genebra : IEC, 2016.
49. **BOUDISSA, R., BAYADI, A. e BAERSCH, R.** Effect of pollution distribution class on insulators flashover under AC voltage. *Electric Power Systems Research.* 2013, Vol. 104, pp. 176-182.
50. **GUTMAN, I. e DERNFALK, A.** Pollution tests for polymeric insulators made of hydrophobicity transfer materials. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* abril de 2010, Vol. 17, 2, pp. 384-393.
51. **DANIELS, S.L.** On the Ionization of Air for Removal of Noxious. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE.* 4^a, 2002, Vol. 30.
52. **RUBINETTI, D., WEISS, D. e EGLI, W.** Corona Discharge - a Fully Coupled Numerical Approach Verified and Validated. *Int. Jnl. of Multiphysics.* 4^a, 2017, Vol. 11.

53. **CHANG, J. S., LAWLESS, P. A. e YAMAMOTO, T.** Corona Discharge Processes. *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*. 6^a, 1991, Vol. 19.
54. **SALAM, M.A.** *Electromagnetic Field Theories for Engineering*. 1^a. Berlim : Springer, 2014. pp. pp. 91–106.
55. **CARDOSO, J. R.** *Métodos Numéricos no Eletromagnetismo In: CARDOSO, J. R.; Engenharia Eletromagnética*. 1^a. Rio de Janeiro : Elsevier, 2011. pp. 443-465.
56. **REBAY, S.** Efficient unstructured mesh generation by means of Delaunay triangulation and Bowyer-Watson algorithm. *Journal of Computational Physics*. maio de 1993, pp. 125-138.
57. **CHAKRAVORTI, S. e STEINBIGLER, H.** Capacitive-resistive field calculation on HV bushings using the boundary element method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. abril de 1998, Vol. 5, 2, pp. 237-244.
58. **FRENCH, D. M., et al.** *Dielectric strength testing of 3D printed plastics and application to a high voltage transformer pulser*. Austin, TX : IEEE Pulsed Power Conference - PPC, 2015.
59. **STARKE, R. e SCHOBER, G. A. H.** Functional approach to electrodynamics of media. *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*. 2015, Vol. 14.
60. **VOLAT, C.** Comparison between the use of surface and volume conductivity to compute potential distribution along an insulator in presence of a thin conductive layer. *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*. 1^a, 2013, Vol. 1.
61. **COSTEA, M. e BARAN, I.** The behavior of high voltage insulators during the up-and-down procedure. *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*. 1^a, 2017, Vol. 1.
62. **SIEMENS ENERGY.** *Power Engineering Guide*. Erlangen : s.n., 2016. p. 569. 8.0.
63. **KOLLER, D. e FRIEDMAN, N.** *Probabilistic Graphical Models – Principles and Techniques*. Cambridge : MIT Press, 2009. p. 1233.
64. **COVER, T. M. e THOMAS, J. A.** *Elements of Information Theory*. 2^a. Nova Iorque : John Wiley & Sons, 2006. p. 774.
65. **BISHOP, C. M.** *Pattern Recognition and Machine Learning*. 1^a. Berlim : Springer, 2006. pp. pp. 561-570.
66. **JOLLIFFE, I. T. e CADIMA, J.** Principal component analysis: a review and recent developments. *A philosophical transactions of the Royal Society*. 2016.
67. **HASTIE, T., TIBSHIRANI, R. e FRIEDMAN, J.** *Elements of Statistical Learning*. Berlim : Springer, 2009. pp. pp. 459-463, pp. 501-520.

68. **ROUSSEEUW, P.J.** Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1987, Vol. 20.
69. **LOPES, G., LEBENSZTAJN, L. e ZERNERI, R.** Clearance and Creepage on Power Capacitors – a Multivariate Analysis through Clustering and Dimensionality Reduction. *International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism*. 2021, Vol. 1.
70. **M'HAMDI, B., TEGUAR, M. e MEKHALDI, A.** Optimal design of corona ring on HV composite insulator using PSO approach with dynamic population size. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016.
71. —. Potential and electric field distributions on HV insulators string used in the 400 kV novel transmission line in Algeria. *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*. 2013.
72. **LEE, K. H., et al.** Alleviation of Electric Field Intensity in High-Voltage System by Topology and Shape Optimization of Dielectric Material Using Continuum Design Sensitivity and Level Set Method. *IEEE Transactions on Magnetics*. março de 2015, pp. 1-4.
73. **LOPES, G., LEBENSZTAJN, L. e YAMAZAKI, S.** Electric field intensity in power capacitor banks - a sensitivity analysis on the surface of bushings. *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. 2021.

A Apêndice – Recursos e validação de resolução numérica

Estudos numéricos, através do MEF, exigem uma rotina de cálculo computacional representativa do equacionamento fenomenológico. A depender da quantidade de graus de liberdade presentes no modelo numérico e da extensão e refinamento geométricos do domínio, o esforço computacional pode variar consideravelmente. Nos estudos desenvolvidos neste trabalho, o esforço computacional não é objeto explícito de otimização e, tampouco, é fator limitante aos recursos disponíveis contemporaneamente. Este último ponto, sendo abrangente, também se dá devido à crescente disponibilidade de hardware – via computação local ou via computação em nuvem. Apesar disso, uma vez que – no MEF – diferentes recursos e estratégias de resolução estão presentes (ex.: métodos de geração e estabilização de malhas, métodos de computação de matrizes esparsas, métodos de resolução de sistemas lineares, métodos de renderização, entre outros) em um dado ambiente de aplicação computacional quando se compara com outro ambiente, deve-se atentar para a adequação inspeção e validação de resolução.

Assim, considerando que o presente documento apresenta análises de campo elétrico em regime harmônico com baixas frequências, foram feitas validações de resoluções obtidas em três ambientes de estudo numérico, conforme a lista a seguir:

- Ambiente computacional 1
 - i. Pré e pós-processamento: Gmsh versão 4.6.0
 - ii. Resolução: GetDP versão 3.3.0
 - iii. Acesso livre, com licença de uso público.

- Ambiente computacional 2
 - i. Pré e pós-processamento: Salome versão 9.7.0
 - ii. Resolução: Elmer FEM versão 8.4
 - iii. Acesso livre, com licença de uso público.

- Ambiente computacional 3
 - i. Pré e pós-processamento: Siemens Simcenter Magnet versão 2019.2
 - ii. Resolução: Siemens Simcenter *Low Frequency EM* versão 2019.2
 - iii. Acesso controlado, com licença de uso acadêmico.

Todos os ambientes de estudo numérico foram comparados na mesma configuração de componentes, listada a seguir:

- Componentes principais
 - i. Unidade central de processamento: *Intel i7-8700 12M 3.20 GHz*
 - ii. Unidade de processamento gráfico: *NVIDIA Quadro P2000 – 5 GB GDDR5*
 - iii. Memória de acesso aleatório: *2x32 GB DDR4*
 - iv. Armazenamento: *Solid State Drive 480 GB*
 - v. Sistema operacional: *Windows 10 Enterprise 2016 LTSB 64 bits*

Para comparação, elencou-se um conjunto de dois terminais condutores e um meio isolante equivalente ao ar, sob condições ideais. Na vertical, os dois terminais distam entre si de 50 cm. O domínio de comparação pode ser visto na Figura 49.

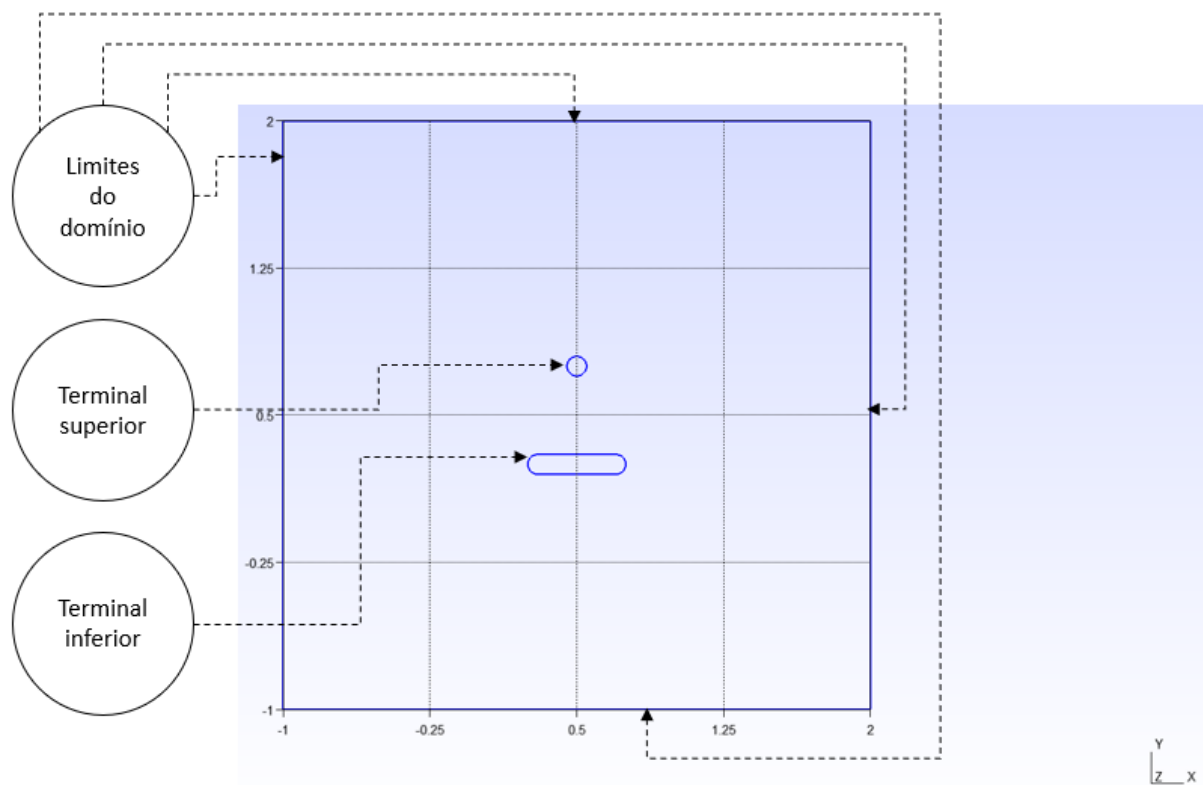
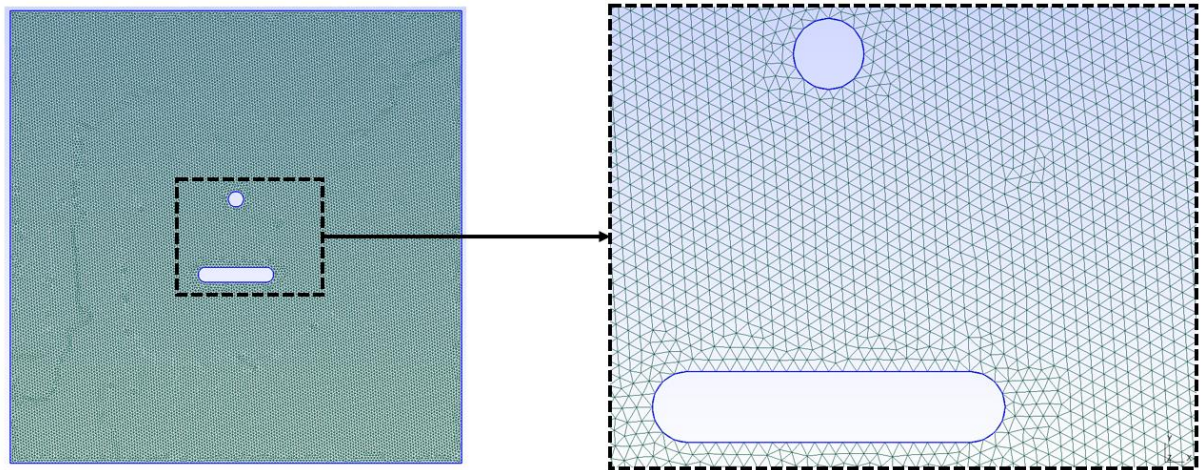


Figura 49 – Domínio de comparação

Uma malha de elementos finitos composta por triângulos equiláteros foi utilizada, conforme a Figura 50.



(a) Toda a malha no domínio

(b) Destaque da malha próximo aos condutores

Figura 50 – Malha de elementos finitos no domínio de comparação

Os três ambientes computacionais foram comparados sob as mesmas condições, considerando regime harmônico, em 60 Hz. Aplicou-se condições de contorno aos condutores conforme a Tabela 12.

Tabela 12 – Condições de contorno

Potencial elétrico no terminal superior [kV]	Potencial elétrico no terminal inferior [kV]	Potencial elétrico nos limites do domínio [kV]
+10	0	Não atribuído

Considerando os eixos de simetria decorrentes do domínio de comparação, infere-se que a intensidade de campo elétrico no ponto central do domínio de estudo equivale $\|E\|_{P_{central}} = (10 \text{ kV} - 0)/50 \text{ cm} = 20 \text{ kV/m}$. A saber o ponto central é $P_{central} = (x = 0,5\text{m}; y = 0,5\text{m})$.

Na Figura 51, pode-se ver o resultado da intensidade de campo elétrico ao longo do eixo horizontal descrito por $L_{simetria} = (x = \forall x; y = 0,5\text{m})$. Nela, verifica-se que a inferência se aproxima dos resultados obtidos com os modelos disponíveis nos ambientes computacionais comparados.

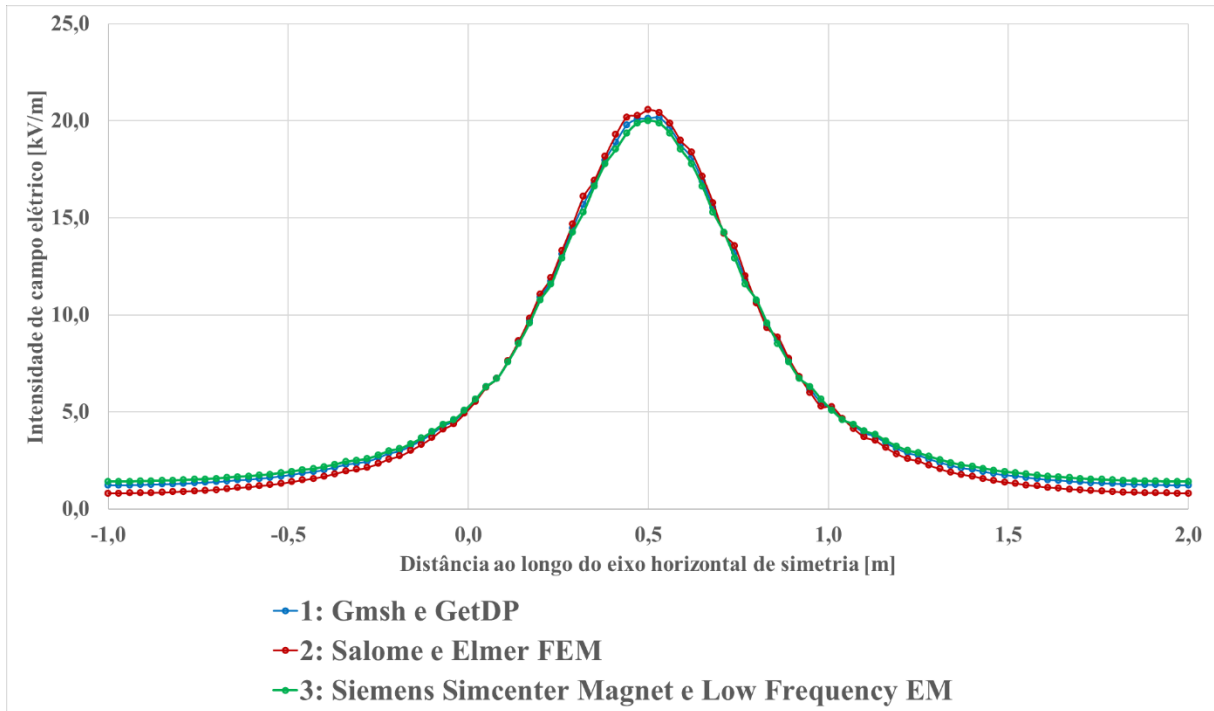


Figura 51 – Resultados da comparação

Por fim, a Tabela 13 contém os resultados da comparação. Vê-se que os ambientes computacionais não apresentam resultados numericamente iguais. No entanto, todos eles indicam convergência numérica entre si, tanto no ponto central quanto no eixo horizontal de simetria. O ambiente computacional 2, como aqui utilizado, destoa ligeiramente dos ambientes computacionais 1 e 3. Todos os resultados, apesar disso, são indicativos do fenômeno – como o é conhecido.

Tabela 13 – Resultados da comparação

Ambiente computacional	Intensidade de campo elétrico no ponto central [kV/m]	Intensidade de campo elétrico no ponto central relativo ao ambiente 1 []	Intensidade média de campo elétrico no eixo horizontal [kV/m]	Intensidade média de campo elétrico no eixo horizontal relativo ao ambiente 1 []
1	20,105	-	5,690	-
2	20,561	102,27%	5,514	96,91%
3	20,010	99,53%	5,740	100,88%

B Apêndice – Extensão dos resultados de análise de sensibilidade

Os resultados descritos na seção 5.4 referem-se a uma análise de sensibilidade em que a quantidade de saias da bucha sob estudo é uma variável discreta e situada na faixa de 1 a 14 saias. No corpo da seção, destaca-se os resultados dos casos com 6 e com 14 saias. Os demais resultados relativos à distribuição da intensidade de campo elétrico em todos os casos daquela seção são aqui compilados.

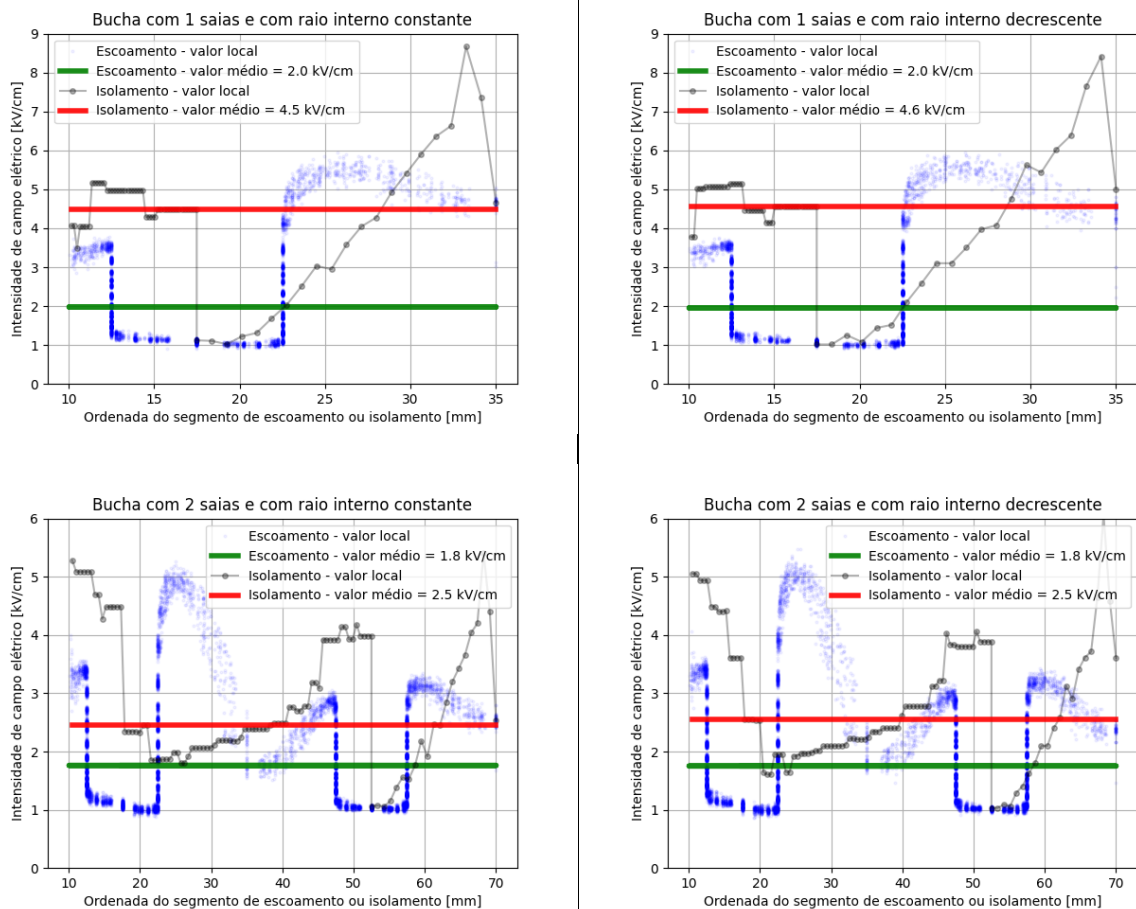


Figura 52 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 1 e 2 saias

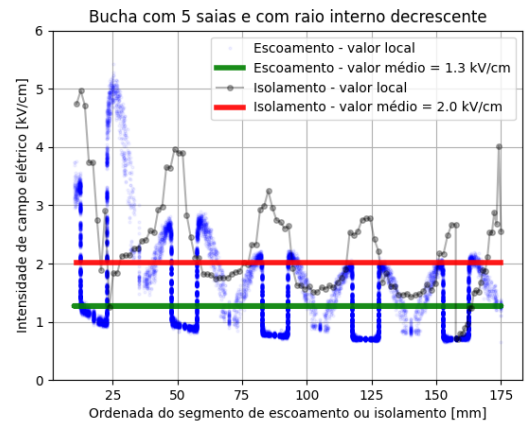
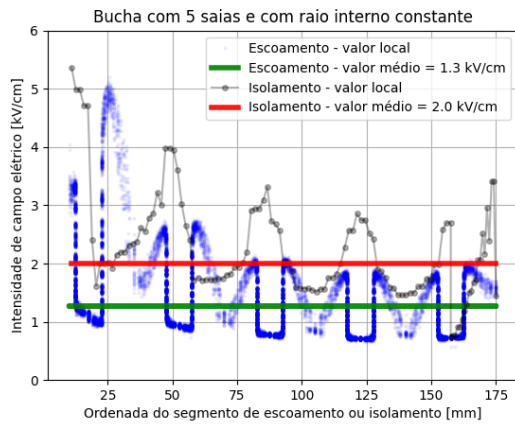
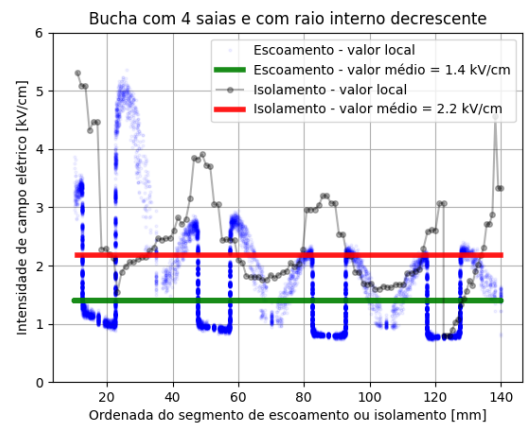
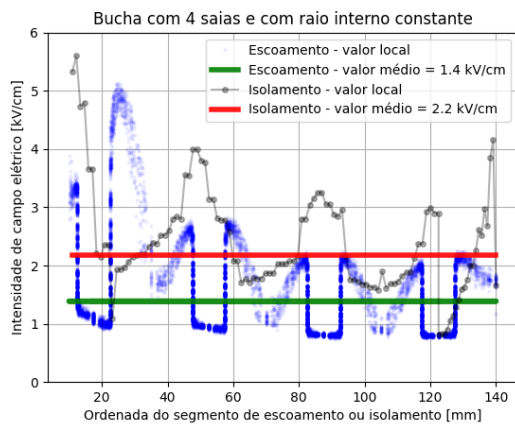
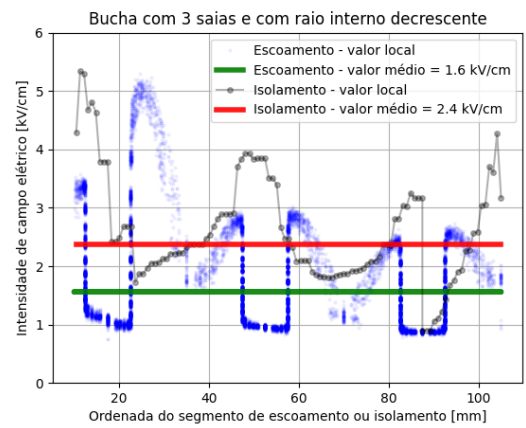
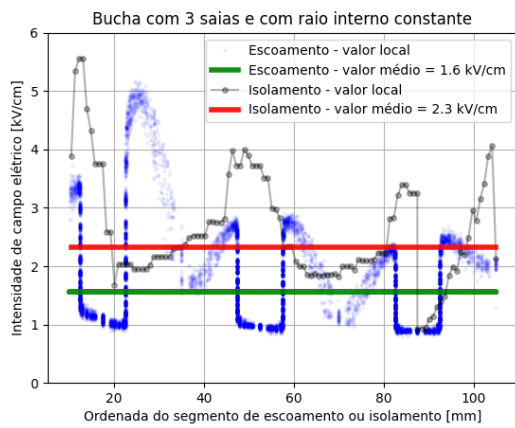


Figura 53 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 3, 4 e 5 saias

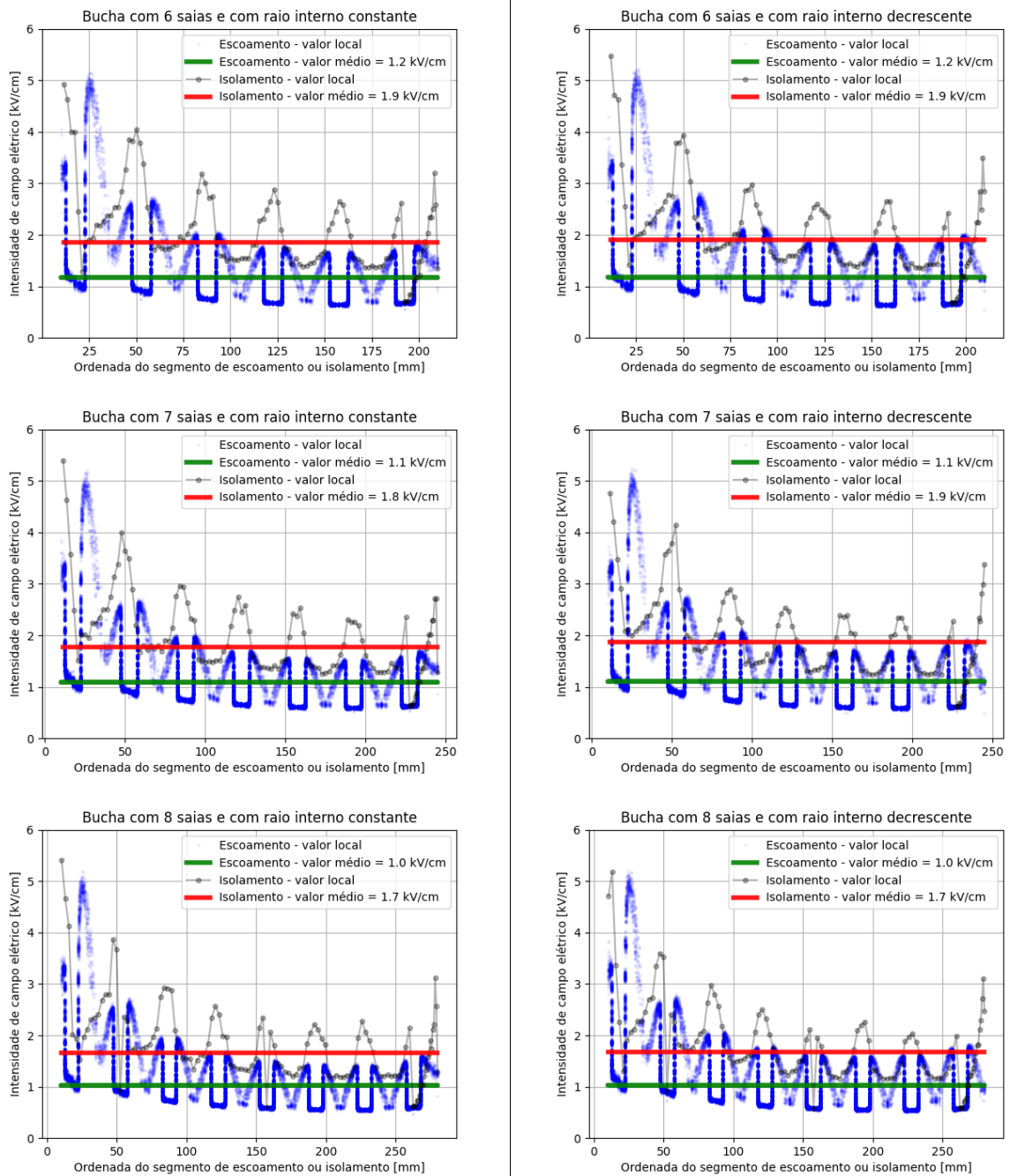


Figura 54 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 6, 7 e 8 saias

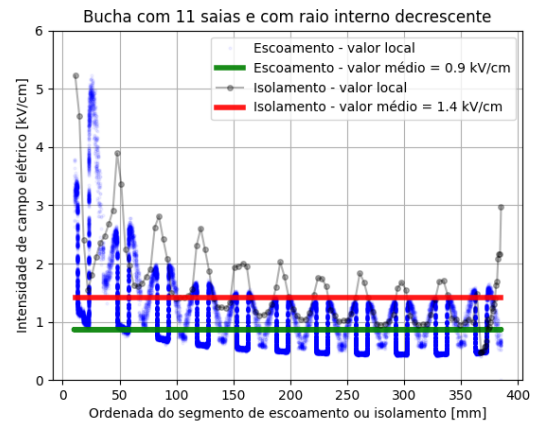
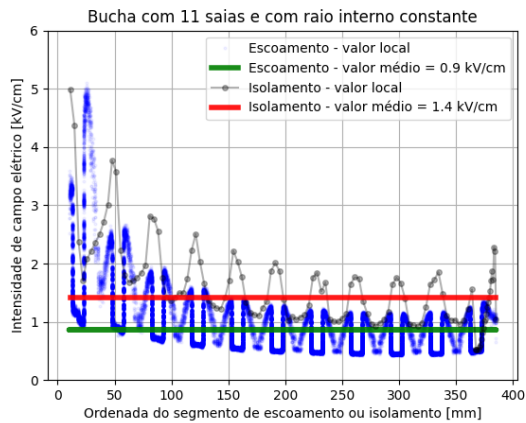
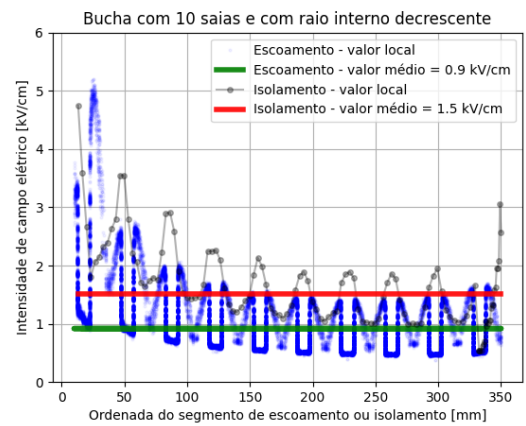
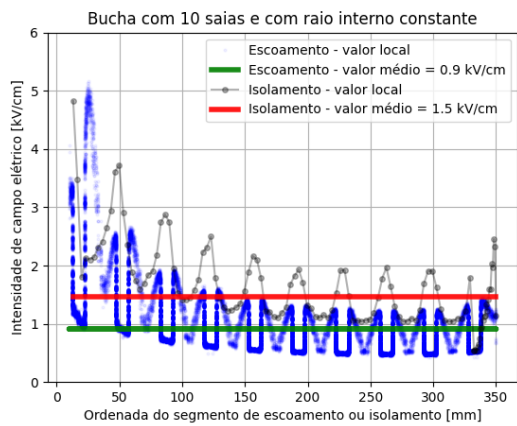
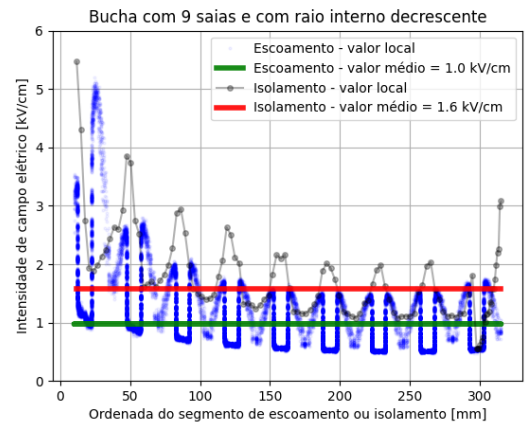
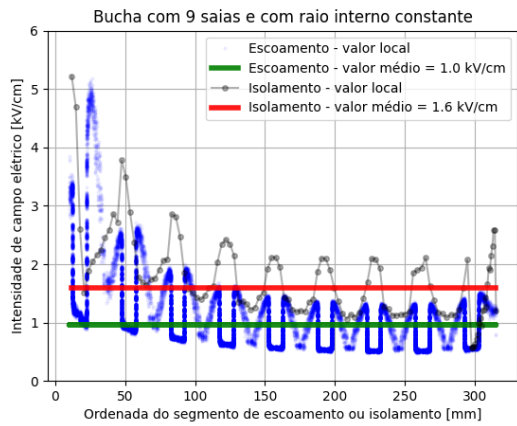


Figura 55 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 9, 10 e 11 saias

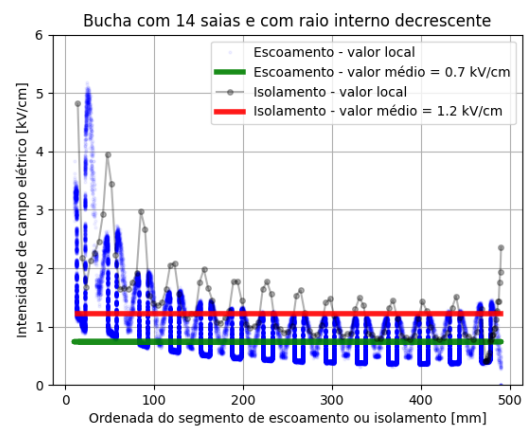
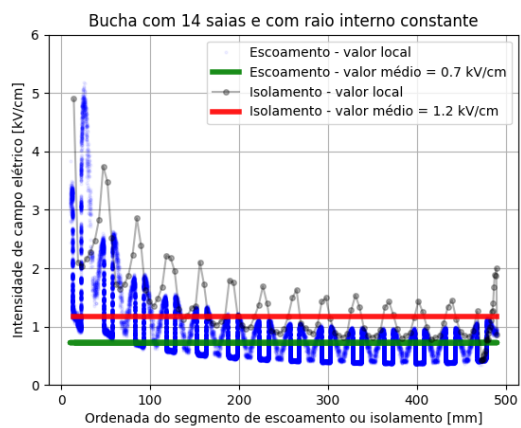
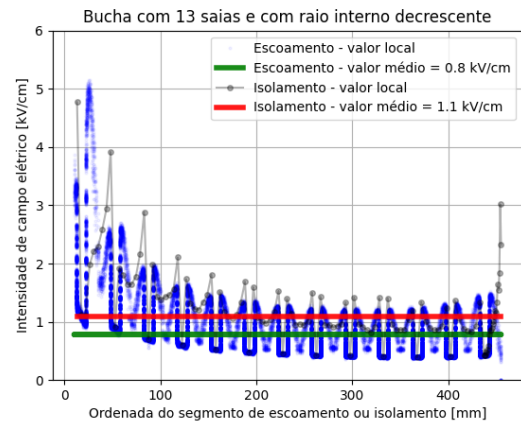
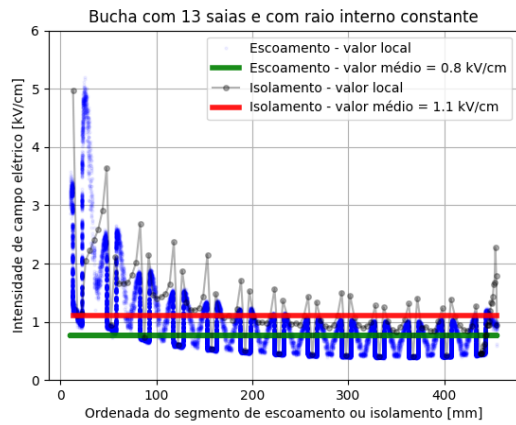
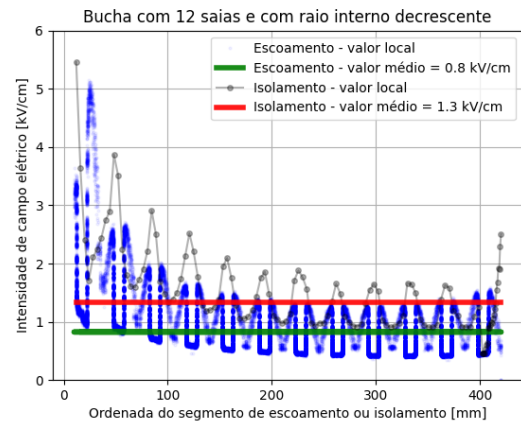
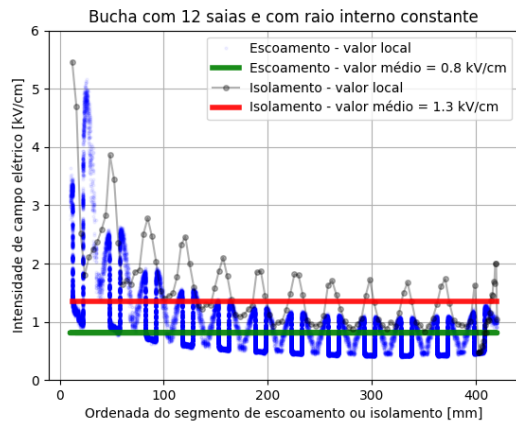


Figura 56 – Intensidade de campo elétrico – buchas com 12, 13 e 14 saias