CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DE BUCHAS DE TRANSFORMADORES UTILIZANDO MÉTODOS SEM MALHA

Paulo Roberto Costa da Silva

ORIENTADOR: EDUARDO HENRIQUE DA ROCHA COPPOLI

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET-MG

BELO HORIZONTE

JANEIRO DE 2021

Paulo Roberto Costa da Silva

AVALIAÇÃO DE BUCHAS DE TRANSFORMADORES UTILIZANDO MÉTODOS SEM MALHA

Paulo Roberto Costa da Silva

AVALIAÇÃO DE BUCHAS DE TRANSFORMADORES UTILIZANDO MÉTODOS SEM MALHA

Dissertação submetida à banca examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - ASSOCIAÇÃO AMPLA ENTRE UFSJ E CEFET-MG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Belo Horizonte, 25 de janeiro de 2021

Eduardo Henrique da Rocha Coppoli
Orientador

Prof. Márcio Matias Afonso
Banca examinadora

Prof. Rafael Paulo Braga Poubel
Banca examinadora

Prof. Alfred Gimpel Moreira Pinto
Banca examinadora

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Universidade Federal de São João Del Rei
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Belo Horizonte
Janeiro de 2021

S586a

Silva, Paulo Roberto Costa da
Avaliação de buchas de transformadores utilizando métodos sem malha / Paulo Roberto Costa da Silva. – 2021.
89 f.: il., gráfs.

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em associação ampla entre a UFSJ e o CEFET-MG.
Orientador: Eduardo Henrique da Rocha Coppoli.
Banca examinadora: Eduardo Henrique da Rocha Coppoli, Márcio Matias Afonso, Rafael Paulo Braga Poubel e Alfred Gimpel Moreira Pinto.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Isoladores elétricos e isolamento – Teses. 2. Métodos sem malha (análise numérica) – Teses. 3. Energia elétrica – Distribuição – Alta tensão – Teses. 4. Métodos dos elementos finitos – Teses. I. Coppoli, Eduardo Henrique da Rocha. II.Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Universidade Federal de São João del-Rei. IV. Título.

CDD 621.317

Dedico este trabalho à memória da minha mãe (Maria Helena) e a toda a minha família que sempre me apoiaram e acreditaram na minha trajetória.

Agradecimentos

Para realização desta dissertação, sou extremamente grato ao apoio direto ou indireto de inúmeras pessoas, sendo pelos auxílios técnicos, direcionamentos e incentivos.

Agradeço a Deus, por me permitir tudo que necessitei para alcançar o objetivo final desta dissertação, mesmo diante de momentos difíceis, nunca me faltou.

Ao meu orientador, Professor Doutor Eduardo Henrique da Rocha Coppoli, pela orientação, paciência e disponibilidade, onde esteve sempre à disposição mesmo nestes momentos difíceis em que vivemos, relacionado às condições de saúde (pandemia), e pelo constante apoio e participação na elaboração deste trabalho.

A todos os amigos e colegas que contribuíram ou auxiliaram na elaboração do presente estudo, pela paciência, atenção e motivação, que prestaram em diversos momentos desta trajetória. Desde já os meus sinceros agradecimentos.

À toda minha família pelo incentivo, motivação e fé.

Meu muito obrigado a todos!

Resumo

A aplicação de Métodos sem Malha (meshless methods) é extremamente promissora no campo da engenharia. A utilização deste método numérico para estudo e análise da integridade de buchas isolantes de alta tensão permite obter resultados mais precisos das condições elétricas e físicas, auxiliando no desenvolvimento de projetos, bem como na avaliação operacional. Neste contexto, este trabalho visa apresentar uma modelagem numérica e computacional baseada no Método de Galerkin Sem Elementos (EFGM) aplicada ao cômputo de campos elétricos sobre a parte isolante das buchas de alta tensão e seu entorno. Esta classe de método tem como principal característica a não necessidade de uma malha de elementos, diferindo assim, do Método de Elementos Finitos tradicional, o que o permite facilmente trabalhar com geometrias variadas, possibilitando o deslocamento dos nós de avaliação para regiões de interesse. Este método é normalmente utilizado para solução de equações diferenciais parciais, tendo aplicações crescentes para cálculos de campos eletromagnéticos, e para o desenvolvimento de equipamentos elétricos. Neste trabalho foi utilizada uma bucha hipotética, com desenvolvimento computacional da sua geometria com inclusões de falhas para análise do comportamento do campo elétrico sobre a parte isolante da bucha de alta tensão, seguindo as especificações normalizadas e em suas condições operacionais críticas, a fim de obter informações quanto a integridade da referida bucha de alta tensão. O método (EFGM) apresenta boa convergência, e em diversos casos tendo melhores respostas que os métodos consolidados como o Método de Elementos Finitos (FEM).

Palavras-chave: Métodos sem malha, Método de Galerkin sem Elementos, Buchas isolantes de alta tensão e métodos de elementos finitos.

Abstract

The application of meshless methods is extremely promising in the field of engineering. The use of this numerical method to study and analyze the integrity of high voltage insulating bushings allows to obtain more accurate results of the electrical and physical conditions, assisting in the development of projects, as well as in the operational evaluation. In this context, this work aims to present a numerical and computational modeling based on the Galerkin Method Without Elements (EFGM) applied to the computation of electric fields on the insulating part of the high voltage bushings and their surroundings. The main characteristic of this method class is that it does not require a mesh of elements, thus differing from the traditional Finite Element Method, which allows it to easily work with varied geometries, allowing the displacement of the evaluation nodes to regions of interest. This method is normally used to solve partial differential equations, with increasing applications for calculations of electromagnetic fields, and for the development of electrical equipment. In this work, a hypothetical bushing was used, with computational development of its geometry with inclusions of failures to analyze the behavior of the electric field on the insulating part of the high voltage bushing, following the normalized specifications and in its critical operational conditions, in order to obtain information regarding the integrity of said high voltage bushing. The method (EFGM) has good convergence, and in several cases has better responses than consolidated methods such as the Finite Element Method (FEM).

Keywords: Meshless methods, Galerkin Method without Elements, High voltage insulating bushings and finite element methods.

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	Alternative Transient Program
BEM	Boundary Element Method
CEP	Condutor Elétrico Perfeito
DEM	Diffuse Element Method – Método de Elemento Difuso
EDP	Equações Diferenciais Parciais
EFG	Element-Free Galerkin
EFGM	Element-Free Galerkin Method – Método de Galerkin sem Elemento
FDM	Finite Difference Method – Método das Diferenças Finitas
FDTD	Finite Difference Time-Domain – Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
FEM	Finite Element Method – Método dos Elementos Finitos
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection –Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não-Ionizantes
IEFGM	Interpolating Element Free Galerkin Method – Método dos Elementos Livres de Galerkin Interpolantes
IMLS	Interpolating Moving Least Squares – Mínimos Quadrados Móveis interpolantes
LPIM	Local Point Interpolation Method – Método de Interpolação de Pontos Locais
LRPIM	Local Radial Point Interpolation Method – Método de Interpolação de Pontos Locais Radiais
LT	Linha de Transmissão
MEC	Método dos Elementos de Contorno

MLPG	Meshless Local Petrov-Galerkin – Método Local de Petrov-Galerkin Sem Malha
MLS	Moving Least Squares – Mínimos Quadrados Móveis
MLSRKPM	Moving Least Squares Reproducing Kernel Particle Method
MOM	Método dos Momentos
OMS	Organização Mundial de Saúde
PIM	Point Interpolation Method – Método de Interpolação de Pontos
RMG	Raio Médio Geométrico
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SPH	Smooth Particle Hydrodynamics
TD	Time Domain - Domínio do tempo

Lista de Símbolos

B	Densidade de fluxo magnético [T]
C	Capacitância [F]
D	Densidade de fluxo elétrico [C/m^2]
E	Intensidade do campo elétrico [V/m]
E$_{cr}$	Campo elétrico crítico [kV/cm]
E$_{crM}$	Campo elétrico máximo admissível [kV/cm]
E$_{s}$	Campo elétrico superficial [kV/cm]
ε	Permissividade elétrica [F/m]
ε_0	Permissividade elétrica do espaço livre [F/m]
ε_r	Permissividade elétrica relativa do ar [F/m]
f	Frequência [Hz]
G	Condutância [S]
H	Intensidade de campo magnético [A/m]
H^1	Espaço de Funções Cuja Derivada Primeira Possui Quadrado Integrável.
$\hat{H}^1$	Espaço de Funções Aproximadas Cuja Derivada Primeira Possui Quadrado Integrável, sendo que $\hat{H}^1 \subset H^1$.
Φ	Força Eletromotriz [V]
∞	Infinito
I	Corrente elétrica [A]
J	Densidade de corrente [A/m^2]
K	Matriz de Rigidez
L	Indutância [H]

μ	Permeabilidade magnética [H/m]
μ_0	Permeabilidade magnética do espaço livre [H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa do ar [H/m]
N	Matriz de Massa
n_f	Número de fases
$\bar{p}$	Profundidade complexa [m]
P_c	Potência natural [MW]
R	Resistência [Ω]
ρ_L	Densidade linear de carga [C/m]
ρ_s	Resistividade elétrica do solo [$\Omega \cdot m$]
s	Velocidade de fase [m/s]
σ	Condutividade elétrica [S/m]
Γ	Fronteira do Domínio do Problema
Γ_u	Fronteira de Diriclet
Γ_t	Fronteira de Neumann
t	Tempo [s]
V	Tensão [V]
∇	Operador Gradiente
v	Relutividade do material [A·m/weber]
ω	Frequência angular [rad/s]
W	Função Peso ou Função Janela.
W_i	Função Peso Discreta.
Y	Admitância [S]
Z	Impedância [Ω]
Z_C	Impedância característica [Ω]

Ω	Domínio
$\forall$	Para todo
Φ	Função de forma

Sumário

1 | Introdução

1.1 Contexto

As buchas de alta tensão têm como função principal permitir e garantir a conexão de forma segura entre equipamentos elétricos e o sistema elétrico. São aplicadas em transformadores, reatores e subestações abrigadas, bem como, em terminais de disjuntores, religadores e, subestações abrigadas, subestações compactas e em quaisquer outros equipamentos elétricos que requeiram uma conexão com níveis de isolamento adequado. As buchas de alta tensão estão presentes em todo o sistema elétrico, desde a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

As buchas de alta tensão são projetadas para operarem sujeitas à intempéries, ou abrigadas, e são submetidas a solicitações elétricas e mecânicas em condições normais de serviço e em condições anormais e transitórias, que ocorrem no sistema elétrico, sem falhas de isolamentos.

Os equipamentos elétricos, principalmente os transformadores de potência, são requisitados para operação com alto índice de disponibilidade, em torno de 99%, de acordo com determinações da ANEEL, e um dos fatores que impedem tal condição operacional, são as falhas apresentadas nas buchas, conforme mencionadas neste texto.

As estatísticas de falhas atuais em equipamentos que possuem buchas são apresentadas conforme a figura abaixo,

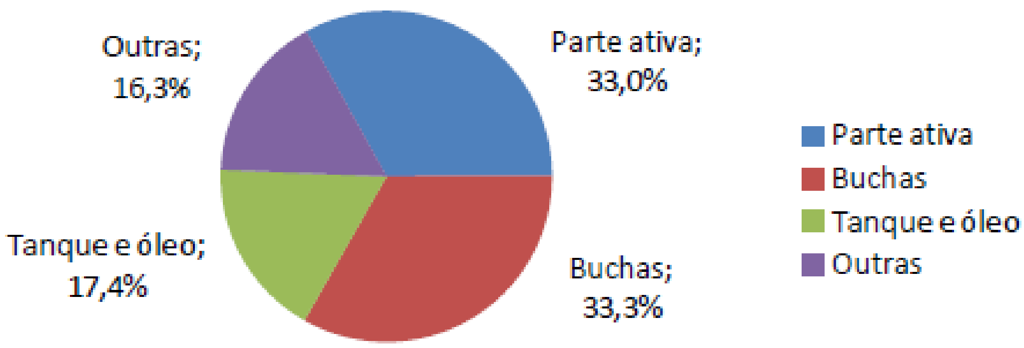


Figura 1.1- Estatísticas de falhas em equipamentos que possuem buchas de alta tensão.

Fonte: Fonte: (FRONTIN ET AL. ,2013).

Diante a diversos registros de ocorrências de falhas, elaborados pelas companhias de energia elétrica e usuários, em diversos partes do mundo, mostram que tanto em ambientes nacional e internacional, que as falhas originadas devido às buchas de alta tensão possuem consequências catastróficas, tais como explosões e incêndios.

Estas falhas resultam em danos expressivos por contaminação dos equipamentos e até mesmo danos generalizados que inviabilizam a recuperação dos equipamentos.

Além disso, em caso de explosão do corpo da bucha, há o lançamento de estilhaços cortantes em várias direções e em altíssimas velocidades, podendo provocar danos a pessoas e a equipamentos adjacentes.

A ocorrência de falhas em buchas geralmente está relacionada à perda de suas propriedades dielétricas, devido a deterioração de elementos de vedação ou mesmo pelo envelhecimento normal dos isolamentos.

As falhas em buchas de alta tensão são devido aos seguintes fatores:

- Erros de projeto em termos de dimensionamento físico e elétricos, bem como o controle dos campos elétricos em torno da bucha;
- Erros em processos produtivos, como falta de tecnologia atual e adequada à montagem, não permitindo a vedação adequada e ocorrências de impactos e choques durante o processo de montagem;
- Ineficiência em processos de ensaios e testes, realizados de forma incompleta, que não permitem comprovar os requisitos de suportabilidade operacional;
- Armazenagem inadequada de materiais, permitindo absorção de umidade e contaminações que causam redução das condições dielétricas;
- Uso de materiais de má qualidade, que não atendem as especificações quanto a solicitações elétricas e mecânicas;
- Condições inadequadas de transporte das buchas, permitindo ocorrências, tais como, vibrações e choques excessivos, que venham a causar perdas no sistema de isolamento elétrico e comprometem as condições de vedação;

- Uso inadequado dos equipamentos que possuem as buchas, tais como regimes de operação que não podem operar em carga máxima, e períodos longos de sobrecarga;
- Aplicação de equipamentos com buchas de idade avançada e além do tempo de operação previstos em manutenções preventivas e preditivas.

Para aplicações em equipamentos do sistema elétrico, existem dois tipos distintos de buchas de alta tensão, as buchas capacitivas e as buchas sólidas.

As buchas capacitivas são desenvolvidas para controlar o campo elétrico, e são aplicadas em níveis de tensões maiores que 69kV.

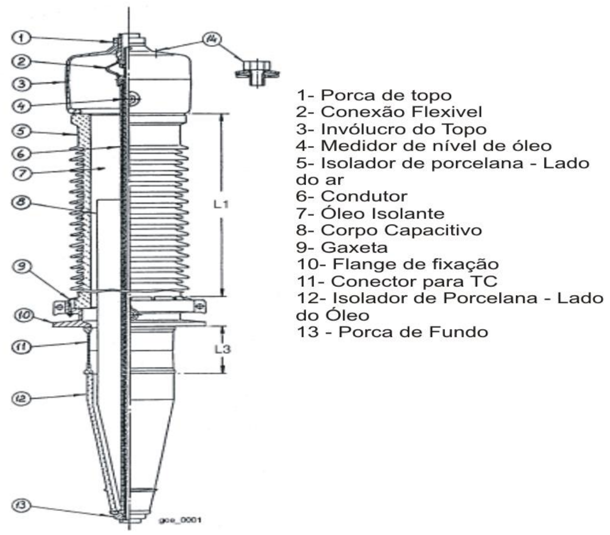


Figura 1.2 - Bucha capacitiva (CATÁLOGO: ABB, 2018)

A figura 1.2 acima, mostra a configuração da bucha capacitiva, principalmente o corpo capacitivo e a parte isolante.

As buchas solidas não possuem o controle do campo elétrico, e são aplicadas em níveis de tensão menor ou igual a 69kV.

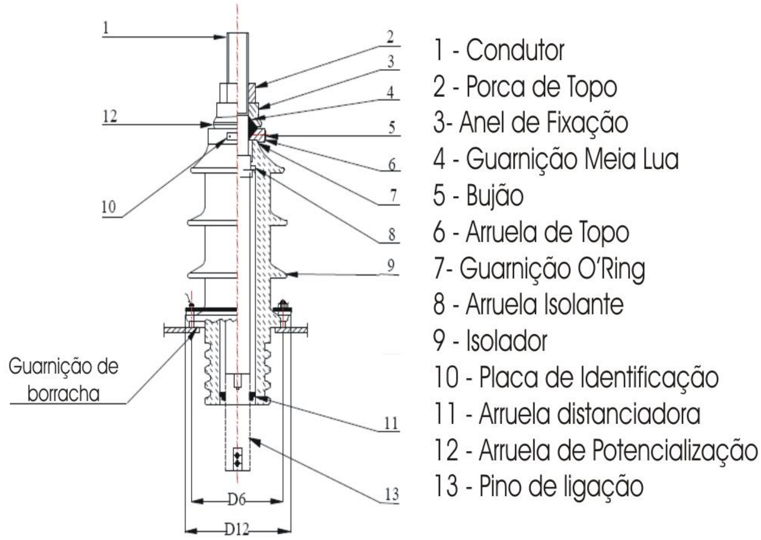


Figura 1.3 - Bucha não capacitiva (bucha sólida) (CATÁLOGO: ABB, 2018)

A figura 1.3 acima, mostra a configuração da bucha não capacitiva (bucha sólida), principalmente a parte isolante e a parte condutora.

As buchas capacitivas possuem um custo muito superior em relação as buchas sólidas, e são aplicadas a níveis de tensões superiores, e diante a este cenário, são as buchas que atualmente possuem diversas pesquisas quanto a sua durabilidade e suportabilidade quanto às condições operacionais impostas pelos sistemas elétricos e pelos próprios equipamentos que elas se integram, com relação à sobrecargas, curtos-circuitos e transitórios.

Há uma lacuna significativa quanto as pesquisas relacionadas às buchas sólidas, principalmente quanto a sua vida útil e condições de evolução de falhas, e quando apresentam falhas causam o mesmo efeito catastrófico mencionado.

Por este motivo a bucha sólida será o objeto de estudo desta dissertação.

Neste trabalho foi aplicado uma bucha hipotética, com as características de uma bucha sólida, com isolamento interno composto de ar, representando a condição considerada mais crítica e frágil.

Cabe ressaltar que as buchas sólidas não possuem controle do campo elétrico, e não permitem nenhuma avaliação contínua de sua integridade, diferentemente das buchas capacitivas, que permitem uma distribuição uniforme do campo elétrico, e por serem um modelo de um capacitor, possuem derivações (tap's) de medição para a avaliação do valor da capacitância interna da bucha, cujo valor está diretamente relacionado com o seu nível de isolamento, possibilitando o acompanhamento da evolução de uma falha em potencial.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste na modelagem computacional de uma bucha sólida de alta tensão aplicando o Método de Galerkin sem Elementos (EFGM), para obter os valores dos campos elétricos e de potencial na parte isolante da bucha. Para isto é apresentada uma nova abordagem numérica aplicada a buchas de alta tensão, fazendo uso de métodos sem malha, de forma inédita, analisando a estabilidade e precisão do método EFGM através de análises comparativas com métodos preexistentes, que neste caso foi utilizado o aplicativo FEM 4.2, que utiliza o Método de Elementos Finitos.

1.3 Justificativa

Como o método sem malha ainda é uma técnica relativamente nova se comparada a outras aplicadas a problemas de eletromagnetismo, existem ainda inúmeras aplicações a serem pesquisadas, desenvolvidas e testadas. A partir daí, deseja-se apresentar uma contribuição inédita através da modelagem de campos elétricos e potenciais em buchas sólidas de alta tensão, verificando as vantagens e limitações no uso do EFGM na avaliação de campos eletromagnético em buchas de alta tensão, visto que ainda há poucos trabalhos nesta linha de pesquisa.

1.4 Metodologia

Como metodologia, a fim de se alcançar o objetivo geral, realizou-se o seguinte:

- Desenvolvimento da geometria da bucha isolante hipotética;
- Elaboração da formulação variacional do problema para obtenção da forma fraca;
- Desenvolvimento a modelagem numérica e computacional para a avaliação dos campos elétricos e potenciais na bucha sólida de alta tensão;
- Aplicação do algoritmo sem malha EFGM em 2D;
- Validação do modelo através da aplicação do software FEMM 4.2;

- Determinação dos valores dos campos elétricos e potenciais em uma bucha sólida de alta tensão através do método sem malha EFGM, com e sem simulações de presenças de falhas;
- Comparação dos resultados entre EFGM e FEMM 4.2

1.5 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos incluindo este capítulo de introdução.

No capítulo 2, apresentam-se o estado da arte relacionados às buchas isolantes, métodos analíticos e métodos numéricos, em especial o Método dos Elementos Finitos e Métodos Sem Malha, aplicados na solução do problema.

No capítulo 3, são apresentados os conceitos do EFGM e suas características mais importantes. São introduzidos os métodos de aproximação dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS) e Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS), forma fraca e funções peso utilizadas. Ao final do capítulo é descrito a modelagem matemática do problema proposto, juntamente com o sistema linear final para fornecer a solução aproximada.

No capítulo 4, são apresentados os resultados das simulações do algoritmo desenvolvido, através do Método de Galerkin sem Elementos, para análise dos campos elétricos e potenciais em uma bucha isolante sólida hipotética, em condições de tensão nominal, tensão de impulso e tensão suportável, em comparação com o aplicativo FEM 4.2, para validação dos valores encontrados.

No capítulo 5, são destacadas as conclusões, bem como as contribuições desta pesquisa e apresentadas as propostas de continuidade e melhorias.

2 | Buchas Isolantes

Inicialmente são apresentados os princípios de funcionamentos e tipos de buchas isolantes, as quais possuem uma função de suma importância no isolamento dos equipamentos em relação ao sistema elétrico, porém são consideradas frágeis quanto às condições operacionais.

Cabe ressaltar que as aplicações mais importantes das buchas isolantes são nos transformadores de potência, que são os principais equipamentos das subestações e os valores associados com a sua manutenção e a sua indisponibilidade no sistema elétrico, constituem importantes contribuições aos custos operacionais de uma companhia de energia.

Em seguida apresenta-se trabalhos atuais relacionados aos métodos sem malha.

E ao final do capítulo ressalta-se a metodologia aplicada para desenvolvimento do algoritmo e considerações sobre os métodos sem malha.

2.1 Princípio de funcionamento e tipos de buchas

As normas ABNT NBR-5034 e IEC 60137, definem as buchas como peças ou estruturas de materiais isolantes, que asseguram a passagem isolada de um condutor através de uma interface não isolante. Assim, a bucha permite a passagem de forma segura de um ou mais condutores através de uma interface aterrada, podendo esta ser um tanque de um transformador, tanque de um reator, parede de um edifício, e em outros tipos de máquinas e construções.

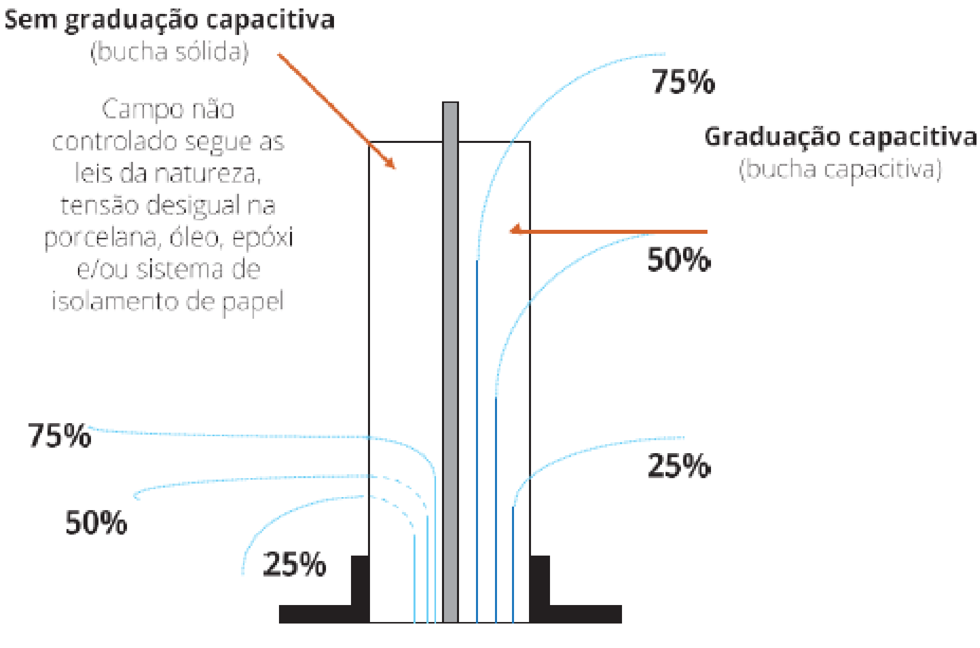
O isolamento de uma bucha de alta tensão deve ser capaz de suportar a tensão na qual é submetida e seu condutor central e deve ser capaz de conduzir a corrente em condição nominal e de sobrecarga sem elevações de temperatura inadmissíveis em relação as referências operacionais e mantendo o isolamento em ambas as condições.

As buchas são componentes projetados para operar abrigados ou ao tempo e resistir aos esforços elétricos e mecânicos, bem como servir de suporte para as conexões e condutores externos. Além disso, é indispensável garantir que a distribuição do campo elétrico criado pelo condutor não comprometa seu pleno funcionamento. Desta forma a bucha deve possuir alta rigidez dielétrica (FRONTIN et al., 2013; HEREDIA, 2008; H.HARLOW et al., 2004).

O principal ponto de fragilidade de uma bucha, onde há maior probabilidade de ocorrer possíveis falhas se encontra na região próxima ao referencial de terra, (corpo do equipamento ou interface na qual a bucha encontra-se instalada), conforme demostrado na figura 2.11, apresentada a seguir, neste capítulo, isto se deve à distribuição do campo elétrico na região. Sendo esta uma das maiores dificuldades encontradas nos projetos e na fabricação das buchas, pois neste local se encontra a menor distância entre o referencial de terra e o condutor energizado. Para níveis de tensão elevados, este problema é acentuado, assim a distribuição de campo elétrico é o que define o material isolante a ser utilizado e o tipo de fabricação da bucha (HEREDIA, 2008).

2.1.1 Tipos de buchas

A forma construtiva de uma bucha de alta tensão depende de vários aspectos, entre eles, a tensão nominal, material isolante, meio circundante, distribuição do campo elétrico, entre outros. Em relação a sua tecnologia de fabricação, podemos classificar as buchas em três amplos grupos, sendo estes: buchas não-capacitivas ou não-condensivas (Bulk bushing), buchas capacitivas ou condensivas (Condenser bushing) e buchas isoladas a gás SF6. As Figuras 2.1 e 2.2 ilustram a distribuição de campo elétrico nas buchas não-capacitivas e capacitivas (FRONTIN et al., 2013).



Fonte: (FRONTIN ET AL. ,2013).

Figura 2.1 – Grupos de buchas e campo elétrico

A figura 2.1, mostra as diferenças da distribuição dos campos elétricos em buchas capacitivas e não capacitivas.

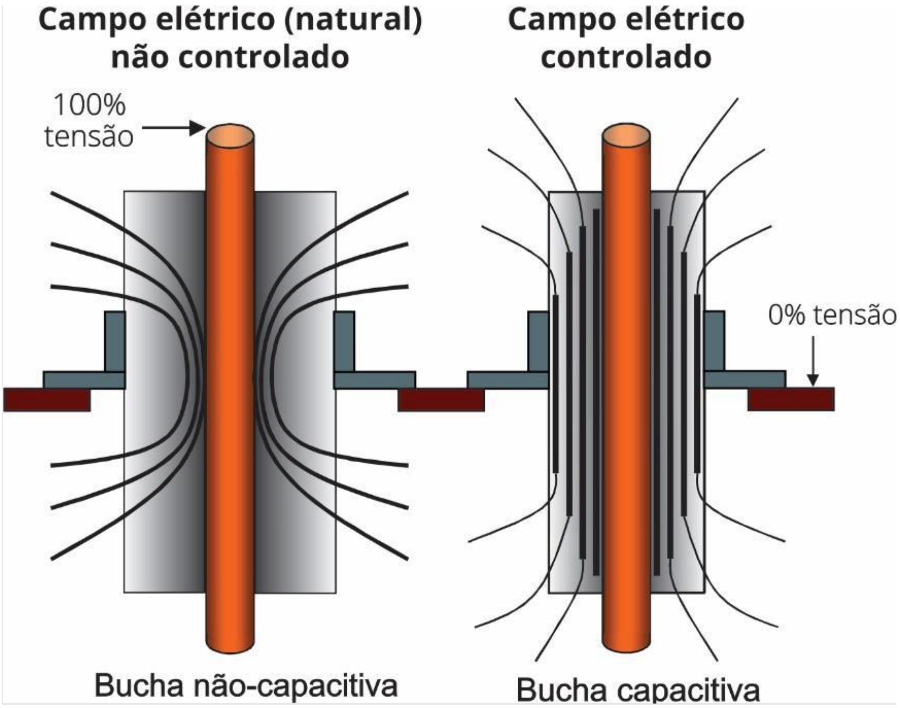


Figura 2.2 – Distribuição campo elétrico bucha não-capacitiva e bucha capacitiva

A figura 2.2 acima, mostra as diferenças de potenciais elétricos em buchas capacitivas e não capacitivas.

2.1.2 Buchas não-capacitivas

As buchas do tipo não capacitivo ou não condensivo são buchas com certa simplicidade construtiva, compostas por um condutor rodeado por um material isolante, tal como, porcelana, silicone, vidro, etc.

Este tipo de bucha é usualmente encontrado em instalações de nível de tensão nominal de até 69 kV e corrente máxima de 8000 A (FRONTIN ET AL.,2013).

Seu nível de tensão é limitado pelo fato de não se ter controle sobre as superfícies do campo elétrico criado pela tensão do condutor. Como consequência desta limitação, este tipo de bucha apresenta maior diâmetro se comparado as buchas capacitivas de mesmo nível de tensão, pois se tenta minimizar o risco de rompimento do dielétrico em locais de maior fragilidade. As Figuras 2.3 e 2.4, abaixo ilustram a estrutura e os componentes de uma bucha não-capacitiva (HEREIDA,2008).

Conforme ilustrado na Figura 2.4, a dimensão radial simbolizada pela letra “a” é uma dimensão estabelecida por meio da tensão elétrica existente no condutor, da geometria do condutor e das características do material isolante da bucha. A dimensão axial “b” é determinada em função do meio externo circundante onde a bucha se encontra (RYAN,2013).

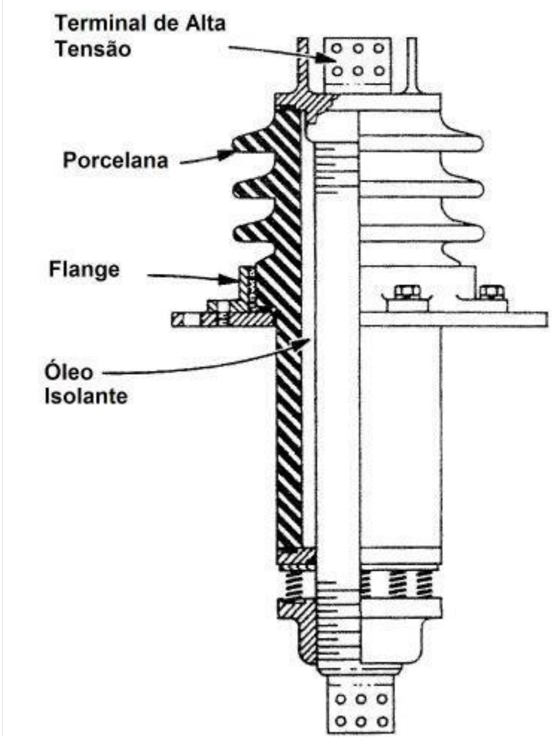


Figura 2.3 – Bucha não-capacitiva ou não-condensiva (HEREDIA, 2008).

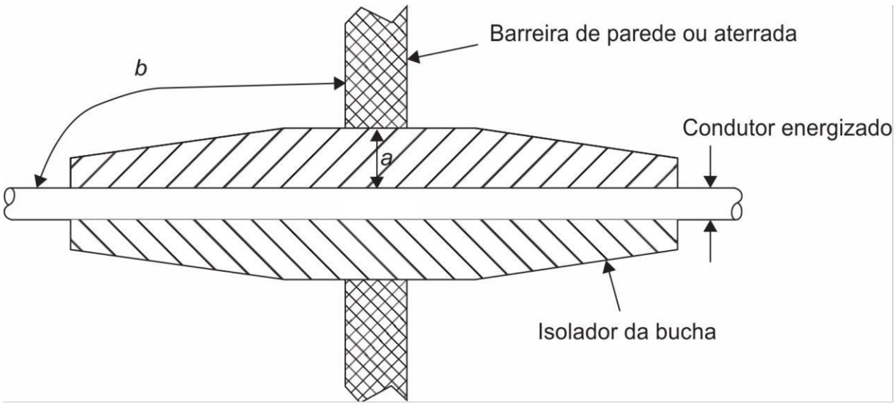


Figura 2.4 – Corte da bucha não-capacitivas (RYAN, 2013)

Devido a este fato, esse tipo de bucha possui nível de tensão limitado, pois com o aumento da tensão, consequentemente as concentrações de campo elétrico se elevam, assim como as chances de descargas parciais internas e na superfície externa. De tal modo se torna inviável a construção para níveis de tensão superiores a 69 kV. (FRONTIN et al., 2013)

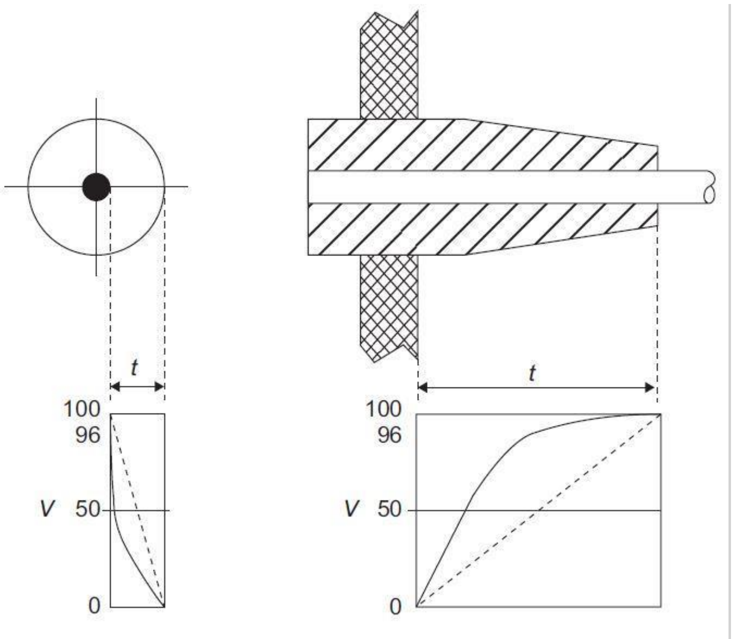


Figura 2.5 – Distribuição de tensão nas buchas não-capacitivas (RYAN, 2013)

A figura 2.5 acima, mostra as vistas, frontal e lateral, de uma bucha isolante, ressaltando o perfil de distribuição de potencial sobre a referida bucha.

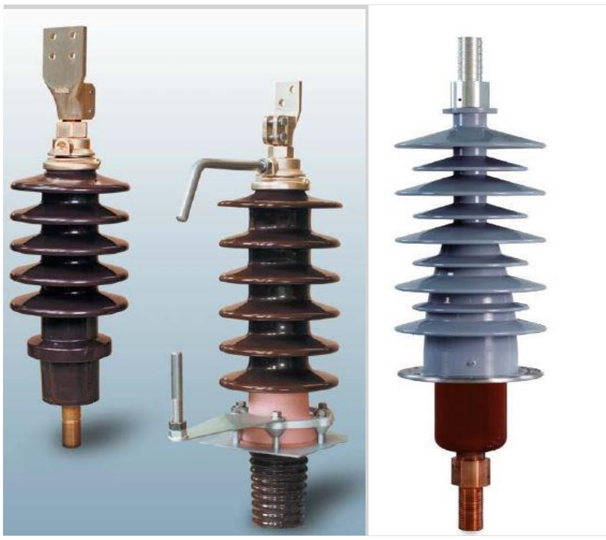
Nas Figuras 2.1, 2.2 , e 2.5, apresentadas acima, observa-se a não linearidade da distribuição do campo elétrico da bucha ao longo de sua superfície, de maneira radial ou axial. Devido a não linearidade, haverá concentração de campo elétrico na camada isolante podendo originar descargas parciais, danificando internamente a bucha, de modo a reduzir sua vida útil. Assim como elevados campos elétricos axiais, podendo ocasionar descargas na superfície externa da isolação, resultando em trilhamento (RYAN, 2013).

2.1.3 Buchas sólidas ou secas (Bulk Bushing)

A bucha solida (não capacitiva) consiste em um condutor central com isolação principal de porcelana ou composta de resina epóxi e silicone. Em alguns casos, em que a isolação é feita de porcelana, óleo isolante também é utilizado na isolação. O óleo isolante pode estar contido na bucha ou ser o mesmo do equipamento onde a bucha se encontra instalada (FRONTIN ET AL., 2013; H. HARLOW et al., 2004).

As buchas sólidas com isolação composta de resina epóxi e isolador de silicone são comumente conhecidas como buchas sólidas de isolação combinada e vem sendo cada vez mais utilizadas, devido a sua versatilidade. Estas buchas possuem uma camada de resina colocada diretamente sobre o condutor central, sobre a qual o isolador de silicone é moldado. Em contraste as buchas de porcelana, possuem facilidade na montagem, manuseio e transporte, propiciando a montagem em diversas posições. Este tipo promove melhor condição de isolação em relação às buchas de porcelana, pois não possuem óleo, evitando riscos de vazamentos e possíveis explosões. Em caso de falha, diminuem drasticamente os riscos de projeções de fragmentos, portanto evitando possíveis ferimentos e danos a terceiros. As buchas secas com isolador de porcelana e isolador polimérico são apresentadas nas Figuras 2.6 (a) e 2.6 (b) respectivamente (FRONTIN et al., 2013; ABB, 2017).

A bucha sólida é normalmente utilizada em baixa e média tensão, sendo instalada em equipamentos como transformadores de potência, e outros. Os condutores centrais neste tipo de bucha podem ser conectados diretamente aos enrolamentos ou terminais internos dos equipamentos. (AHMED, 2011).



(a) (b)

Figura 2.6 – (a) Bucha não-capacitiva com isolador de porcelana

(b) Bucha não-capacitiva de isolação composta

2.1.4 Buchas Capacitivas

A principal evolução tecnológica em relação as buchas capacitivas foi o desenvolvimento de um meio para o controle do campo elétrico criado pelo condutor central, sendo possível a sua utilização em aplicações com tensões elevadas. Devido a estas características construtivas, obteve-se uma diminuição nas dimensões radiais da bucha, o que reduz assim seu custo de produção (HEREIDA, 2008; H. HARLOW et al., 2004).

As buchas capacitivas utilizadas em tensões acima de 69 kV, devido a necessidade de se reduzir as dimensões radiais da bucha e consequentemente a abertura da parede aterrada onde será instalada (FRONTIN et al., 2013).

As buchas capacitivas possuem um processo construtivo mais complexo se comparados as buchas não-capacitivas. Sua construção utiliza material isolante e chapas de condutores ou semicondutores de espessura fina, dispostos em camadas alternadas em volta do condutor central. O fato de se enrolar folhas condutoras ou semicondutoras alternadas com uma camada de material isolante faz com que esse conjunto funcione como capacitores concêntricos. Nas Figuras 2.7, 2.8 e 2.9 pode-se visualizar a forma construtiva de uma bucha capacitiva (HEREIDA, 2008; RYAN, 2013).

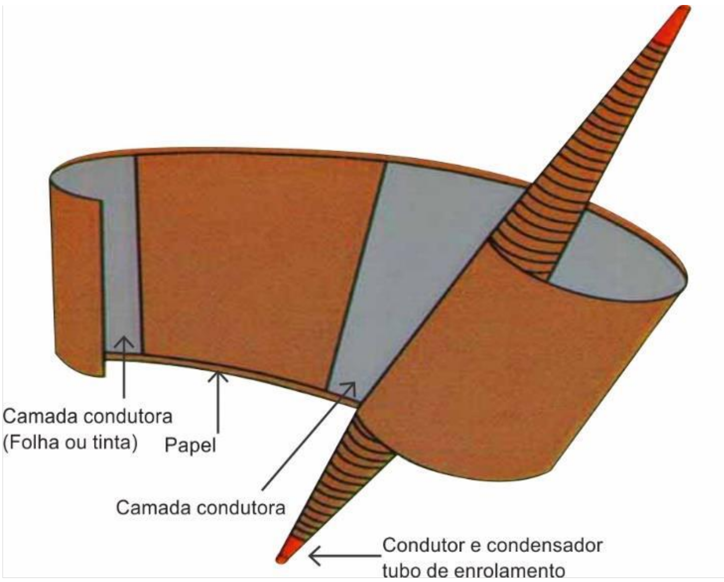


Figura 2.7 – Vista esquemática do núcleo condensivo - Adaptado de (ABB, 2009)

A figura 2.7 acima, mostra a forma construtiva das buchas capacitivas, quanto a composição das camadas condutoras, isolantes e formação do condensador.

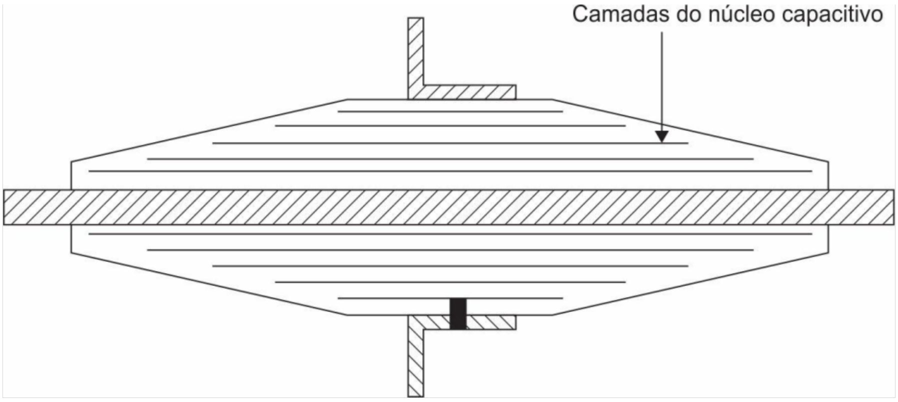


Figura 2.8 – Ilustração bucha capacitiva

A figura 2.8 acima, mostra a configuração das buchas capacitivas quanto as camadas do núcleo capacitivo.

O diâmetro e comprimentos das camadas são escolhidos de acordo com as capacitâncias parciais, dividindo assim a tensão que existe entre o condutor central e o potencial de terra, visto que a tensão é dividida proporcionalmente entre as camadas capacitivas. Deste modo o campo elétrico axial é mais bem distribuído e o campo radial controlado, respeitando o limite de tensão do material isolante (HEREIDA, 2008; RYAN, 2013).

Figura 2.9 – Forma construtiva de uma bucha capacitiva, vista superior (ALVES; MELO, 2007).

A figura 2.9 acima, mostra uma vista superior de uma bucha, destacando as suas camadas e formação dos capacitores.

Desta forma mostrado na figura 2.2, acima, nota-se que o campo elétrico da bucha capacitiva possui uma distribuição mais uniforme em relação à não-capacitiva. Este fato se deve a presença das folhas de condutores ou semicondutores. (ALVES; MELO, 2007; FRONTIN ET AL., 2013).

Na região em torno do flange, como pode ser visto na figura 2.3, o acúmulo de campo elétrico é mínimo, reduzindo assim a probabilidade de falha, visto que esta região se encontra aterrada.

As buchas capacitivas devem possuir pelo menos uma derivação de ensaio, chamada de ”tap” capacitivo, conforme mostrado na figura 2.9, sob o nome “tap de teste”, que consiste em uma conexão isolada entre uma das últimas camadas condutoras e o flange. Esta conexão, tem a finalidade de possibilitar medições e ensaios de grandezas elétricas da bucha, como capacitância, tangente delta e possibilitar o monitoramento de descargas parciais.

O “tap” capacitivo é acessível no lado externo da bucha, sendo localizado próximo ao flange. Este “tap” deve ser curto-circuitado e aterrado diretamente quando não está sendo utilizado. (BORGES FILHO et al., 2000).

2.1.5 Comparativo entre buchas não capacitivas e buchas capacitivas

Abaixo apresenta-se comparativos entre as buchas não capacitivas e buchas capacitivas, quanto a distribuição de potencial e campo elétrico.

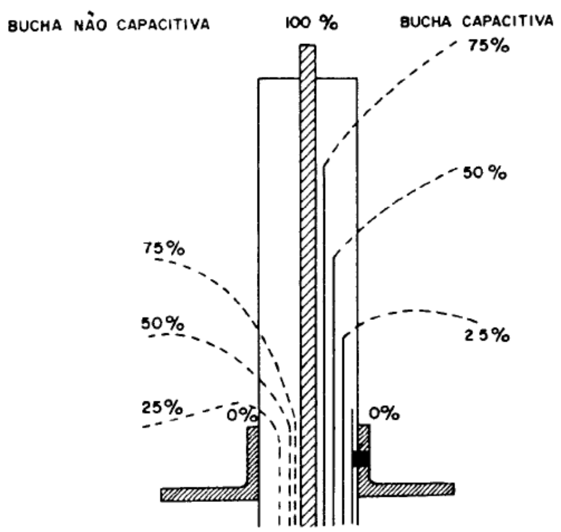


Figura 2.10 – Distribuição de potencial entre buchas capacitivas e não capacitivas

Na figura 2.10, observa-se que o potencial tem uma distribuição uniforme na bucha capacitiva, onde as linhas tracejadas mostram a distribuição de potencial.

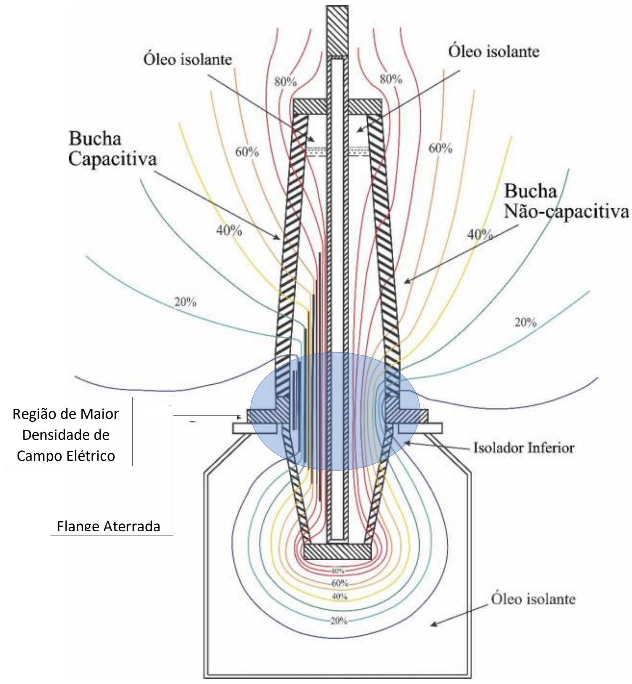


Figura 2.11 – Distribuição de campo elétrico entre buchas capacitivas e não capacitivas

Na figura 2.11, observa-se que o campo elétrico tem uma distribuição uniforme na bucha capacitiva e que há concentração de campo elétrico na parte inferior da bucha não capacitiva, que causa aquecimentos e consequentes perdas de vida útil e envelhecimento precoce.

2.2 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordadas o estado da arte das buchas isolantes de alta tensão, bem como as publicações dos principais trabalhos relacionados a campos elétrico e magnético de forma analítica e numérica e métodos sem malha aplicados à problemas eletromagnéticos.

Os métodos sem malha, tem o grande benefício de excluir uso de uma malha no processo de discretização, principalmente em problemas de geometrias complexas.

Trabalhos utilizando métodos sem malha para diferentes aplicações na área de eletromagnetismo evidenciam o grande potencial que as técnicas sem malha representam na área de pesquisa numérica e de simulação.

Neste trabalho aplicou-se o método sem malha para avaliação de campos elétricos e potenciais elétricos em buchas isolantes, através do método de Galerkin, cumprindo as etapas de (1) desenvolvimento da geometria, (2) pré-processamento, (3) processamento e (4) pós-processamento, com base na geometria e fluxograma abaixo.

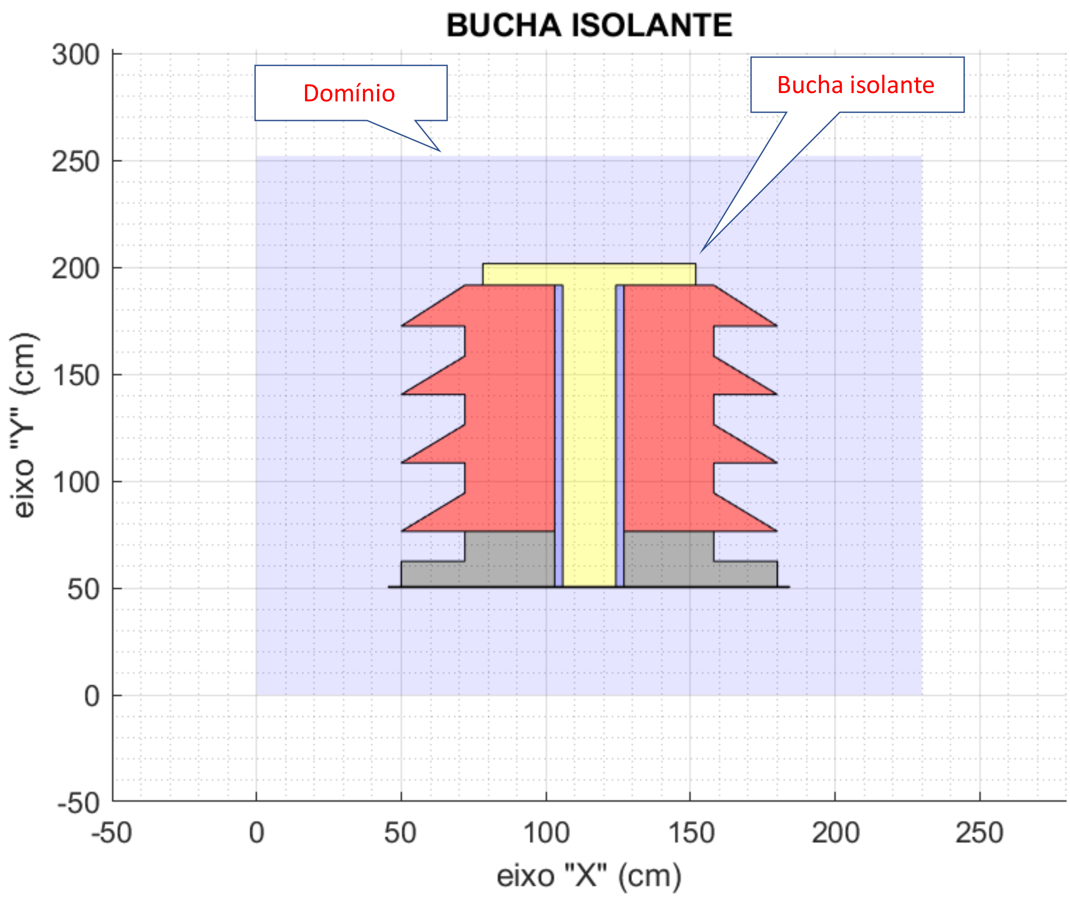


Figura 2.12 – Geometria desenvolvida para a avaliação da bucha isolante

O algoritmo desenvolvido aplica o método de Galerkin sem elementos (EFGM).

O fluxograma completo do algoritmo, a seguir foi aplicado para o estudo dos efeitos de integridade física em buchas de transformadores de potência utilizando métodos sem malha.

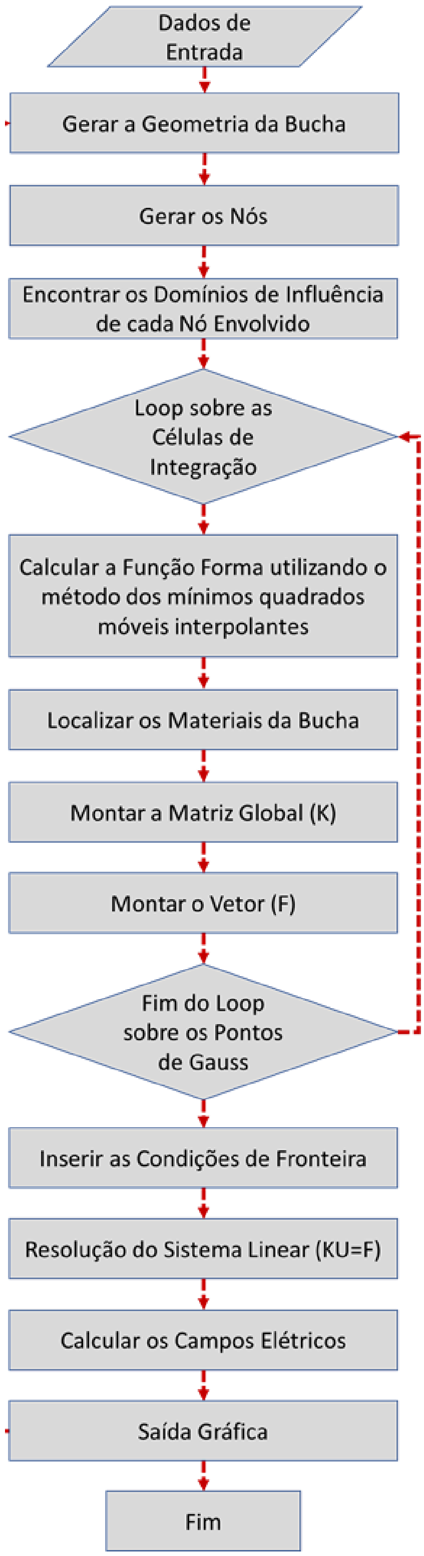


Figura 2.13 – Fluxograma para cálculo do Campo Elétrico utilizando o EFGM

3 | Estado da Arte do Métodos Sem Malha

Diante a importância dos campos elétricos e potenciais desenvolvidos sobre as buchas isolantes descritos nos tópicos anteriores, são apresentados a seguir trabalhos sobre os métodos sem malha, em especial aqueles aplicados a problemas eletromagnéticos de forma geral, uma vez que, temas relacionados especificamente com buchas isolantes e EFGM não são encontrados na literatura atual, o que se destaca o caráter inovador desta dissertação.

O uso de métodos sem malha é encontrado na bibliografia há mais de 80 anos, como por exemplo trabalhos de (SLATER, 1934), (FRASER, JONES e S.W, 1934) (LANCZOS, 1938) utilizando o Método de Colocação. Já outros trabalhos sem malha um pouco mais recentes comparados com os já citados são: o Método do Vórtice (Vortex Method) (CHORIN, 1973), (BERNARD, 1995), o Método das Diferenças Finitas (Finite Difference Method - FDM) utilizando grades arbitrárias ou o Método das Diferenças Finitas Geral (Geral Finite Difference Method - GFDM), (GIRAULT, 1974); (PAVLIN e PERRONE, 1975); (SNELL e VESEY, 1981); (LISZKA e ORKISZ, 1977); (LISZKA & ORKISZ, 1980); (KROK e ORKISZ, 1989). Um outro método sem malha bem conhecido é o Método de Hidrodinâmica de Partículas Suavizado (Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH), utilizado inicialmente para a modelagem de fenômenos astrofísicos como explosão de estrelas e nuvens de poeira sem fazer o uso de fronteiras (GINGOLD e MONAGHAN, 1977); (MONAGHAN e LATTANZIO, 1985); (MONAGHAN, 1992). De maneira geral, houve menos estudos dedicados aos métodos sem malha referente em sua formulação forte, visto que era menos robusto do que o método baseado em sua forma fraca. Outro indicativo para não haver muitos estudos a respeito da formulação forte foi a dedicação a pesquisas referentes ao MEF (Método de Elementos Finitos), o qual baseia-se em formas fracas (LIU e GU, 2005). A partir daí então aconteceu um passo natural para os estudos dos métodos sem malha utilizando formulação fraca.

A partir da década de 90 houve um aumento de trabalhos sobre métodos sem malha utilizando forma fraca, e muitos destes métodos propostos alcançaram um bom progresso, criando um novo grupo de métodos: o Método de Elemento Difuso (Diffuse Element Method – DEM) (NAYROLES, TOUZOT e P, 1992) , o Método de Galerkin sem Elementos (Element Free Galerkin Method- EFGM) (BELYTSCHKO, LU e GU, 1994), o Método de Partículas com Núcleo Reproduzido (Reproducing Kernel Particle Method - RKPM) (LIU, JUN e F, 1995), o Método de Interpolação Pontual (LIU e GU, 2001); (WANG e LIU, 2000), o Método Petrov-Galerkin Local Sem Malha (Meshless Local Petrov-Galerkin Method - MLPG) (ATLURI e ZHU, 1998), o Método do Nó de Fronteira (Boundary Node Method – BNM), (MUKHERJEE, 1997), o Método de Interpolação de

Pontos de Fronteira (Boundary Point Interpolation Method - BPIM) (GU e LIU, 2001), (GU e LIU, 2002), (GU e LIU, 2003) e o Método sem Malha Fraca-Forte (Meshfree Weak-Strong - MWS), (LIU e GU, 2002), entre outros.

(BELYTSCHKO, LU e GU, 1994) adotam o método de Galerkin sem Elementos, o qual é aplicável a formas arbitrárias, requerendo apenas a inclusão de dados nodais sem conectividade, aplicados ao tema de elasticidade e a condução de calor. Nesta implementação são utilizados os multiplicadores de Lagrange para impor as condições de contorno essenciais. Entretanto, o uso de tais multiplicadores aumenta o custo das soluções. Com isso, ainda em 1994 (LU, BELYSTCHKO e GU) desenvolveram uma nova implementação com base no princípio variacional modificado em que os multiplicadores de Lagrange são substituídos de modo que as equações discretas sejam acopladas.

Em 1998, (DOLBOW e BELYTSCHKO) desenvolvem detalhadamente o método EFG em uma dimensão (1D) aplicado à um problema linear de elasticidade, empregando os multiplicadores de Lagrange. Ao final, o problema é estendido a 2D.

(VIANA, 1998), propõe a técnica meshless para soluções de problema de contorno eletrostáticos e magnetostáticos baseado no EFGM. Inicialmente são discutidos alguns conceitos fundamentais do método proposto e de eletromagnetismo. Em seguida são apresentados os aspectos necessários para a implementação do método utilizando o MLS e o MLSRKM conjugados com o EFGM, finalizando com os resultados de problemas eletromagnéticos.

Em 2003 LIU publica o livro: "Mesh Free Methods – Moving Beyond the Finite Element Method" sobre métodos sem malha aplicados em problemas de engenharia, descrevendo detalhadamente os métodos e as suas funções, aprimorando e atualizando o livro no ano de 2005 acrescentando e explicando a programação por trás dos métodos sem malha (LIU, 2003), (LIU e GU, 2005).

O método EFG tem grande aplicabilidade em problemas em que há dificuldades em se construir uma malha eficiente em 3D. Em (PARREIRA, SILVA, et al., 2006) encontra-se a formulação em problemas eletrostáticos de 3D, baseando-se nos multiplicadores de Lagrange alcançando erros de 1,40%, enquanto empregando o MEF o erro é de 3,56%.

Na modelagem eletromagnética com o EFGM são encontrados alguns problemas relevantes como domínios periódicos, imposições de condições de contorno essenciais e acoplamento entre equações de campo e de circuito entre outros. Frequentemente, problemas referentes a descontinuidade de materiais levam a situações de oscilações espúrias nas curvas de campos elétrico e magnético. No sentido de resolver especificamente esses problemas, (COPPOLI, 2010) apresenta um trabalho identificando-os na modelagem de dispositivos móveis por meio do método sem malha EFGM. Para encontrar a solução são utilizadas funções peso especiais. Coppoli demonstra um método que permite o acoplamento entre o campo magnético e as equações de circuito no domínio do tempo através da simulação de uma máquina de indução trifásica.

(OLIVEIRA, 2011) investiga um método de otimização da capacidade de transmissão de LT, através do posicionamento dos feixes de condutores e a impedância característica da linha, aplicando o vetor de Poynting como função objetivo. Os campos

elétrico e magnético fundamentais para o vetor de Poynting são determinados pelo Método dos Elementos de Contorno (MEC).

(MARINHO, 2012) faz um tratamento auto adaptativo de interfaces materiais no método EFGM aplicado a problemas de eletromagnetismo com o propósito de melhorar a aproximação da solução e reduzir oscilações indesejadas.

(ROSA, 2015) demonstra uma técnica híbrida, que combina o método sem malha EFGM e o IMLS juntamente com o Método dos Momentos (MoM) para soluções de espalhamento eletromagnético em 2D. Este problema é descrito por um cilindro dielétrico infinito dividido em um cilindro interno e um cilindro externo, onde são aplicados respectivamente o IEFGM e MoM.

(OLIVEIRA, 2016) expõe um estudo sobre sistemas de aterramento em baixas frequências para solos homogêneos e estratificado em duas camadas aplicando o método sem malha EFG para resolver a equação diferencial parcial associado ao problema, partindo das equações de Maxwell. São propostas duas metodologias para incluir a haste de aterramento no domínio do problema. Na primeira são distribuídos nós na superfície da haste, já na segunda a haste é representada por um modelo filamentar. Os resultados são comparados e validados com o MoM.

Visto a necessidade de aprimorar novas técnicas sem malha para superar as dificuldades como o divergente nulo e a fim de eliminar soluções falsas presentes nos problemas vetoriais, (LIMA, 2016) apresenta a aplicação de formas fracas enfraquecidas no Método de Interpolação de Ponto (PIM), eliminando a incompatibilidade da função de forma e o uso das Funções de Base Radial (RFB).

4 | Métodos Sem Malha

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta as informações dos métodos sem malha, com a aplicação do método *Element-Free Galerkin Method* (EFGM), proposto para solução de problemas de contorno, bem como as formulações para determinação de campos elétricos sobre a bucha isolante sólida. É apresentada ainda a construção da função de forma de acordo com o *Moving Least Square* (MLS) e o *Interpolation Moving Least Square* IMLS, função janela e o critério da visibilidade.

4.2 Conceitos

Os métodos sem malha caracterizam-se, basicamente por uma distribuição de nós em todo o domínio (Ω), pela descrição das fronteiras (Γ) ao longo do domínio, sendo (X), o nó correspondente a posição em análise.

O fato de não necessitar uma malha explícita, requer apenas uma distribuição do nós sobre o domínio, nos contornos e nas fronteiras do problema.

E portanto, não há necessidade de uma conexão pré-estabelecida entre os nós e uma função, regida por um "problema de valor de contorno" (PVC).

Desta forma, o método é identificado pela distribuição de nós que obedece ao "problema de valor de contorno ao longo do domínio. (LIU, 2003)(RIBEIRO, 2017)

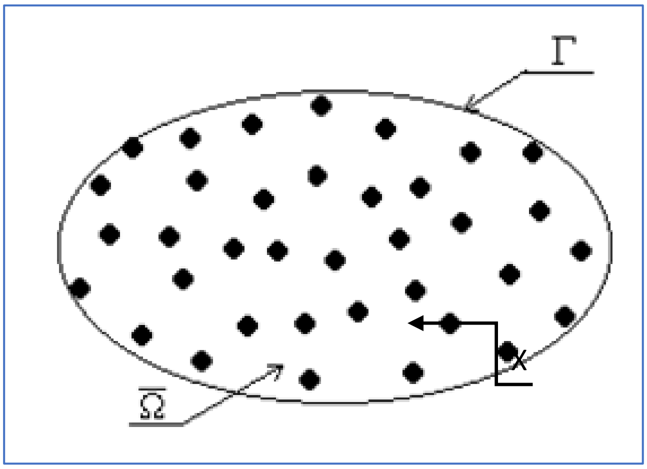


Figura 4.1- Discretização do Domínio empregada nos métodos Sem Malha.

A figura 4.1 apresenta um exemplo de uma discretização de um domínio sem malha, sendo a principal característica desta metodologia e representa uma distribuição de nós em duas dimensões (2D), relacionando as coordenas “x” e “y”, para o domínio $\overline{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$.

Associa-se um subdomínio fechado a cada nó, sendo este chamado de domínio de influência do nó. O domínio de influência é responsável pela certificação da função de aproximação ao redor do nó, e faz uso função de forma (Φ), descrita posteriormente na equação 4.12, representando a solução do problema por uma combinação linear (OLIVEIRA, 2016). Pode-se ainda dizer que o domínio de influência está associado à região em que o seu nó correspondente exerce influência.

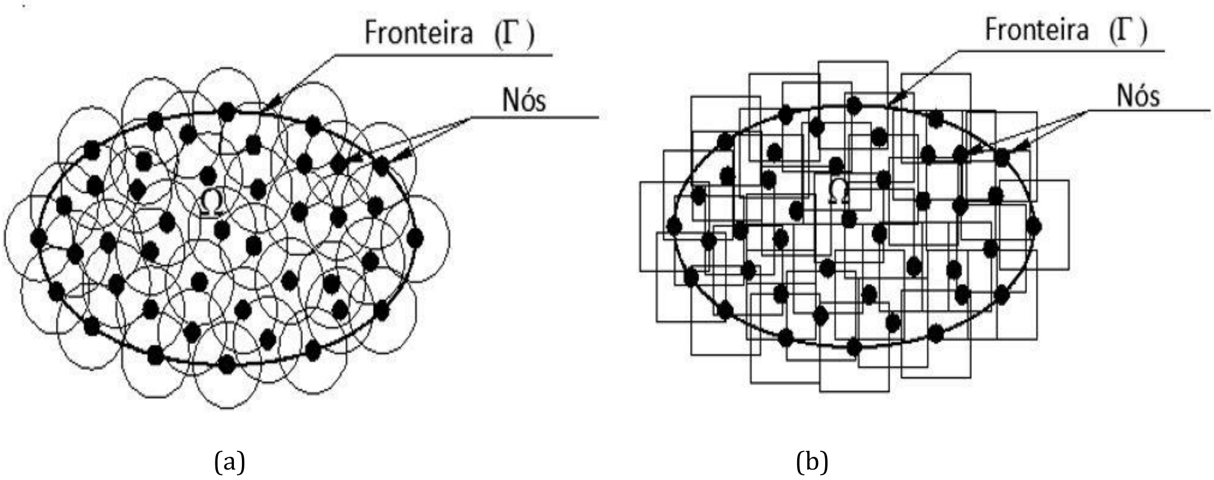


Figura 4.2- (a) Representação dos domínios de influência circulares de cada nó.
(b) Representação dos domínios de influência retangulares de cada nó.

A Figura 4.2, mostra que os domínios de influência são sobrepostos uns aos outros, podendo possuir formas circulares ou retangulares, sendo fundamental que os domínios de influência envolvam todo o domínio do problema e que não haja uma conexão pré-estabelecida entre os nós, como acontece no método de elementos finitos.

Conforme a Figura 4.3, abaixo, para um ponto de interesse "I", a dimensão do domínio de influência é:

$$d_I = \alpha_I d_c$$

(4.1)

onde, (α_I) é um valor adimensional que é utilizado no cálculo do tamanho do domínio de influência e, (d_c), é a distância nodal média próxima ao nó de interesse. (COPPOLI, 2010).

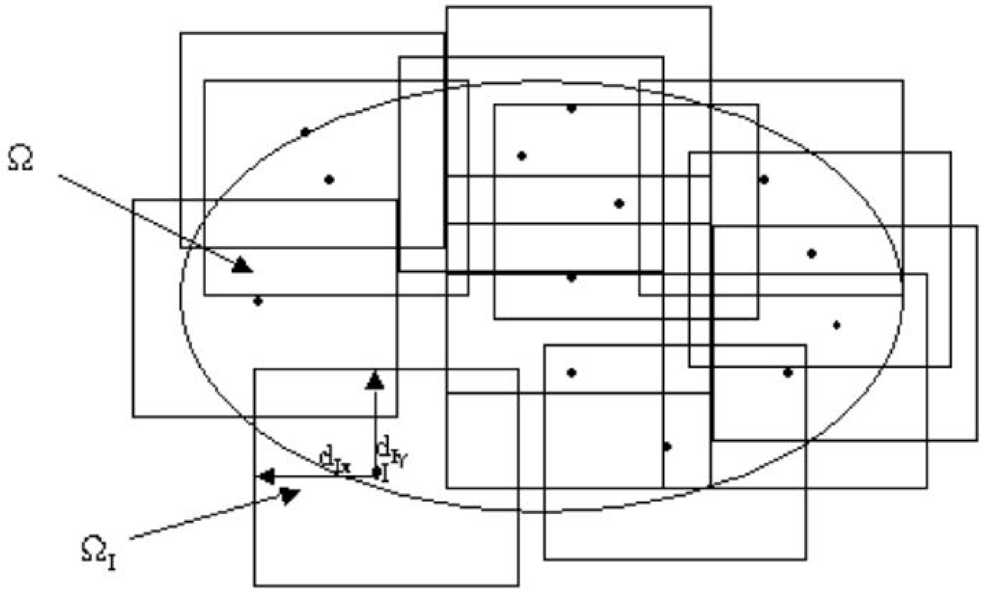


Figura 4.3- Domínios de influência retangulares. (COPPOLI, 2010)

Outro conceito importante é o domínio de suporte para um ponto $\hat{x}$ qualquer, dentro do domínio do problema, ele é definido como a região formada pela interseção de todos os domínios de influência que atuam naquele ponto. (COPPOLI, 2010).

Os métodos sem malha são métodos numéricos que não necessitam de malha e sim de uma nuvem de pontos distribuída no domínio, juntamente com as equações diferenciais que regem o problema e as equações de fronteira. Os problemas de contorno emergem do modelamento matemático dos problemas físicos contínuos construídos por equações diferenciais parciais (EDP). Esses métodos estão sendo utilizado frequentemente para resolver EDP, e cada vez mais e empregados na solução de cálculos eletromagnéticos e na modelagem de dispositivos elétricos (COPPOLI, ALIPIO, *et al.*, 2017).

Para os métodos sem malha a construção do modelo matemático, inicialmente determina-se uma geometria fictícia representando o modelo original. A geometria representa o domínio (Ω) do problema limitado por fronteiras (Γ). Posteriormente são determinadas as equações matemáticas capazes de retratar a geometria do problema válidas no domínio e nas fronteiras (VIANA, 1998).

4.3 Método de Galerkin sem Elementos (EFGM)

Element-Free Galerkin Method é considerado um método variacional, o qual pode fazer uso do *Moving Least Square* (MLS) ou do *Interpolation Moving Least Square* (IMLS), sendo os mesmos necessários para a construção da função de forma. A forma fraca de Galerkin é aplicada para desenvolver o sistema de equações e a células utilizadas para a realização da integração numérica (REZENDE, COPOLLI e AFONSO, 2015). Como pode ser visto nos subitens a seguir.

O método de Galerkin apresentado em 1994 por (BELYTSCHKO, LU e GU) é um método recente em comparação a outros métodos consolidados, como o método de Método de Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Momento (MoM), aplicados em problemas eletromagnéticos desde 1965.

4.3.1 Método dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS)

É o método é normalmente utilizado na construção de funções de forma para métodos sem malha.

O método EFG aplica o MLS para aproximar a função u(x), com uh(x)e foi

desenvolvido inicialmente por matemáticos para ajustes de superfícies e regressão de dados (LANCASTER e SALKAUSKAS, 1981).

Atualmente é o método mais utilizado para construção de funções de forma de métodos sem malha e possui como principais características uma função de aproximação contínua e suave em todo o domínio. (MESQUITA, 2010).

Para uma função u($\mathbf{x}$) definida em um domínio (Ω), a sua aproximação em um ponto “x” pode ser dada por $u^h(\boldsymbol{x})$.

onde, h representa o valor aproximado de u($\mathbf{x}$) em relação a um ponto “x”.

A aproximação por MLS se inicia com a equação abaixo (LIU e GU, 2005):

$$u^h(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{m} p_i(\boldsymbol{x_i}) a_i(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{p}^T(\boldsymbol{x_i})\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}) \tag{4.2}$$

onde, $\boldsymbol{p^T}(\boldsymbol{x}) = \lfloor 1\ x\ y \rfloor$ é uma base polinomial completa, neste caso em duas dimensões, “m” é a quantidade de funções bases, $\boldsymbol{x}^T = (x, y)$ é o vetor posição em duas dimensões, e $\boldsymbol{a^T}(\boldsymbol{x}) = \{a_1(\boldsymbol{x})a_2(\boldsymbol{x}) \dots a_m(x)\}$ são os vetores de coeficientes.

Como o vetor de coeficientes a(x) na equação (4.3) é uma função de **(x)**. Os coeficientes de **a** são minimizados fazendo uso da norma ponderada discreta em $\boldsymbol{L}_2$.

$$j = \sum_{i=1}^{n} W_i\, [u^h(x_i) - u_i]^2 \tag{4.3}$$

A equação (3.3) é um funcional residual ponderado, o qual é construído através de valores aproximados e dos parâmetros nodais da função desconhecida.

onde “n” é a quantidade de nós dentro do domínio, associado a função peso $W_i = W(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{x_i})(i - 1{,}2 \dots n)$ e u_i é definido como o parâmetro nodal de "u" em $x = x_i$.

Para a condição estacionária de J referente **a (x)**:

$$\frac{\partial J}{\partial_{aj}} = 0,\ \ j = 1, 2, \dots, m \tag{4.4}$$

remete a conexão ao conjunto de relações lineares.

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{U_s}\,, \tag{4.5}$$

$\boldsymbol{U_s} = (u_1\ u_2\ u_3 \dots u_n)^T$ é o vetor responsável por armazenar os parâmetros nodais da função de campo em todos os nós do domínio de suporte e $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x})$ é como a matriz de momento definida por:

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{W_i}\, \boldsymbol{p}(\boldsymbol{x_i})\boldsymbol{p^T}(\boldsymbol{x_i}) \tag{4.6}$$

A matriz **B** representada na equação (4.5) é definida como:

$$\boldsymbol{B}_i(x) = \boldsymbol{p}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}})\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{i}} \tag{4.7}$$

Onde:

$$\boldsymbol{p}(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{i}}) = \begin{bmatrix} p_1(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{1}}) & \dots & p_m(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{1}}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{n}}) & \dots & p_m(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{n}}) \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{i}}$ é uma matriz diagonal formada a partir das funções peso,

$$\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{i}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \boldsymbol{W}_{\boldsymbol{n}} \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

Resolvendo a equação (4.5) em a(x), obtém-se:

$$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{A}^{-1}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{s}} \tag{4.10}$$

Substituindo a equação (4.10) na equação (4.2), tem-se:

$$u^h(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{n} \Phi_i u_i = \boldsymbol{\Phi}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{U}_{\boldsymbol{s}} \tag{4.11}$$

Onde,$\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{x})$ é o vetor da função de forma do MLS correspondente aos “n” nós do domínio suporte do ponto “x” e pode ser reescrito como:

$$\boldsymbol{\Phi}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{x}) = \boldsymbol{p}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{A}^{\boldsymbol{-1}}(\boldsymbol{x})\boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}) \tag{4.12}$$

A função de forma é responsável por fazer a relação nodal, e é de grande importância para a precisão da solução do sistema, pois ela é a base para discretizar o espaço (PARREIRA, SILVA, et al., 2006).

Outro aspecto interessante da função de forma é permitir um suporte compacto, fazendo que a matriz do sistema seja uma matriz banda e esparsa (COPPOLI, 2010).

Para obter as derivadas da função u^h , deve-se encontrar as derivadas da função de forma, conforme a seguir.

$$\boldsymbol{\Phi}^{\boldsymbol{T}}(\boldsymbol{x})\gamma^{T}\boldsymbol{B} \tag{4.13}$$

Em que:

$$\gamma^{\boldsymbol{T}} = \boldsymbol{p}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{A}^{-\mathbf{1}} \tag{4.14}$$

Se a matriz $\mathbf{A}$ for simétrica, o $\gamma^{\boldsymbol{T}}$, pode ser encontrado de acordo com a equação (3.14)

As derivadas parciais de γ, podem ser obtidas resolvendo as equações abaixo.

$$\boldsymbol{A}_{\gamma,i} = \boldsymbol{p}_{,i} - \boldsymbol{A}_{,i\gamma} \tag{4.15}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{,\boldsymbol{i}}^{T}(\boldsymbol{x}) = \gamma_{,\boldsymbol{i}}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{B} + \gamma^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{B}_{,\boldsymbol{i}} \tag{4.16}$$

Onde “i” se refere às coordenadas “x” ou “y”, e a vírgula corresponde a derivada parcial em relação as derivadas espaciais (LIU e GU, 2005).

A aproximação pelo MLS depende dos parâmetros nodais para o nó “I”, cujo domínio de influência envolvem o nó x_i. Portanto para impor as condições de contorno no método EFG são necessárias técnicas especiais como os Multiplicadores de Lagrange ou o uso do IMLS, necessários para modificar a forma fraca (VIANA e MESQUITA, 1998) (DOLBOW e BELYTSCHKO, 1998) (COPPOLI, 2010).

4.3.2 Método dos Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS)

As funções de forma com o Método dos Mínimos Quadrados Móveis (MLS) não satisfazem o delta de Kronecker, conforme mostrado na equação 3.17, ou seja, $\mathbf{\Phi}_I(x_j) \neq \delta_{IJ}$, de modo que $U^h(x_I) \neq U_I$.

Isto é, os parâmetros nodais $U(x)$ não são iguais aos valores de $U^h(x_I)$.

O Método dos Mínimos Quadrados Móveis Interpolantes (IMLS) é uma adaptação do MLS, para garantir a propriedade do delta de Kronecker.

A formulação se encontra no domínio discreto o delta de Kronecker pode ser definido como (MACEDO, 1988):

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} \gamma_{ij} = 0, se\ i \neq j \\ \gamma_{ij} = 1, sei = j \end{cases}, \forall\ i, j\ \in \mathbb{N}i = 1,2,\ldots,m, j = 1,2 \ldots m \qquad (4.17)$$

Associando-se o delta de Kronecker a uma função de aproximação:

$$U^b(x) = \begin{cases} U^b(x_i) = U^b(x_j) & se \quad i = j \\ U^b(x_i) = 0 & se \quad i \neq j \end{cases} \qquad (4.18)$$

De acordo com as equações acima, (4.17) e (4.18), temos para as funções de forma:

$$\Phi(x_I, x) = \begin{cases} 1, & se \quad i = j \\ 0, & se \quad i \neq j \end{cases} \qquad (4.19)$$

As funções de forma desenvolvidas até o momento não atendem ainda o delta de Kronecker, conforme apresentado em (4.19), e geram imprecisões na imposição das condições de contorno essenciais. (COPPOLI, 2010)

Nessa situação necessita-se substituir a função peso utilizada no MLS pela função peso ou função janela representada pela equação abaixo, para atender as propriedades do delta de Kronecker (MARINHO, 2012) (LOURO, 2014)

$$W(x_1) = \frac{1}{r^{2n} + \varepsilon} \tag{4.20}$$

Essa função peso torna-se infinita no ponto x_i, e garante que os pontos quão próximos ao nó correspondente tenham algum valor e nos demais nós aproximam-se de zero (ROSA, 2015), onde $W(x)$ é a função peso ou janela, e "n" é um número inteiro positivo e deve ser um número real positivo (COPPOLI, 2010).

A função apresentada pela equação (4.20), possui uma característica interessante, a qual permite atuar na esparsidade da matriz.

A função de forma associada a função peso dispõem de suporte compacto, uma vez que os domínios de influência de cada nó são restritos, mesmo esta função apresentando comportamento assintótico (COPPOLI, 2010).

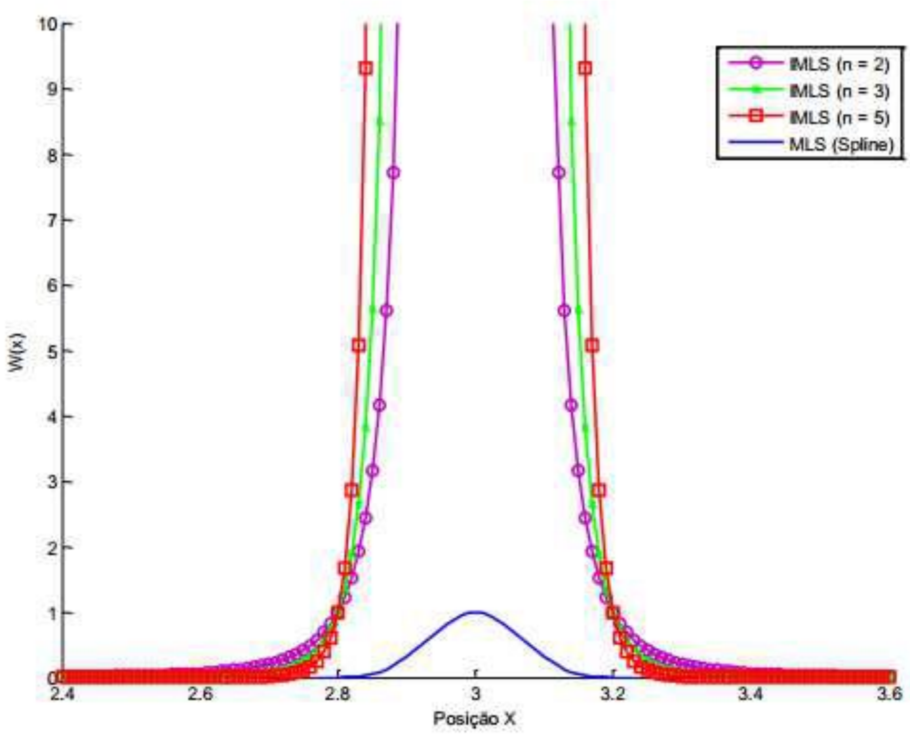


Figura 4.4 – Função Peso IMLS e MLS (ROSA, 2015).

A Figura 4.4, apresenta o comportamento da função MLS e IMLS.

A função peso ilustrada está centralizada no nó referente a posição x=3 e domínio de influência com r=0,3 e e=10^{-10}.

A curva representada pelo MLS emprega a função peso Spline Quadrática e contém um valor unitário sobre o nó 3, enquanto a função utilizando IMLS possui um valor tendendo ao infinito. Ambas as funções se dirigem para zero, na região externa ao domínio de influência referente ao nó de interesse. Destaque-se ainda que estas funções peso são de grande importância para elaboração da função de forma presente no método EFG, influenciando a convergência do método (ROSA, 2015).

4.3.3 Método de Galerkin

O Método de Galerkin, baseia-se em encontrar uma solução próxima em um espaço de dimensão finita $H_0^h(\overline{\Omega}), tal\ que\ H_0^h(\overline{\Omega}) \subset H_0^1(\overline{\Omega})$. Encontrar a forma fraca é uma tarefa relativamente difícil, uma vez que as classes de funções admissíveis pertencem a uma região de espaço infinito e linear. Sendo estas últimas, as duas propriedades fundamentais de H_0^1 (VIANA, 1998).

$H_0^h(\overline{\Omega})$ é o espaço que representa todas as combinações lineares como:

$$T^h = \sum_{I=1}^{n} \alpha_1 a_I \tag{4.21}$$

$$T^h = \sum_{J=1}^{n} \Phi_J u_J \tag{4.22}$$

Onde:

a_I – constantes pré-definidas,

$\alpha_I - varia\ I = 1,2, \dots n$ - são funções de forma pertencentes a classe de funções $H_0^h(\overline{\Omega})$

Φ_J – funções de forma pertencentes a classe de funções $H_0^h(\overline{\Omega})$,

u_J – Coeficientes a serem encontrados.

Portanto o método de Galerkin é expresso como a procura de $u^h \in H_0^h(\overline{\Omega})$, transitando-se do domínio contínuo para o domínio discreto.

No método de Galerkin α_I é considerado igual a Φ_J, resultando em um sistema linear, utilizando a bilinearidade de **B** e a linearidade de **F** conforme (VIANA, 1998), (ROSA, 2015)

$$\boldsymbol{K} * \boldsymbol{U} = \boldsymbol{F} \tag{4.23}$$

Sendo:

$$K_{IJ} = B\left(\Phi_I, \Phi_J\right) = \int_\Omega \left(\nabla\Phi_I \nabla\Phi_j\right) + \left(\nabla\Phi_I \nabla\Phi_j\right) d\Omega \tag{4.24}$$

$$F_I = \int_\Omega b\Phi_J d\Omega \tag{4.25}$$

$$\boldsymbol{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

Onde “b” pode ser identificado como uma excitação ou fonte.

O fato da matriz **K** do sistema linear obtida anteriormente ser simétrica é a principal vantagem do método de Galerkin.

4.3.4 Integração Numérica

Através da quadratura de Gauss Legendre é realizado a integração ao longo de todo o domínio do problema. Caso algum ponto de integração esteja fora do domínio, o ponto de integração deve ser desconsiderado. (BELYTSCHKO et al., 1994) (RIBEIRO, 2017).

Em 1994 Belytschko desenvolveu o EFGM, onde utilizou uma aproximação por Moving Least Square (MLS) ou Mínimos Quadrados Móveis para construir a função de forma, sendo o Método de Galerkin utilizado no desenvolvimento do sistema discreto de equações. Para calcular as integrais usadas na montagem do sistema matricial faz-se necessário um conjunto de células de integração distribuídas pelo domínio. (COPPOLI, 2010).

O processo de integração pode ser ajustado, variando parâmetros e influenciando no desempenho do algoritmo.

Quanto maior número de pontos de integração normalmente a solução obtida é mais precisa, porém tem-se um custo computacional maior.

A partir de 2 pontos a solução torna-se aceitável, porém acima de 2 pontos de integração obtém-se resultados mais precisos.

A Figura 4.5, a seguir ilustra o domínio de estudo, diante da utilização de células de integração com 4 pontos de integração para cada arranjo e com os nós espalhados pelo domínio.

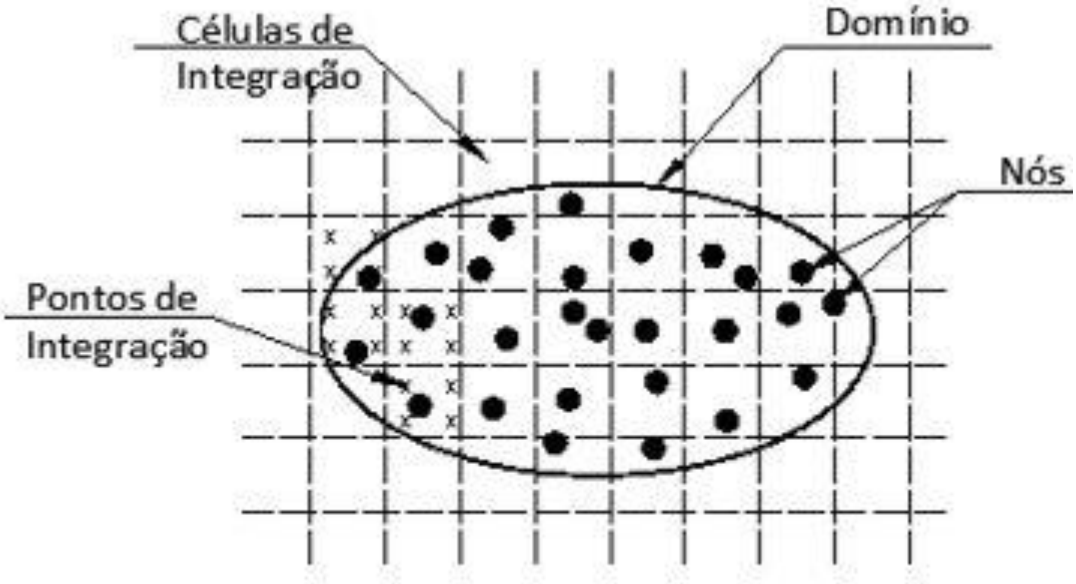


Figura 4.5 – Representação dos pontos de integração aplicados no processo de integração numérica (RIBEIRO, 2017)

4.3.5 Método da Visibilidade

Através da aplicação da técnica IMLS ao invés da técnica MLS é possível resolver o problema de oscilações espúrias provocadas pela descontinuidade de materiais (COPPOLI, 2010). Isto se deve ao fato que o IMLS introduz descontinuidades na função de forma e na função peso, conforme figura 4.4.

O objetivo desta abordagem, é o tratamento de descontinuidades no domínio quando ocorre mudança entre meios de materiais diferentes, pois esta descontinuidade pode apresentar erros na função de aproximação. Para isso, é necessário realizar correções através do critério da visibilidade proposto por (BELYTSCHKO, LU e GU, 1994).

Outras maneiras para resolver estes problemas são utilizando técnicas como: o método das Penalidades (LIU e GU, 2005), e a alteração da formulação variacional (CORDES e MORAN, 1996).

O método da visibilidade trunca os domínios de influência na fronteira entre os meios. Para exemplificar esta situação é apresentada a Figura abaixo.

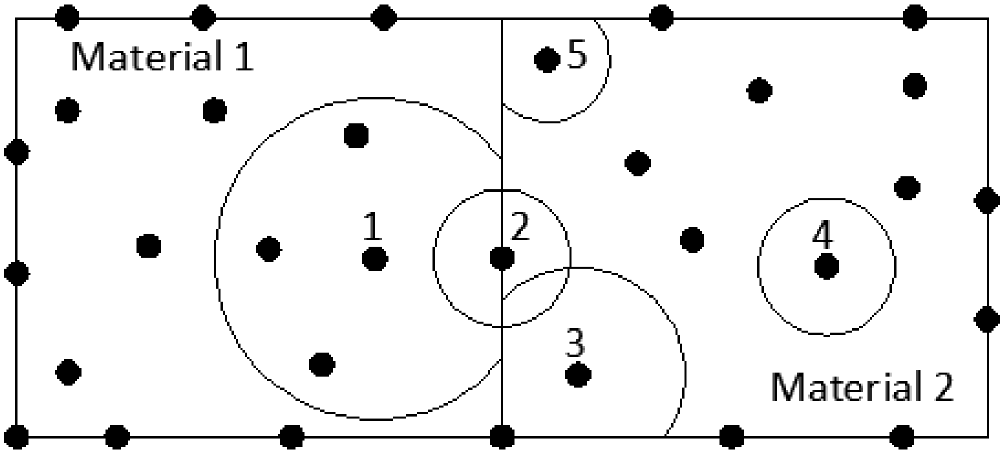


Figura 4.6 - Critério da Visibilidade

O nó 1 exerce influência do domínio representado pela circunferência referente ao material 1. O nó 2 sofre influência nos dois materiais, portanto deve ser contabilizado para os dois meios. Já os nós 3, 4 e 5 pertencentes ao material dois exercem influência apenas neste meio.

4.4 Modelagem Matemática do Problema

Nos subitens seguintes serão apresentadas as formulações eletromagnéticas e variacional do modelo matemático para uma bucha isolante sólida hipotética, empregando o EFGM.

Para isso, são utilizadas as equações de Maxwell e as relações constitutivas diretamente, obtendo as equações diferenciais parciais (EDP), que retratam as distribuições dos potenciais e campos elétricos sobre o corpo isolante da bucha isolante sólida, com e sem a existência de falha no material isolante (porcelana) da referida bucha isolante.

Foi realizado uma abordagem simplificada, na modelagem da bucha, uma vez que o problema é "quase-estático".

O problema é apresentado pela Figura abaixo,

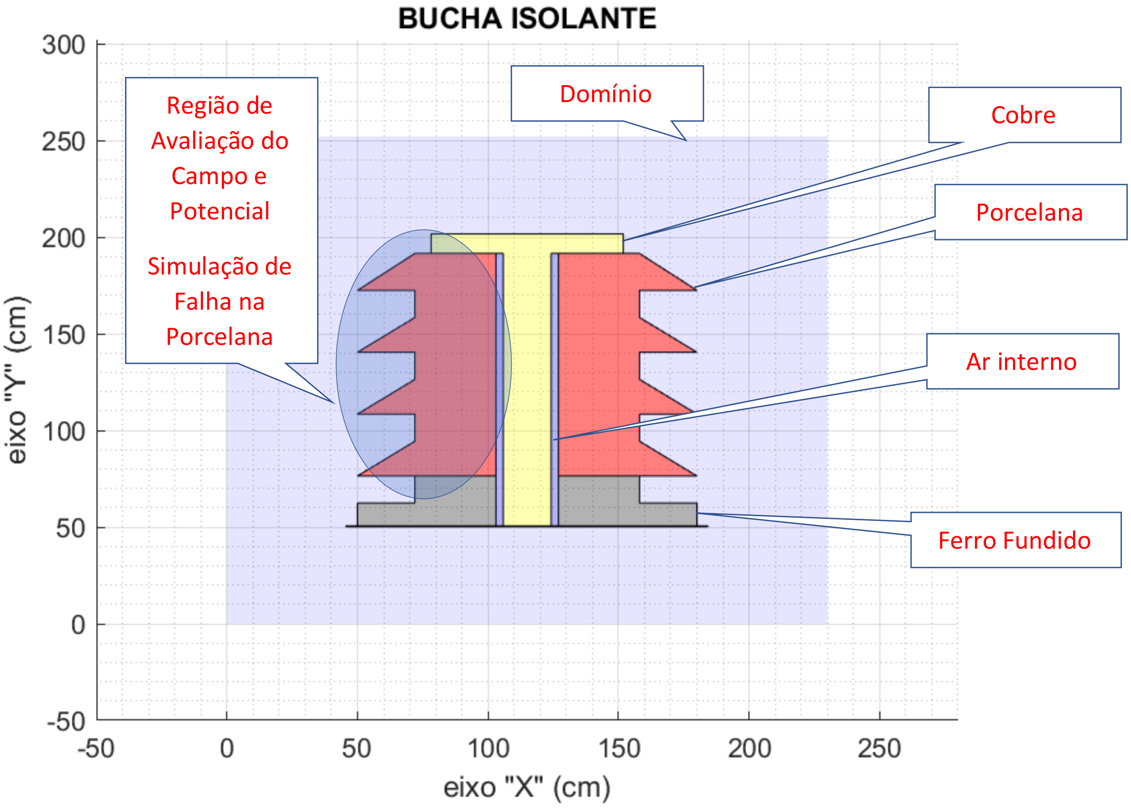


Figura 4.7 – Representação da Bucha Isolante Sólida

4.4.1 Formulação para Determinação do Campo Elétrico

Para a modelagem e obtenção do campo elétrico, far-se-á uso da equação de Laplace

Sendo:

$$\nabla \varepsilon \nabla U = 0 \tag{4.27}$$

Obtemos a equação de Laplace resultante (MACEDO, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y}\right) = 0 \tag{4.28}$$

Onde:

ε – permissividade do meio

U – potencial elétrico

Considerando as respectivas condições de contorno de Dirichlet e Neumann, temos:

$$U = U_u \; em \; \Gamma_u \tag{4.29}$$

$$-\varepsilon \frac{\partial U}{\partial n} = \tilde{t} \; em \; \Gamma_t \tag{4.30}$$

onde: "n" é a orientação normal à fronteira de Neumann

As condições de fronteira essenciais (CFE) para o campo elétrico possuem valor igual a zero no limite do problema e valor igual ao potencial elétrico nas superfícies da região condutora, referente a parte de cobre da bucha isolante sólida, como representado abaixo.

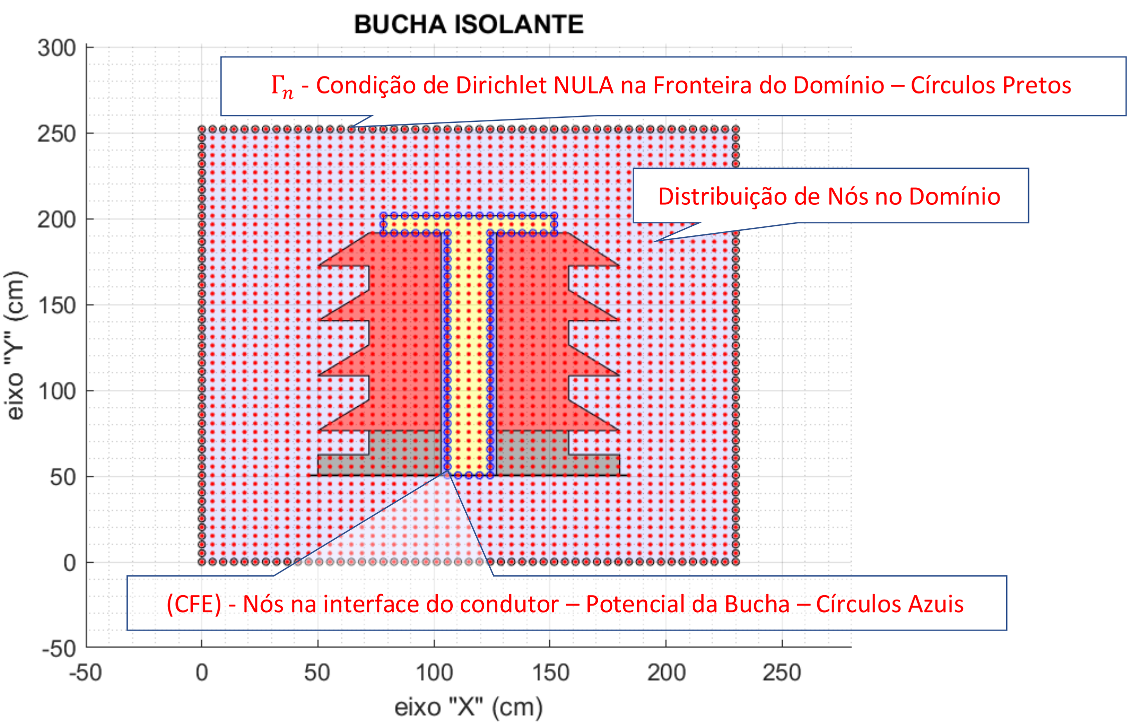


Figura 4.8 - Condição de Dirichlet nula na fronteira do domínio e Condição de Dirichlet na superfície do condutor com valor do potencial da bucha

As equações (4.28), (4.29) e (4.30), representam a forma forte do problema.

Uma vez que esta formulação apresenta uma difícil solução, é necessário o desenvolvimento da forma fraca através do método de Galerkin.

Obtendo a solução variacional do problema pelo método de Galerkin:

$$\int_{\Omega}(\boldsymbol{\nabla}.\varepsilon\boldsymbol{\nabla}U)\omega\partial\Omega = 0\ \forall\omega \in H^1 \tag{4.31}$$

onde: "ω" é a função peso

Manipulando a equação e fazendo uso das identidades vetoriais (COPPOLI, 2010):

$$\boldsymbol{\nabla}.(g\boldsymbol{v}) = (\boldsymbol{\nabla}g)\boldsymbol{v} + g\boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{v} \tag{4.32}$$

$$g\boldsymbol{\nabla}.\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\nabla}.(g\boldsymbol{v}) - (\boldsymbol{\nabla}g)\boldsymbol{v} \tag{4.33}$$

Substituindo $g = \omega\ e\ \boldsymbol{v} = \upsilon\nabla$, na equação (4.32), temos:

$$\boldsymbol{\nabla}.(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}U)\omega = \boldsymbol{\nabla}.(\omega\varepsilon\boldsymbol{\nabla}U) - \nabla\omega(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}U) \tag{4.34}$$

Em seguida o resultado de (4.32). é modificado de acordo com (4.34).

$$-\int_{\Omega}\boldsymbol{\nabla}.(\omega\varepsilon\boldsymbol{\nabla}U)\partial\Omega + \int_{\Omega}(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\omega\boldsymbol{\nabla}U)\partial\Omega = 0\ \ \forall\omega \in H^1 \tag{4.35}$$

Empregando o teorema da divergência na primeira parcela da equação (4.35), de modo que $\frac{\partial U}{\partial n} = \nabla U.\boldsymbol{n}$, onde "**n**" é um vetor unitário normal, indicando para fora da fronteira, resultando em:

$$-\int_{\Gamma}\omega\varepsilon\frac{\partial U}{\partial n}\partial\Gamma + \int_{\Omega}(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\omega\boldsymbol{\nabla}U)\partial\Omega = 0 \quad \forall\omega \in\ H^1 \tag{4.36}$$

Em que $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_t, \omega = 0\ em\ \Gamma_u$ e como $-\varepsilon\frac{\partial U}{\partial n} = \tilde{t}\ em\ \Gamma_t$, deseja-se determinar $U \in H^1$, de forma que:

$$\int_{\Gamma_t}(\omega\check{t})\,\partial\Gamma + \int_\Omega(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\omega\boldsymbol{\nabla}U)\,\partial\Omega = 0 \quad \forall U\ \in H^1\ e\ \forall\omega \in H^1 \tag{4.37}$$

Com base na solução aproximada, determinando, $U^h \in \widehat{H}^1$:

$$\int_{\Gamma_t}(\omega\check{t})\,\partial\Gamma + \int_\Omega(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\omega^h\boldsymbol{\nabla}U^h)\,\partial\Omega = 0 \quad \forall\omega \in H^1 \tag{4.38}$$

Dado que: $\widehat{H}^1 \subset H^1$, e sendo que:

$$U^h = \sum_{i=1}^n U_i\,\phi_i \tag{4.39}$$

$$\omega^h = \sum_{i=1}^n \omega_i\phi_i \tag{4.40}$$

Adicionando as equações (4.39) e (4.40) em (4.38)

$$\int_\Omega\left(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\sum_{i=1}^n \omega_i\phi_i\,\boldsymbol{\nabla}\sum_{j=1}^n A_j\phi_j\right)\partial\Omega + \int_{\Gamma_t}\left(\sum_{i=1}^n \omega_i\phi_i\check{t}\right)\partial\Gamma = 0\ \ \forall\omega \in H^1 \tag{4.41}$$

Rearranjando os termos:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i\left\{\sum_{j=1}^n\left[\int_\Omega\left(\boldsymbol{\nabla}\phi_j\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\phi_i U_j\right)\partial\Omega + \int_{\Gamma_t}(\phi_i\check{t})\partial\Gamma\right]\right\} = 0\ \ \forall\omega \in H^1 \tag{4.42}$$

Fazendo:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i G_i = 0 \quad \forall\omega_i \in \widehat{H}^1 \to G_i = 0 \tag{4.43}$$

na equação (4.42) e chamando:

$$K'_{ij} = \int_{\Omega} \boldsymbol{\nabla}\phi_j \varepsilon \boldsymbol{\nabla}\phi_i \partial\Omega \tag{4.44}$$

$$F'_i = \int_{\Omega} \phi_i \check{t} \partial\Gamma = 0 \tag{4.45}$$

Ou,

$$K'_{ij} = \int_{\Omega} \boldsymbol{\nabla}\phi_j \varepsilon \boldsymbol{\nabla}\phi_i \partial\, \Omega \tag{4.46}$$

$$F'_i = 0 \tag{4.47}$$

Obtemos o seguinte sistema linear, em que **K** e **F** são dados pelas respectivas equações (4.46) e (4.47).

$$\boldsymbol{K}'\boldsymbol{U} = \boldsymbol{F}' \tag{4.48}$$

Observação: Para o cálculo do campo elétrico foi considerado a seguinte expressão:

$$\boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\nabla}U \tag{4.49}$$

Onde: $\boldsymbol{E}$, é o campo elétrico e U, é o potencial elétrico

5 | Resultados

Neste capítulo, são apresentadas as simulações das distribuições dos campos elétricos e potenciais na bucha isolante de alta tensão, hipotética, desenvolvida para este estudo de caso, conforme mencionada em tópicos anteriores, e posteriormente foi realizado e comparado com o aplicativo FEM 4.2, para validação do algoritmo.

5.1 Condições do problema

A bucha isolante de alta tensão hipotética foi idealizada conforme a prescrições da norma NBR-5034:2014, e possui as condições de níveis de isolamento, conforme tabela abaixo.

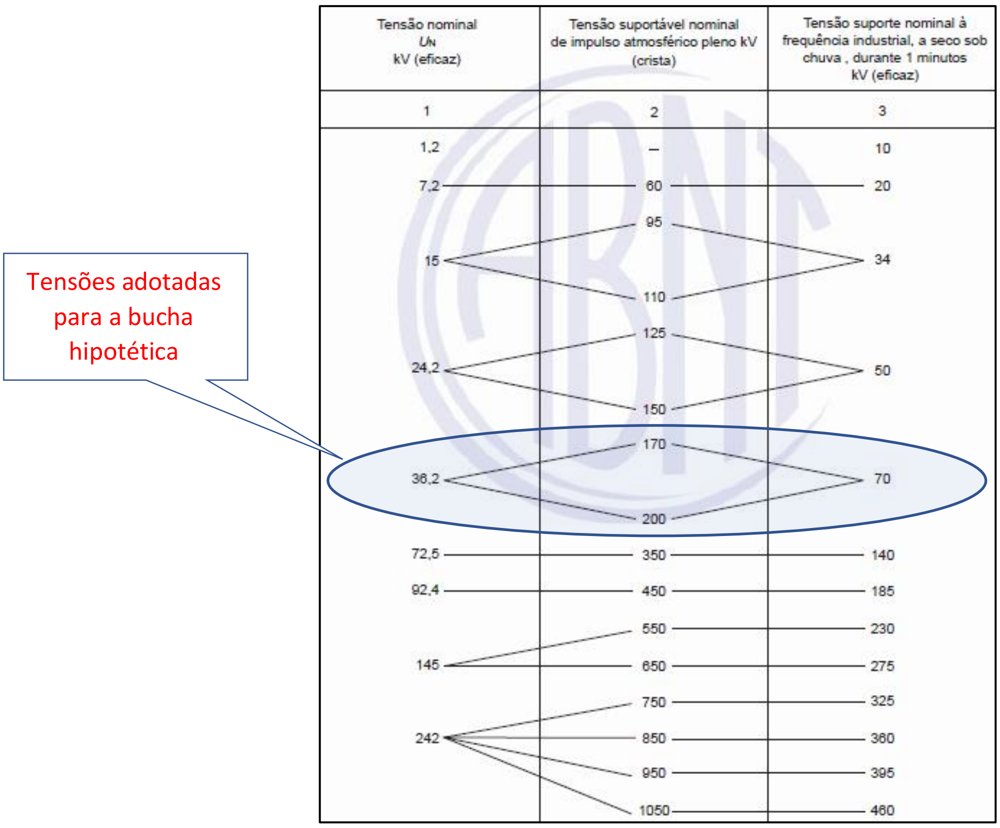


Figura 5.1 – Níveis de isolamento nominais - Fonte: (ABNT NBR 5034:2014)

A escolha entre as tensões suportáveis nominais, ligadas a cada tensão nominal, depende da severidade das condições de sobretensões esperadas, no sistema e da importância da instalação. Uma orientação para a escolha, pode ser obtida na ABNT NBR 6939. O valor escolhido para as simulações foi o valor mais crítico, neste caso se refere a 200 kV, para tensão suportável de impulso atmosférico pleno.

A bucha isolante de alta tensão hipotética foi submetida as seguintes condições de simulações:

- Tensão nominal: 36.2 kV;
- Tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno: 200.0 kV (crista);
- Tensão suportável nominal à frequência industrial, a seco sob chuva, durante 1 minutos: 70,0 kV (eficaz).

Desta forma, as simulações foram realizadas em duas condições distintas:

- Bucha isolante sem presença de falha no material isolante;
- Bucha isolante com presença de falha no material isolante.

Em ambas as condições acima, foram realizadas as simulações similares com o método sem malha (algoritmo do EFGM) e com o FEM 4.2, para certificar e validar a veracidade do método.

5.2 Estudos de Casos

5.2.1 Bucha isolante hipotética – SEM FALHA

A figura 5.2, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha e do domínio do problema, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

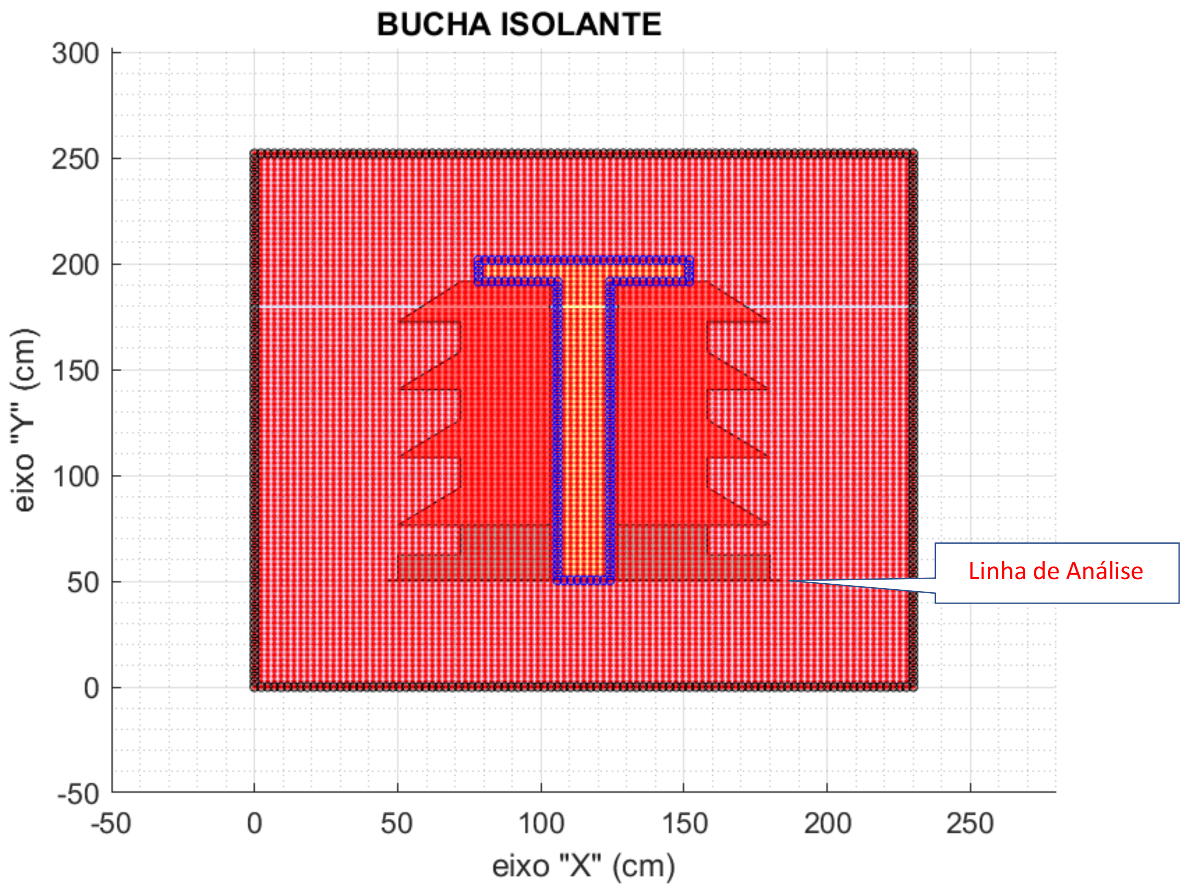


Figura 5.2 – Bucha Isolante Sem Falha e Distribuição dos Nós

Nesta simulação foi considerada a bucha isolante sem a presença de falha, representando a condição de **tensão nominal de 36,2 kV**.

A figura 5.3, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha e do domínio do problema, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

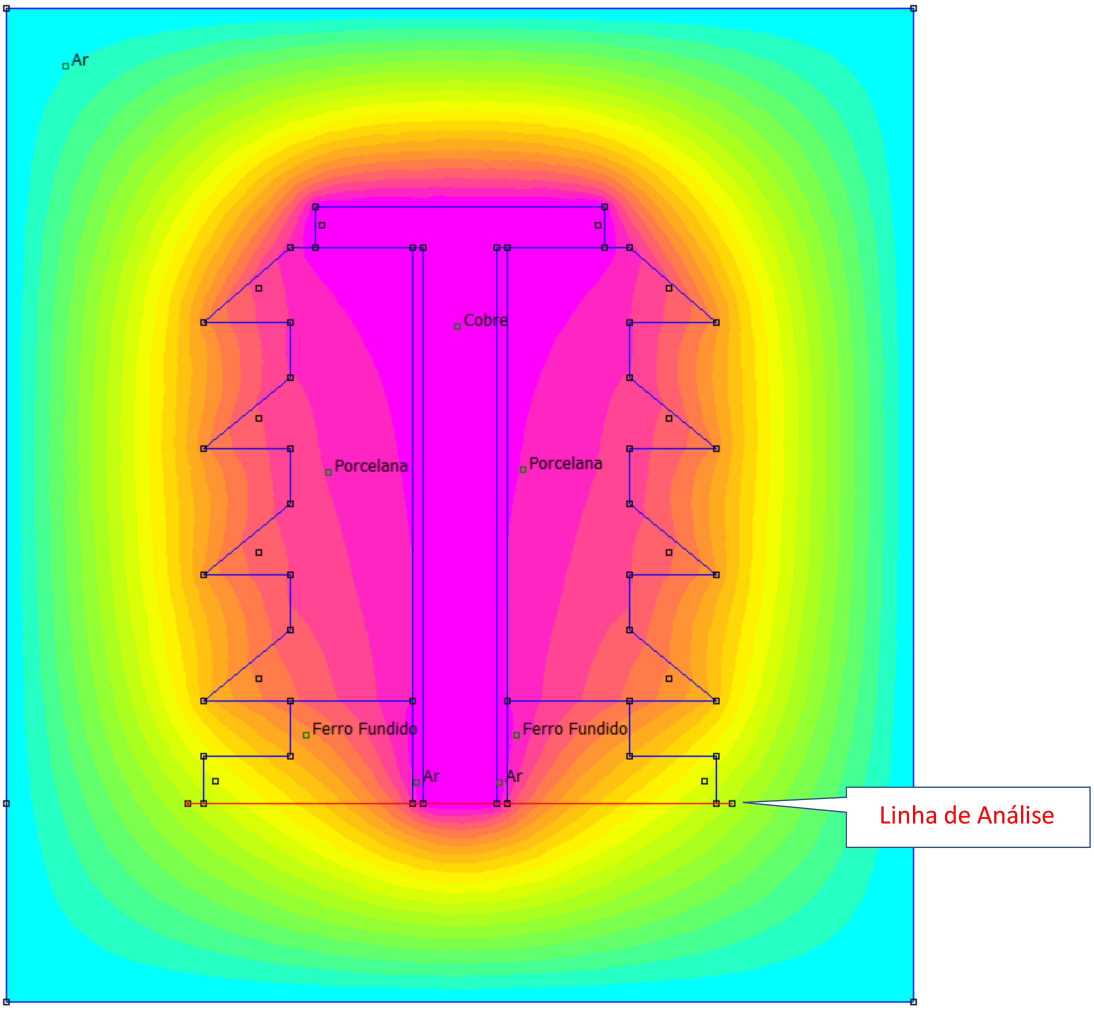
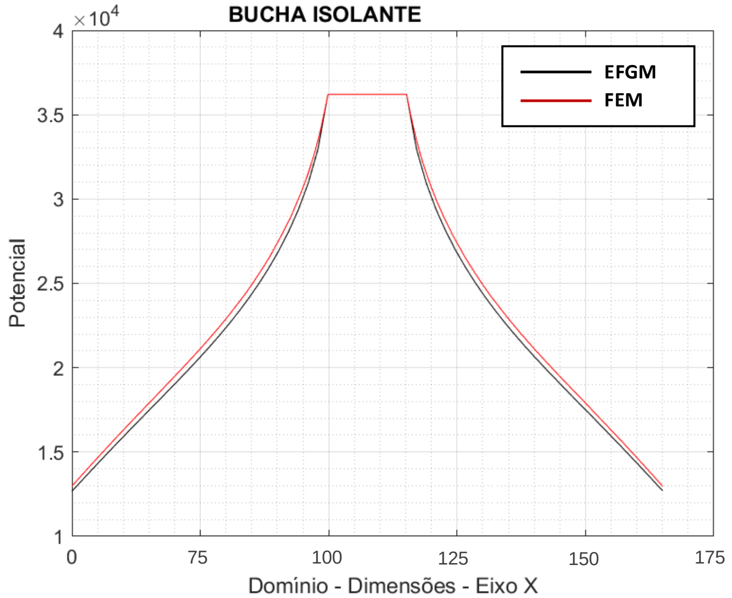


Figura 5.3 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

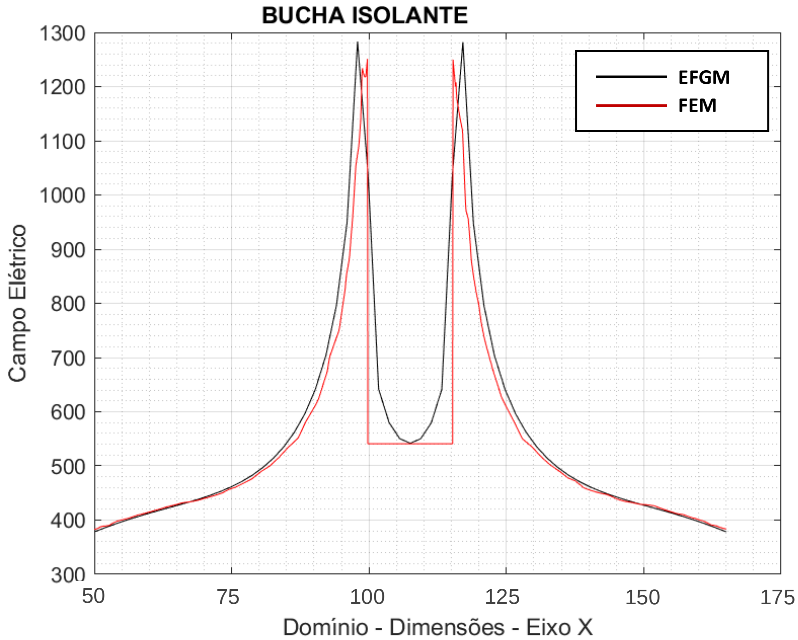
A figura 5.4, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,147 %

Figura 5.4 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.5, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
1,821 %

Figura 5.5 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

5.2.2 Bucha isolante hipotética – SEM FALHA

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante sem a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno: 200.0 kV (crista)**.

A figura 5.6, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha e do domínio do problema, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

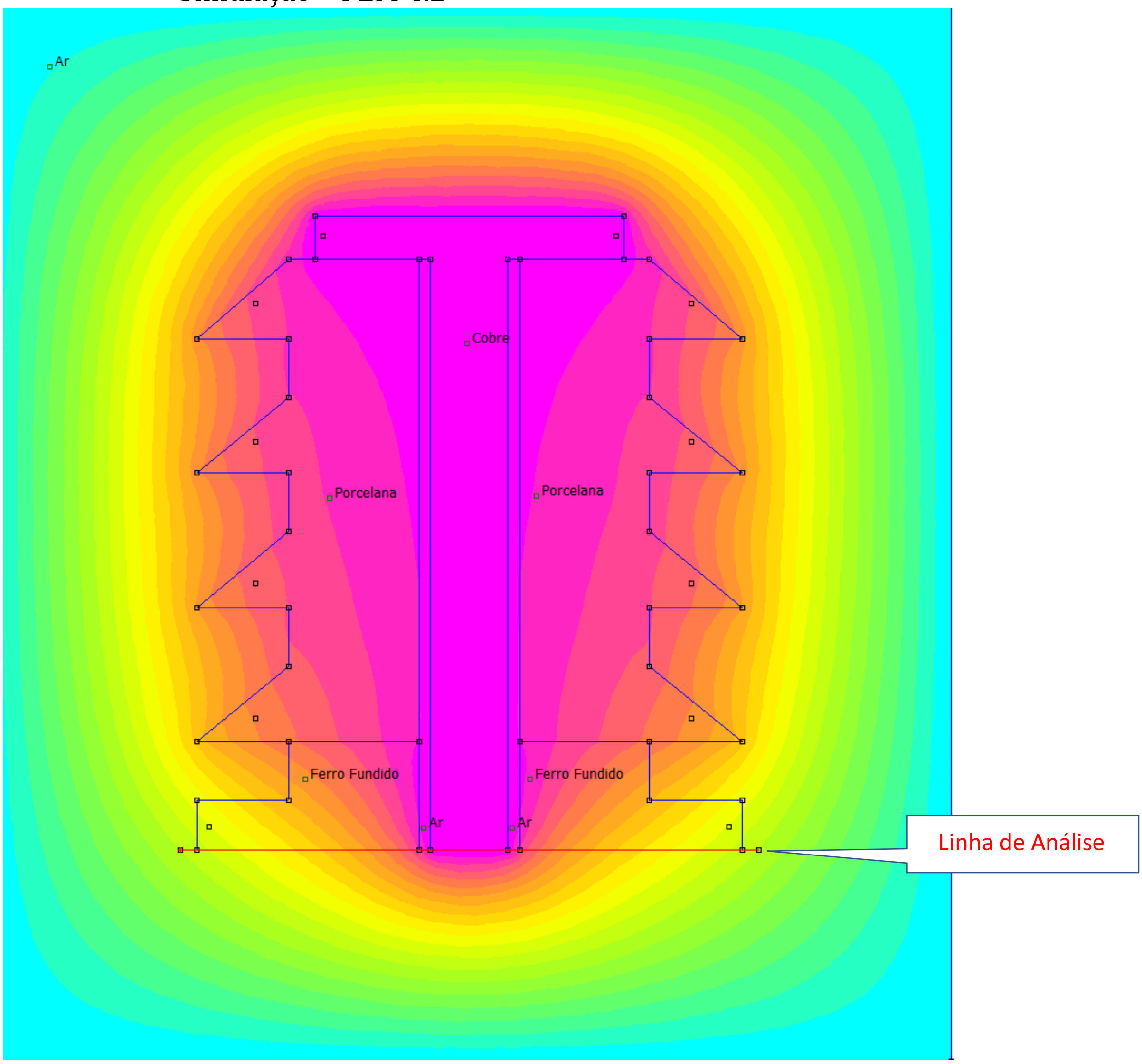
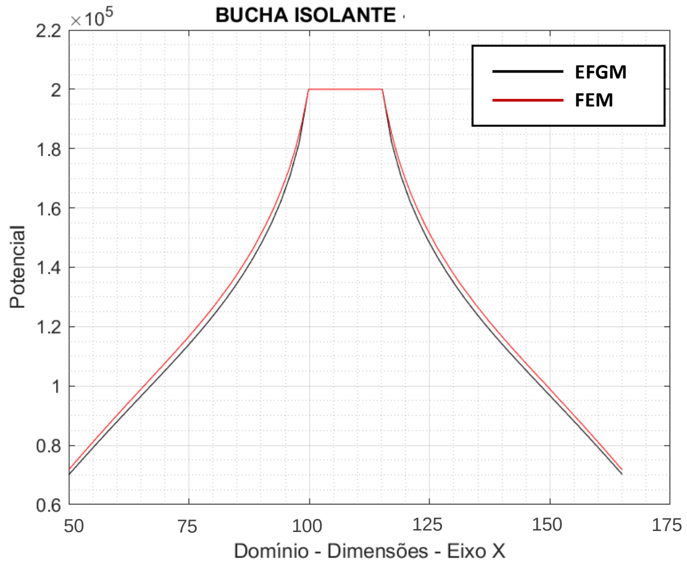


Figura 5.6 –Simulação no FEM 4.2 – 200.00kV

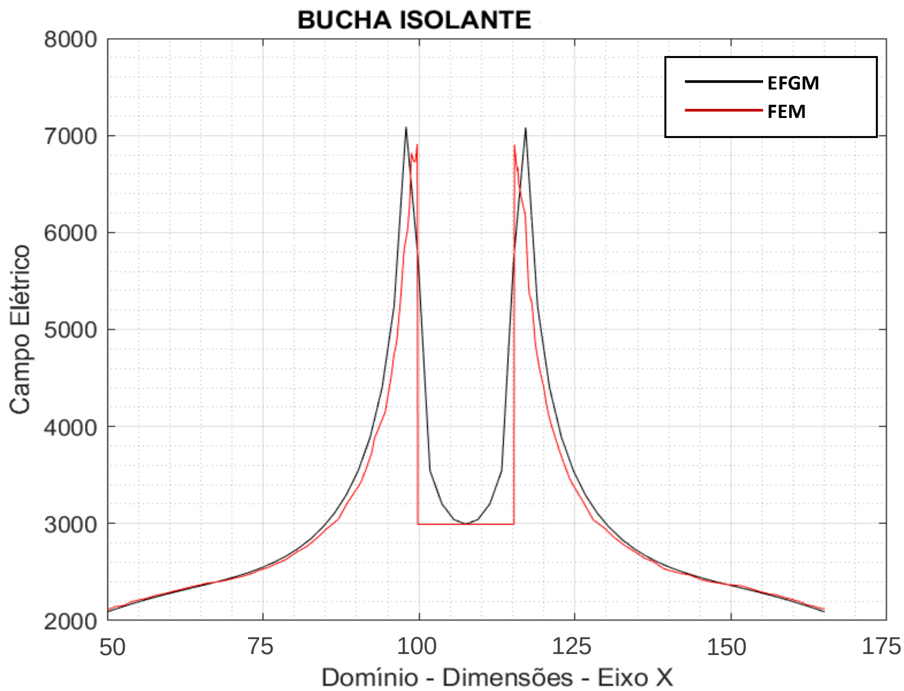
A figura 5.7, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,149 %

Figura 5.7 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

A figura 5.8, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
1,859 %

Figura 5.8 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

5.2.3 Bucha isolante hipotética – SEM FALHA

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante sem a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal à frequência industrial, de 70,0 kV (eficaz)**.

A figura 5.9, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha e do domínio do problema, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

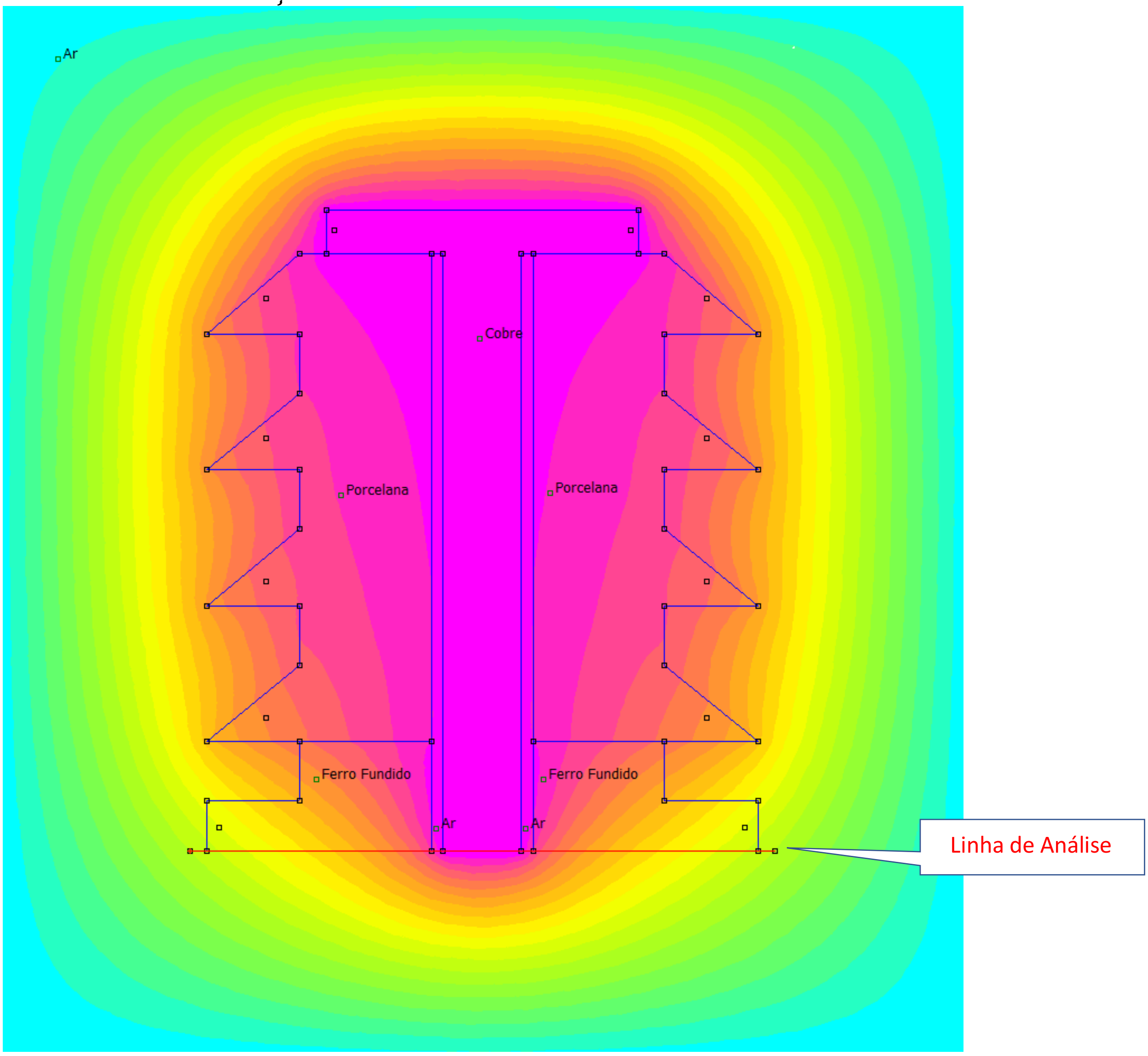
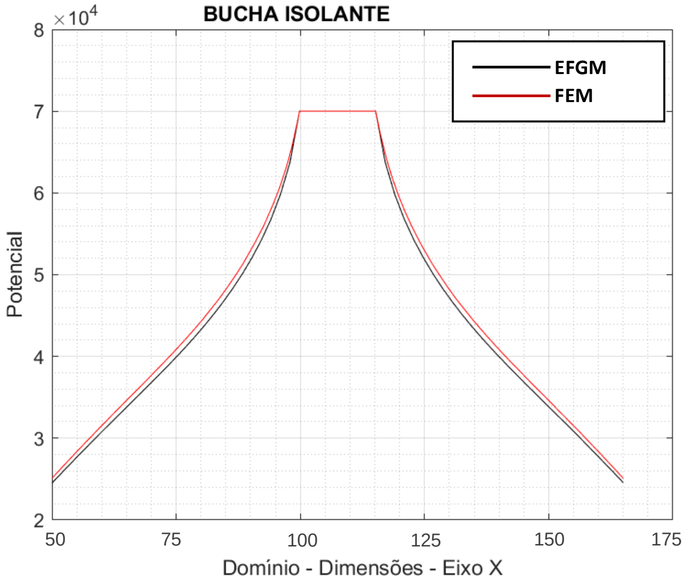


Figura 5.9 –Simulação no FEM 4.2 – 70.00kV

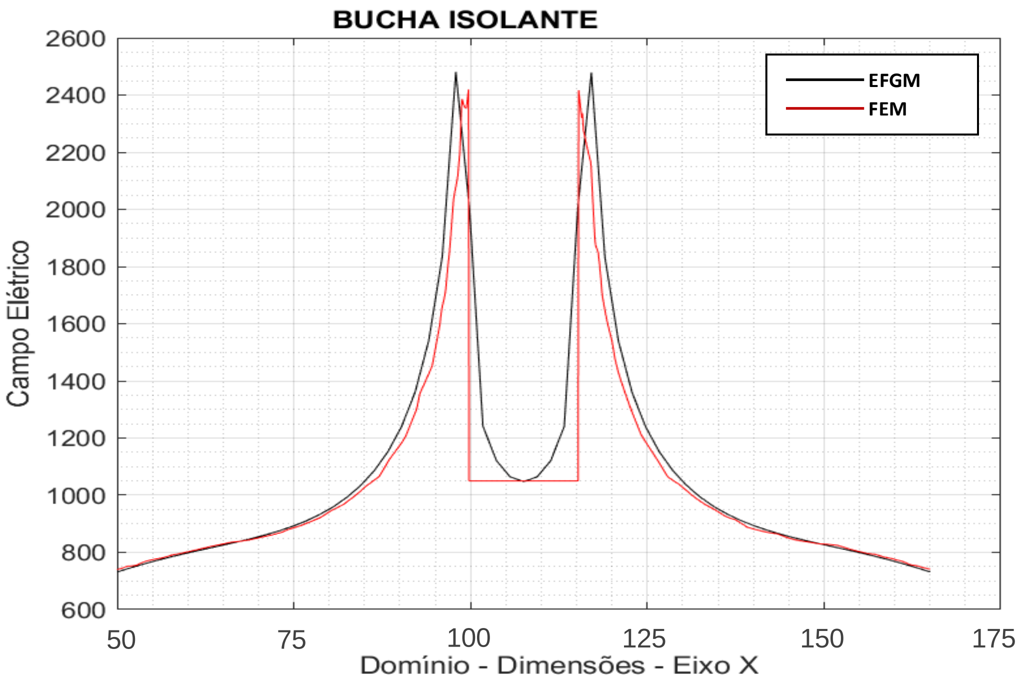
A figura 5.10, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,162 %

Figura 5.10 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

A figura 5.11, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
1,932 %

Figura 5.11 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

5.2.4 Considerações Gerais sobre a Análise com Falhas

- O termo “falhas” se refere a alterações no material isolante da bucha, que provoquem mudanças nas propriedades dielétricas e consequente variações do comportamento do campo elétrico

- A análise dos potenciais e campos elétricos são avaliados sobre a “linha de análise”, porém foi criado uma “região da falha”, para considerar as possíveis rupturas do material isolante, na região da falha, simulando as alterações de suas propriedades.

- A condição de análise descrita e apresentada abaixo, como exemplo, para falha na parte superior da bucha isolante.

A figura 5.12, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, do domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

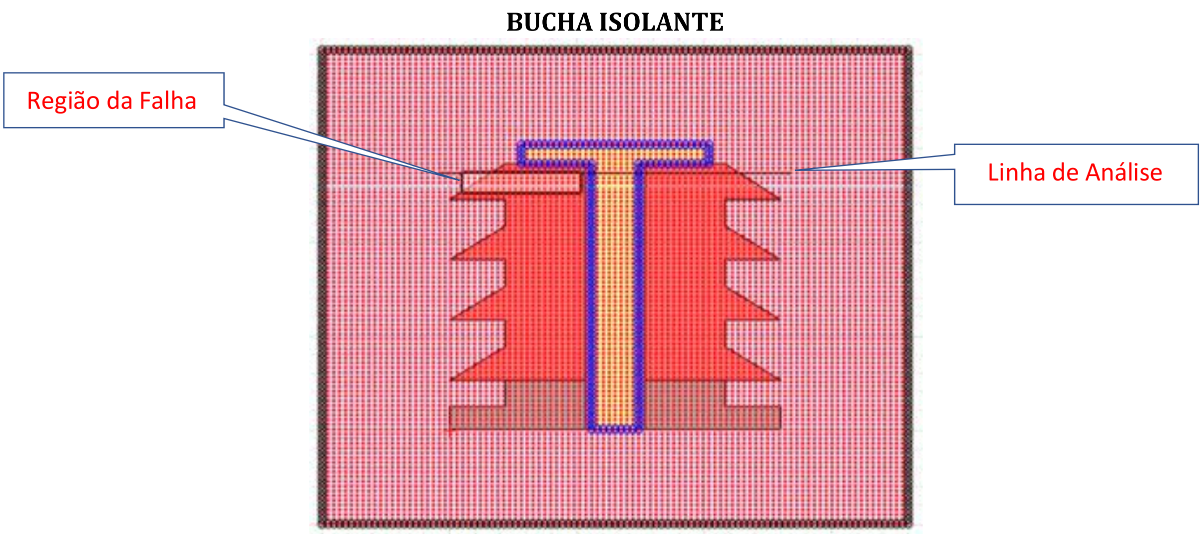


Figura 5.12 – Exemplo de Bucha Isolante Com Falha

- Desta forma, as análises foram realizadas dentro da realidade funcional e operacional das buchas isolantes.

5.2.5 Bucha isolante hipotética – COM FALHA PARTE SUPERIOR

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **tensão nominal de 36,2 kV**.

A figura 5.13, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

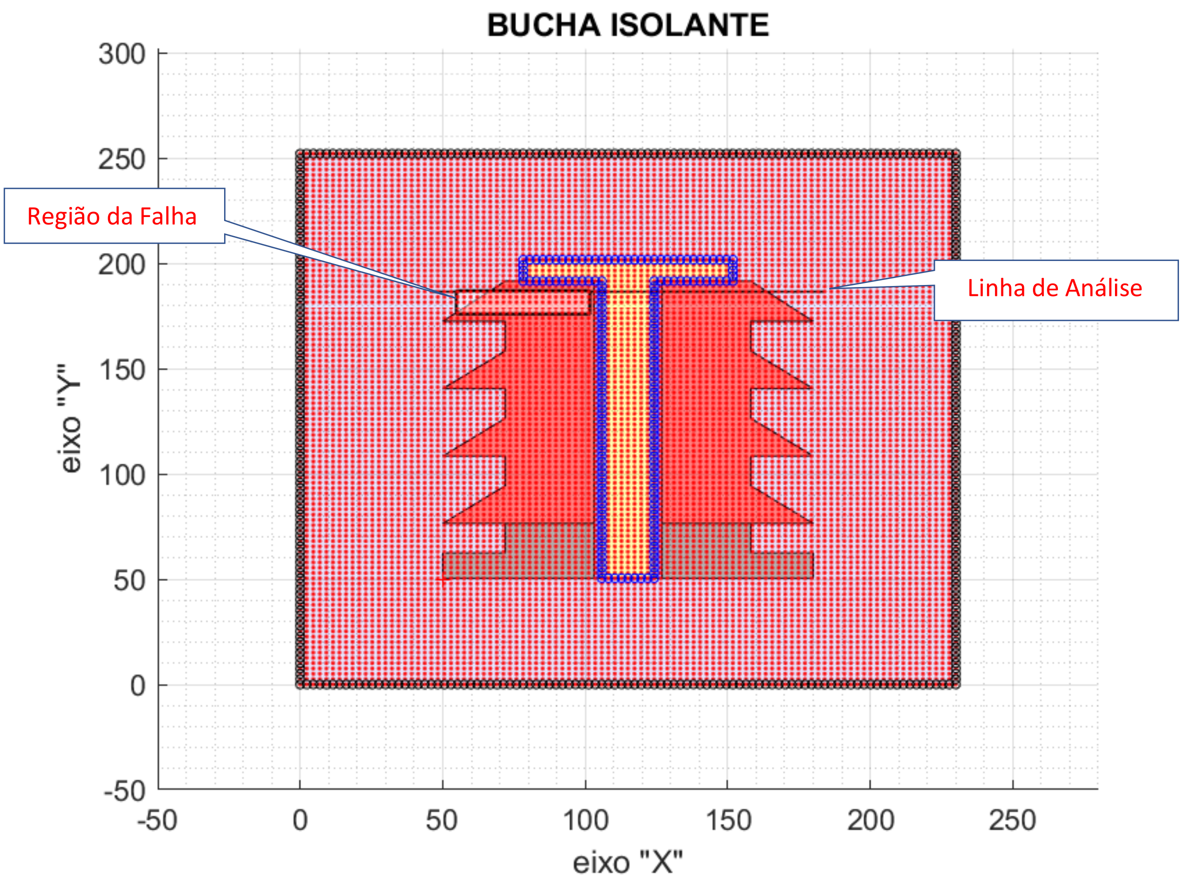


Figura 5.13 – Bucha Isolante Com Falha Superior e Distribuição dos Nós

A figura 5.14, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

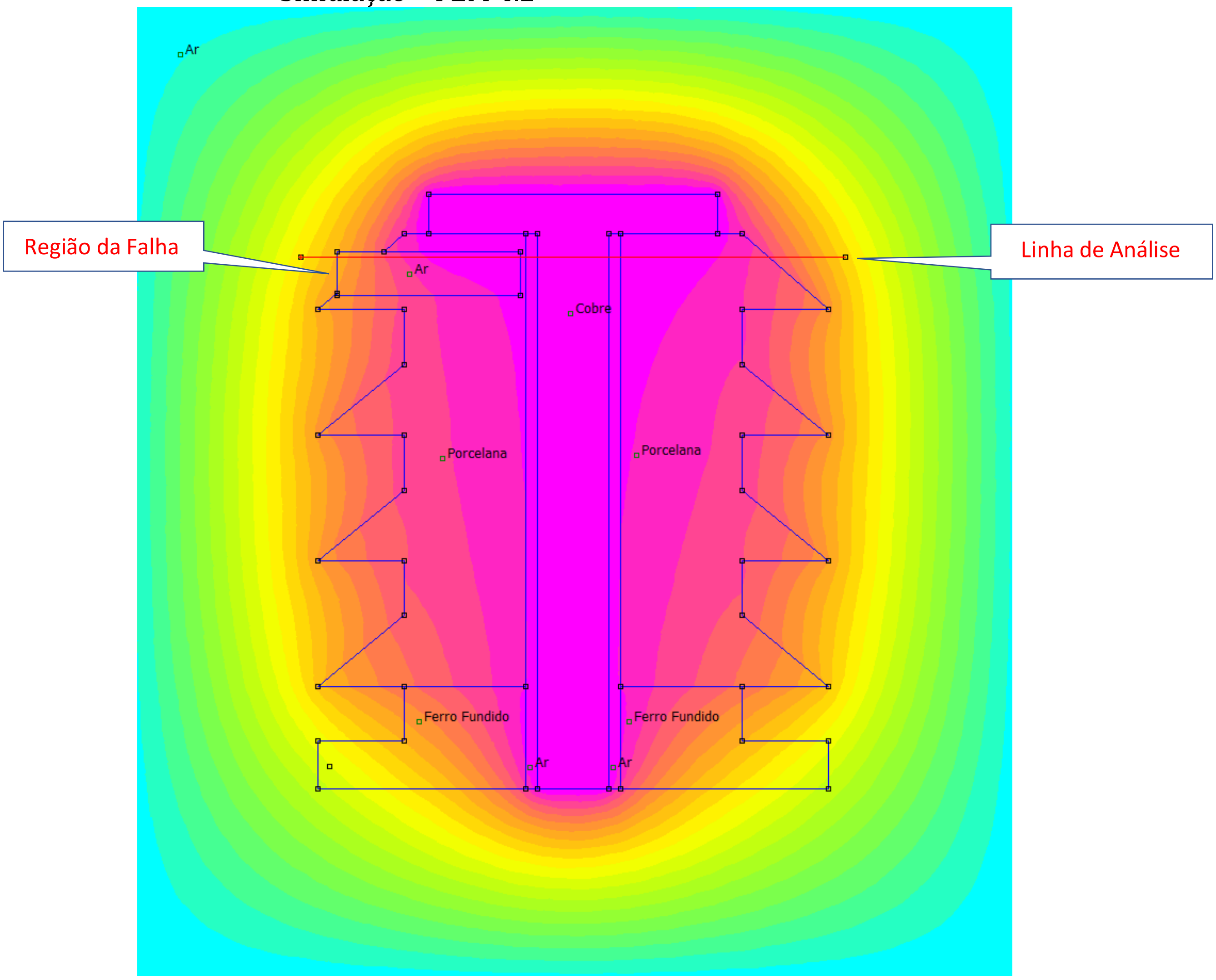
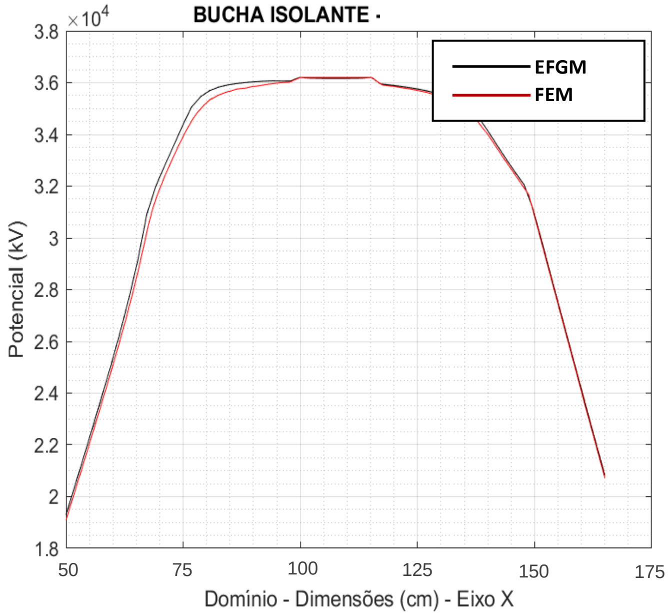


Figura 5.14 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

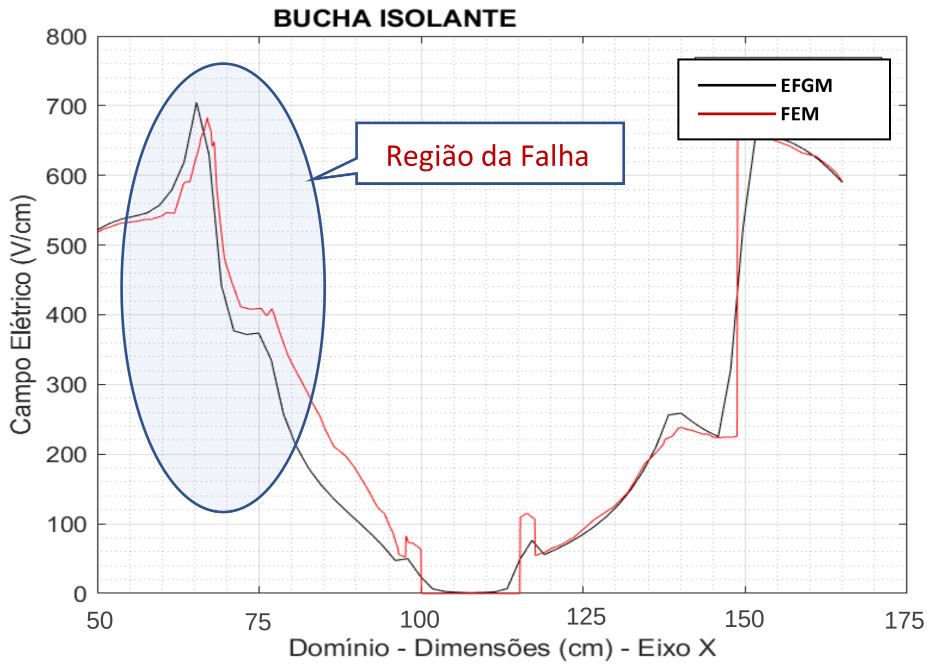
A figura 5.15, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,347 %

Figura 5.15 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.16, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,373 %

Figura 5.16 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

5.2.6 Bucha isolante sólida hipotética – COM FALHA NA PARTE SUPERIOR

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno: 200.0 kV (crista)**.

A figura 5.17, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

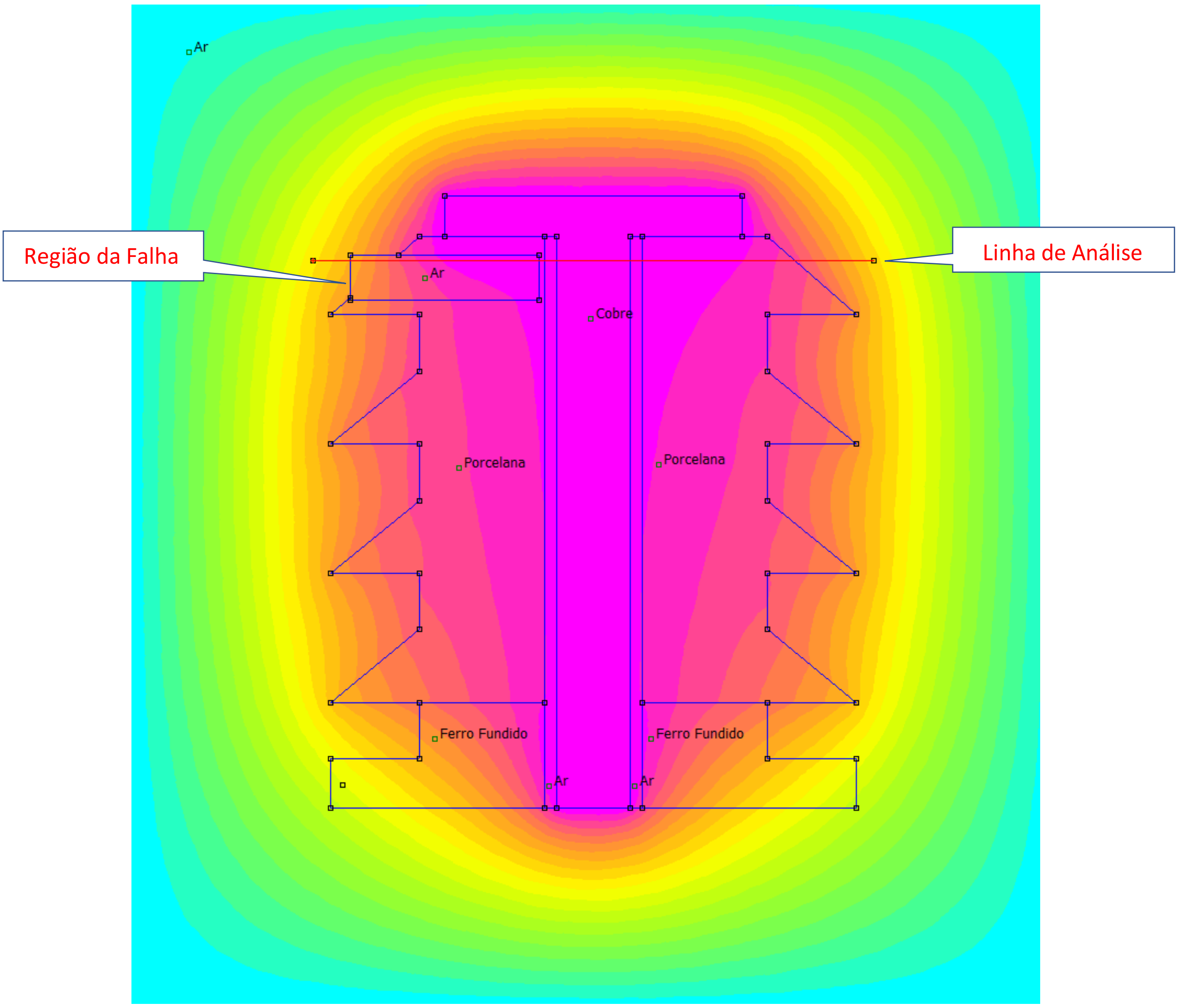
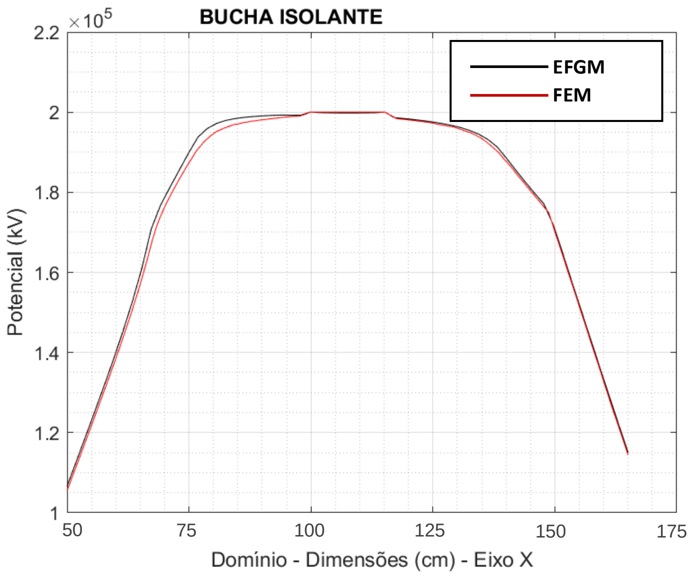


Figura 5.17 –Simulação no FEM 4.2 – 200.00kV

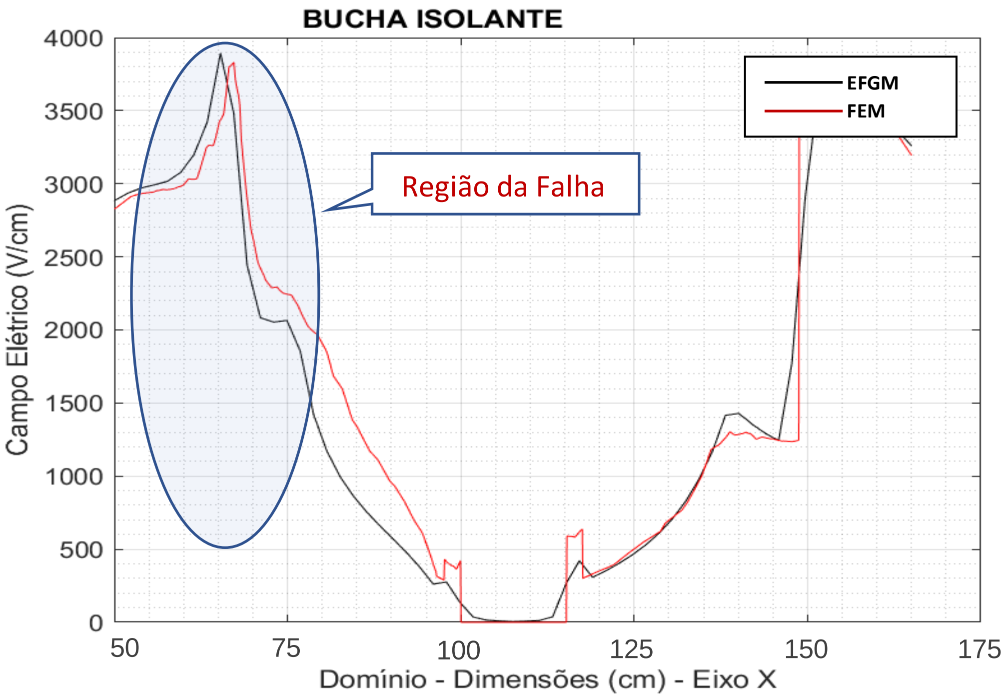
A figura 5.18, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,352 %

Figura 5.18 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

A figura 5.19, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,802 %

Figura 5.19 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

5.2.7 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NA PARTE SUPERIOR

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal à frequência industrial, de 70,0 kV (eficaz)**.

A figura 5.20, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

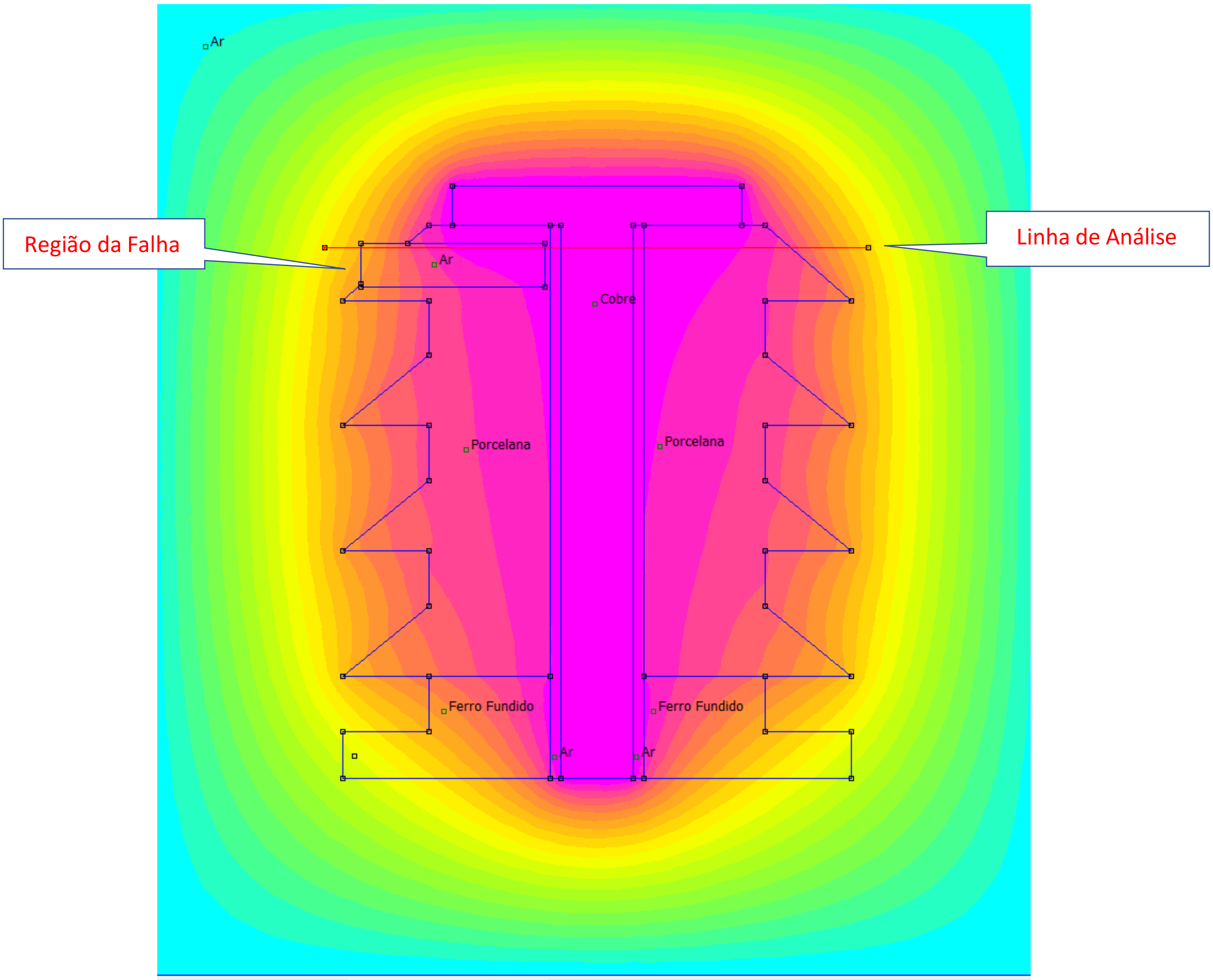
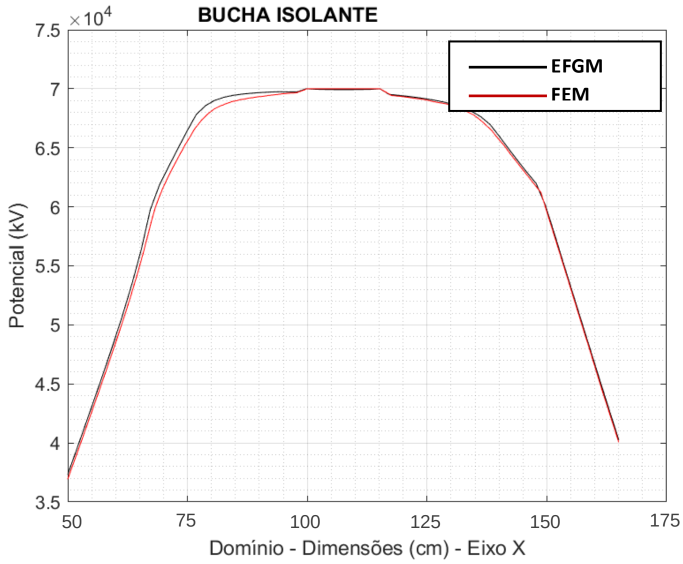


Figura 5.20 –Simulação no FEM 4.2 – 70.00kV

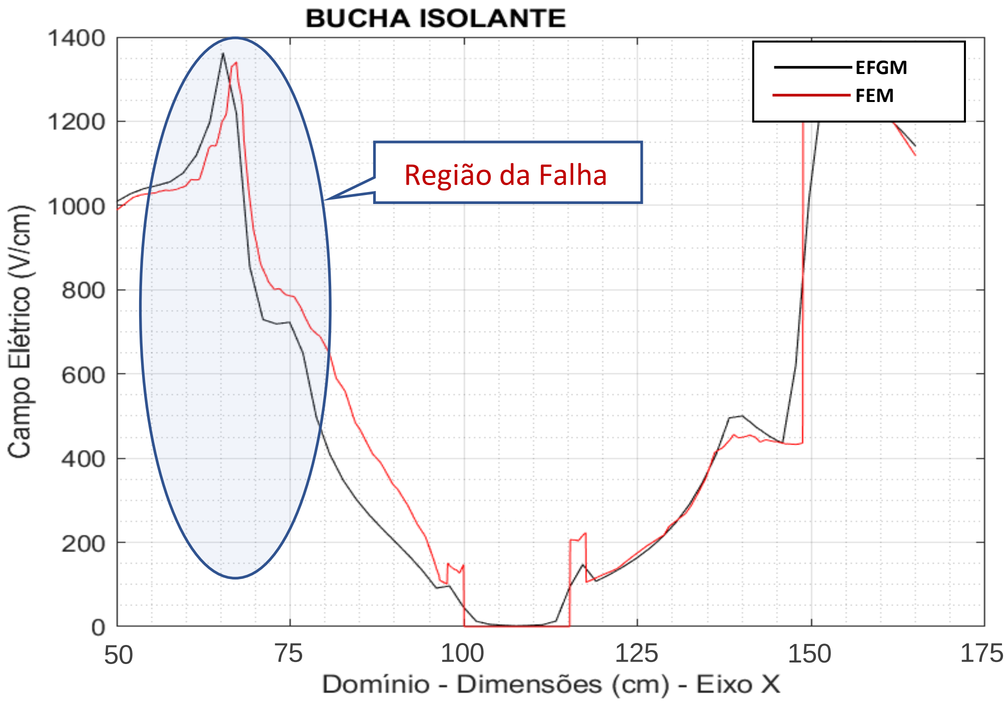
A figura 5.21, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,321 %

Figura 5.21 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

A figura 5.22, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,590 %

Figura 5.22 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

5.2.8 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NO MEIO

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **tensão nominal de 36,2 kV**.

A figura 5.23, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

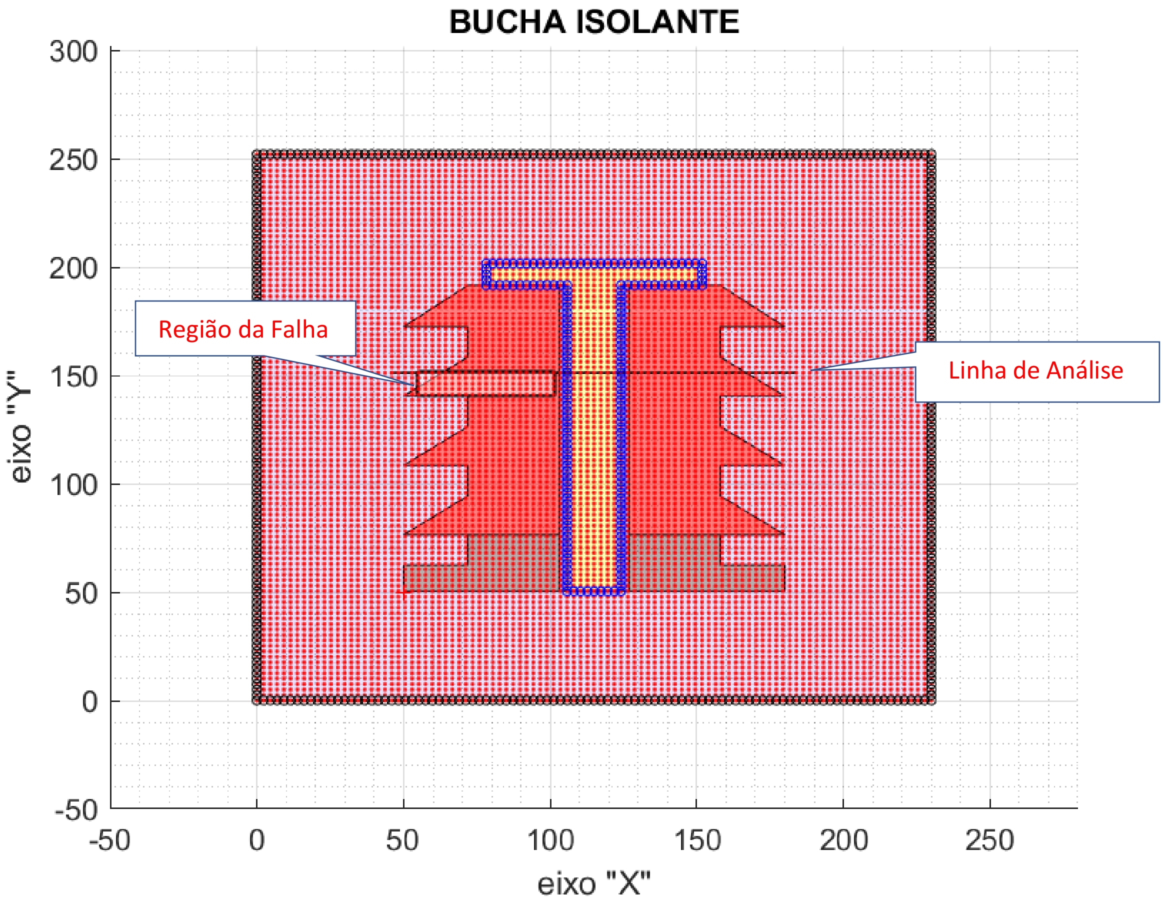


Figura 5.23 – Bucha Isolante Com Falha Média e Distribuição dos Nós

A figura 5.24, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

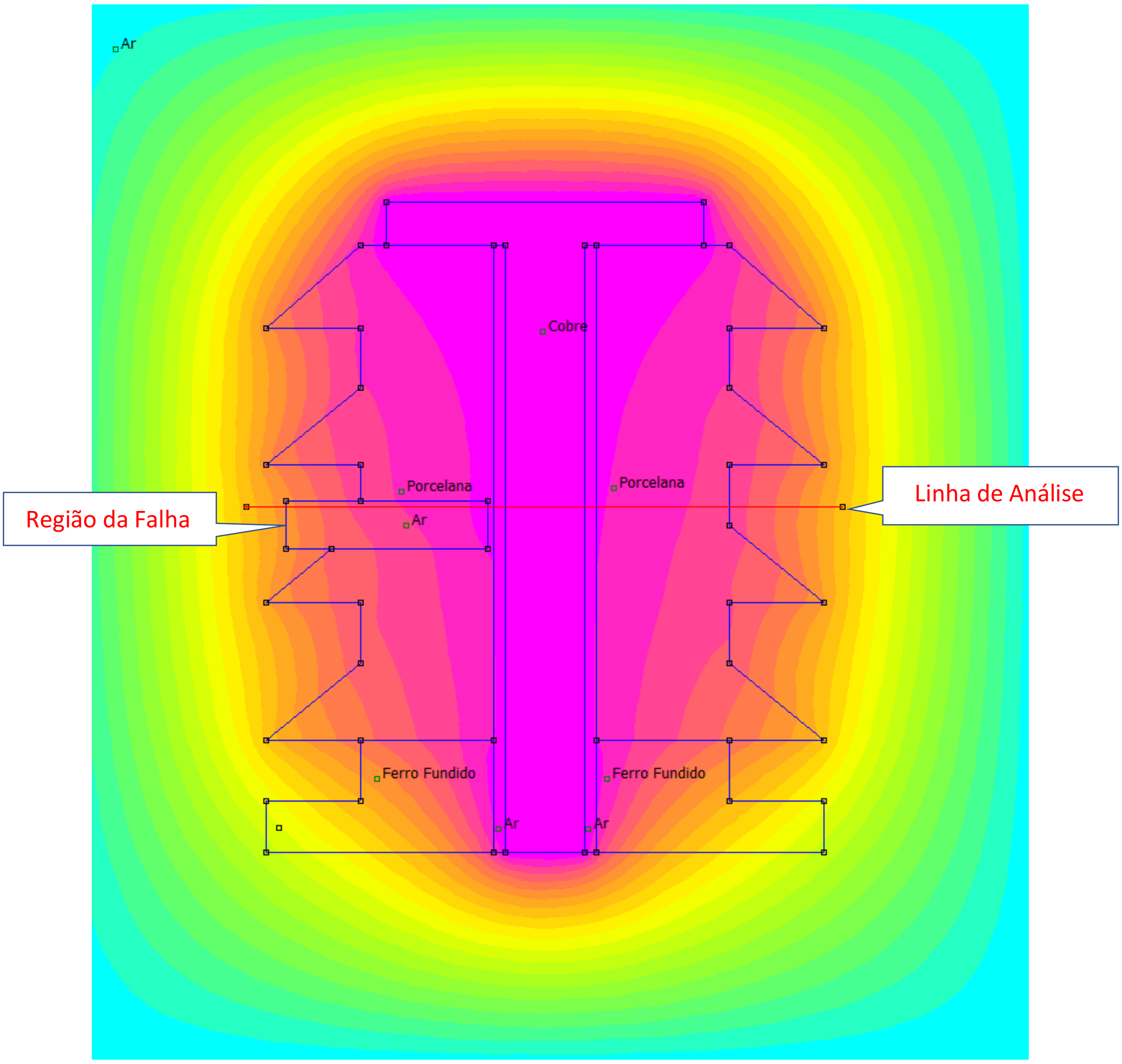
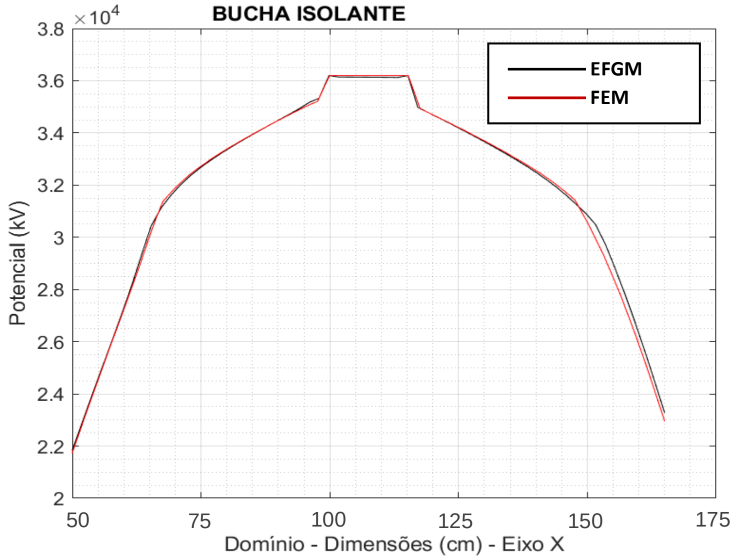


Figura 5.24 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

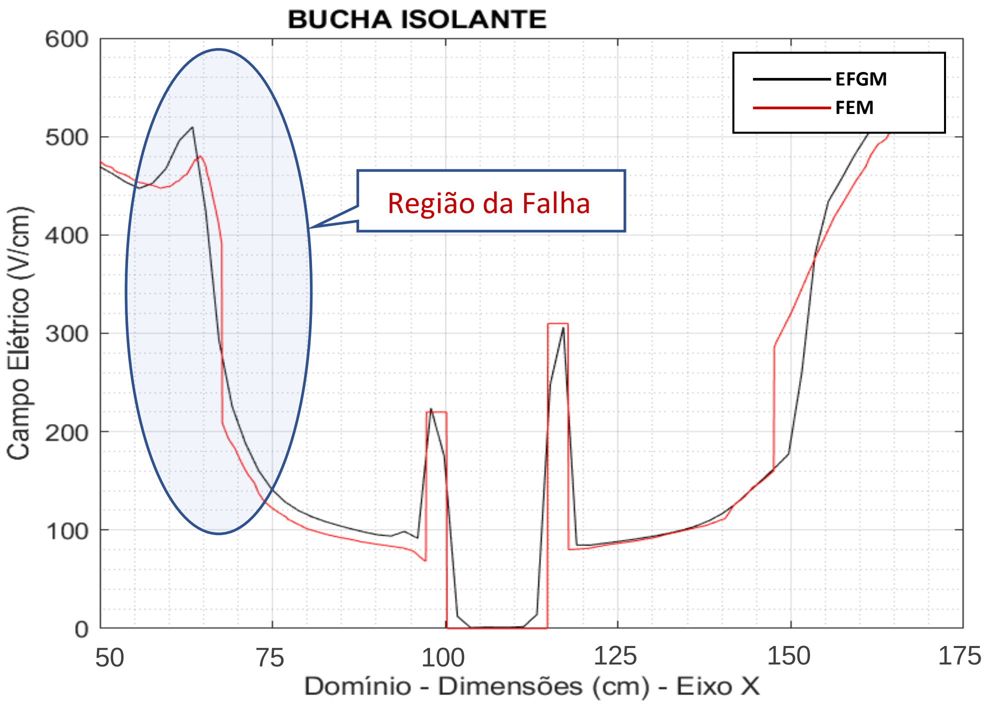
A figura 5.25, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,287 %

Figura 5.25 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.26, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
3,750 %

Figura 5.26 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

5.2.9 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NO MEIO

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno: 200.0 kV (crista)**.

A figura 5.27, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

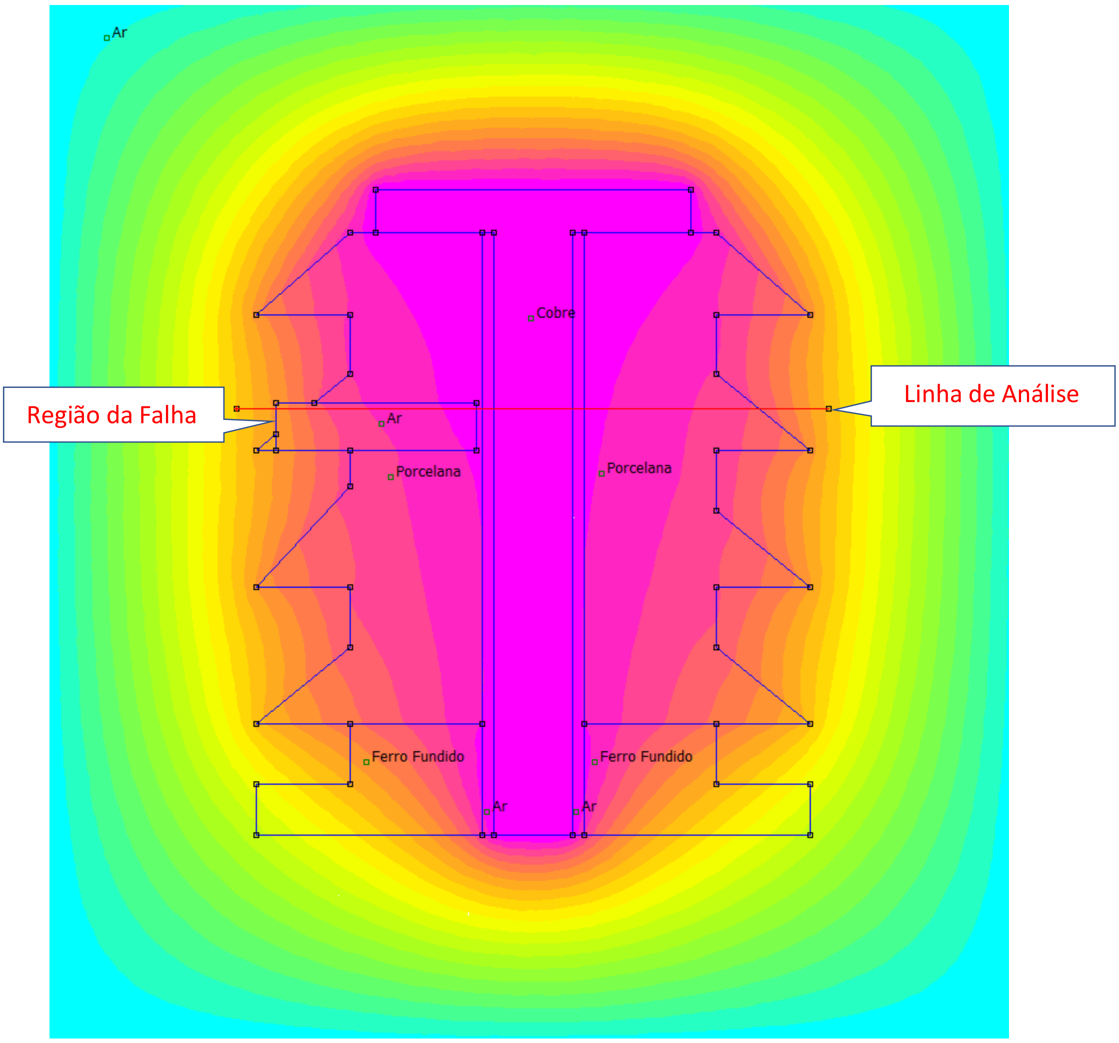
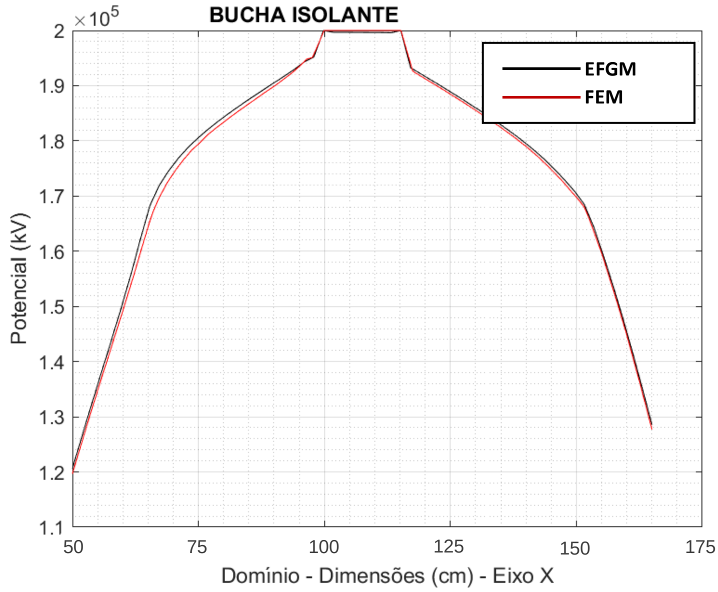


Figura 5.27 –Simulação no FEM 4.2 – 200.00kV

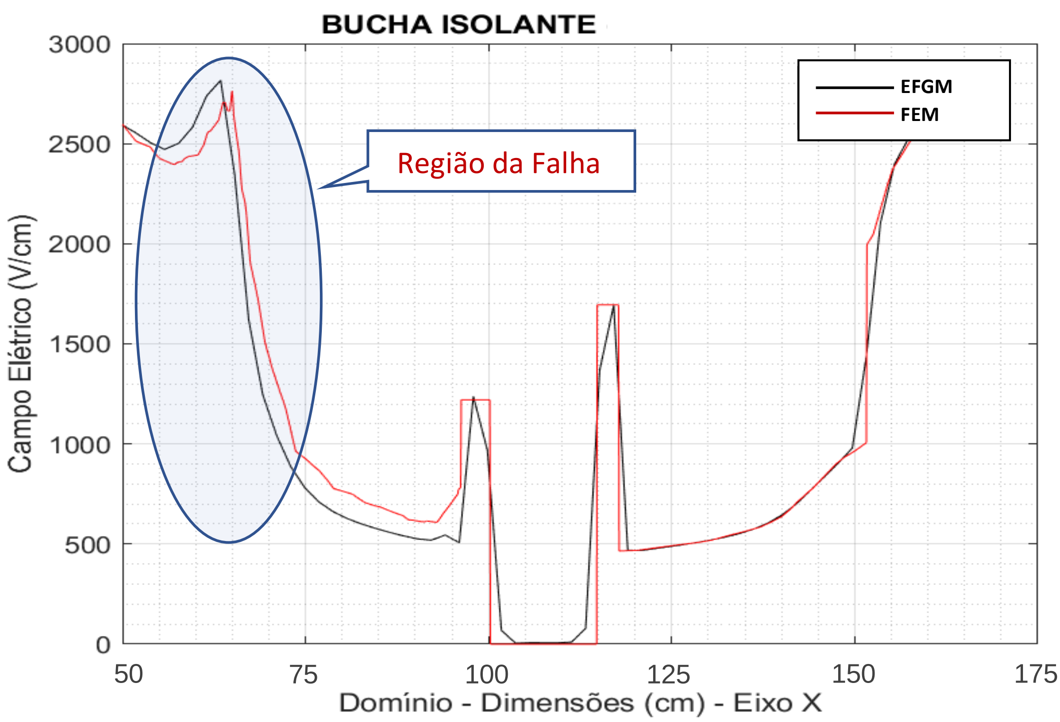
A figura 5.28, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,303 %

Figura 5.28 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

A figura 5.29, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
3,498 %

Figura 5.29 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

5.2.10 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NO MEIO

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal à frequência industrial, de 70,0 kV (eficaz)**.

A figura 5.30, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

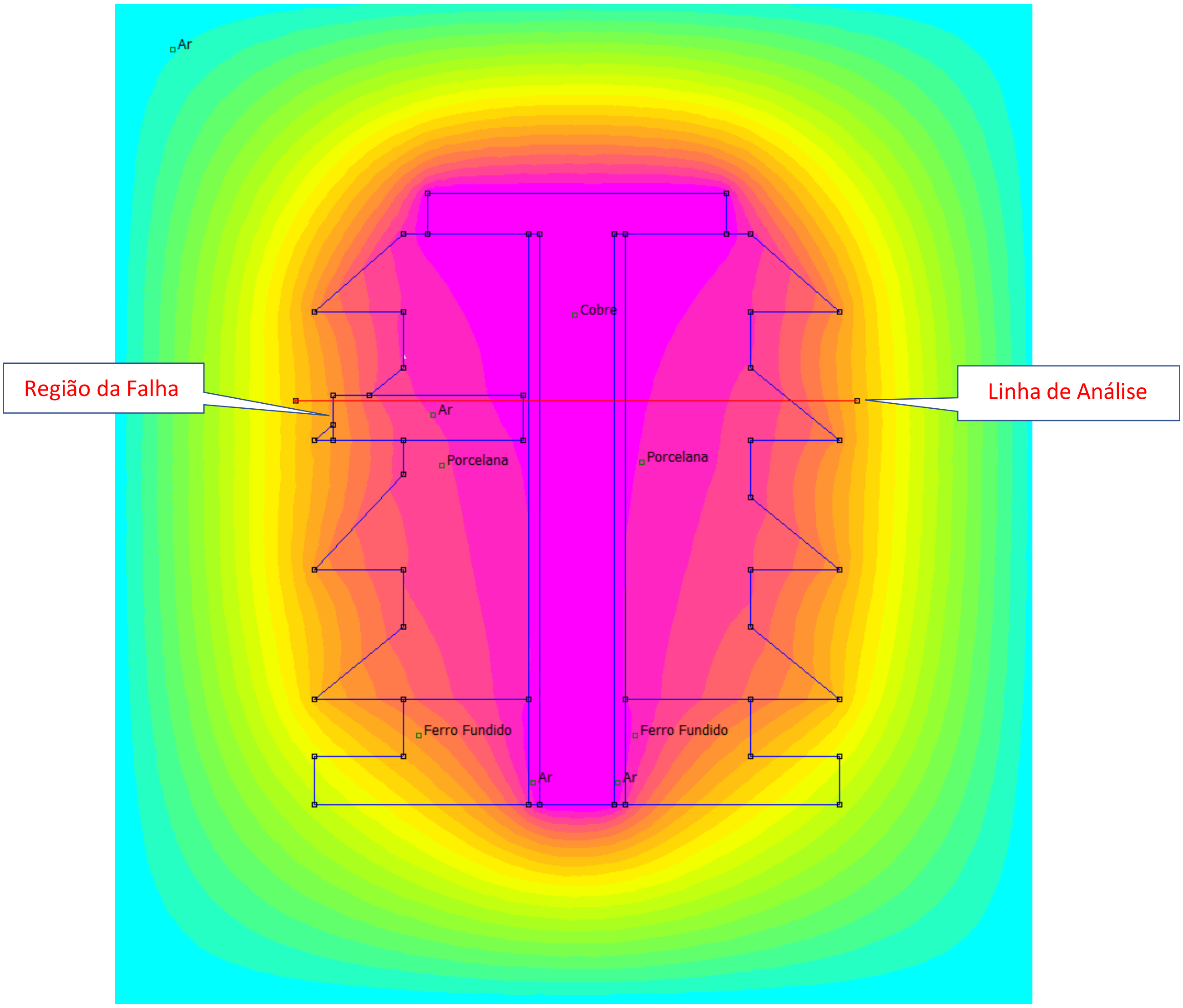
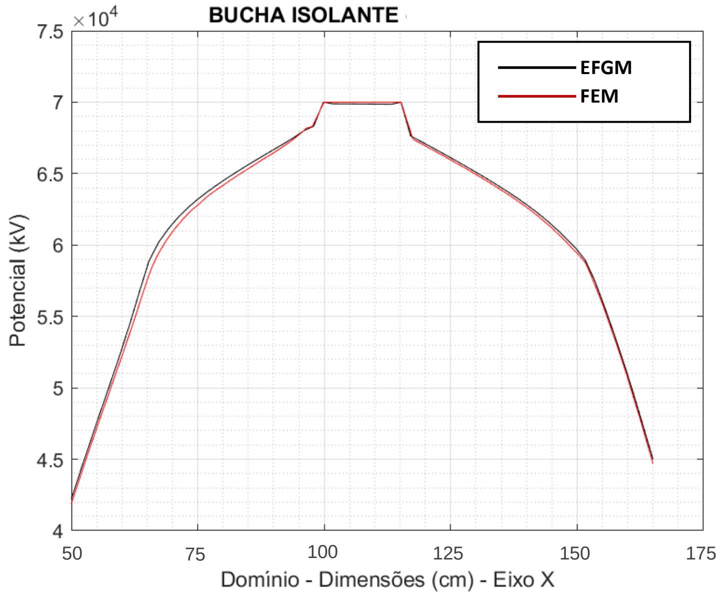


Figura 5.30 –Simulação no FEM 4.2 – 70.00kV

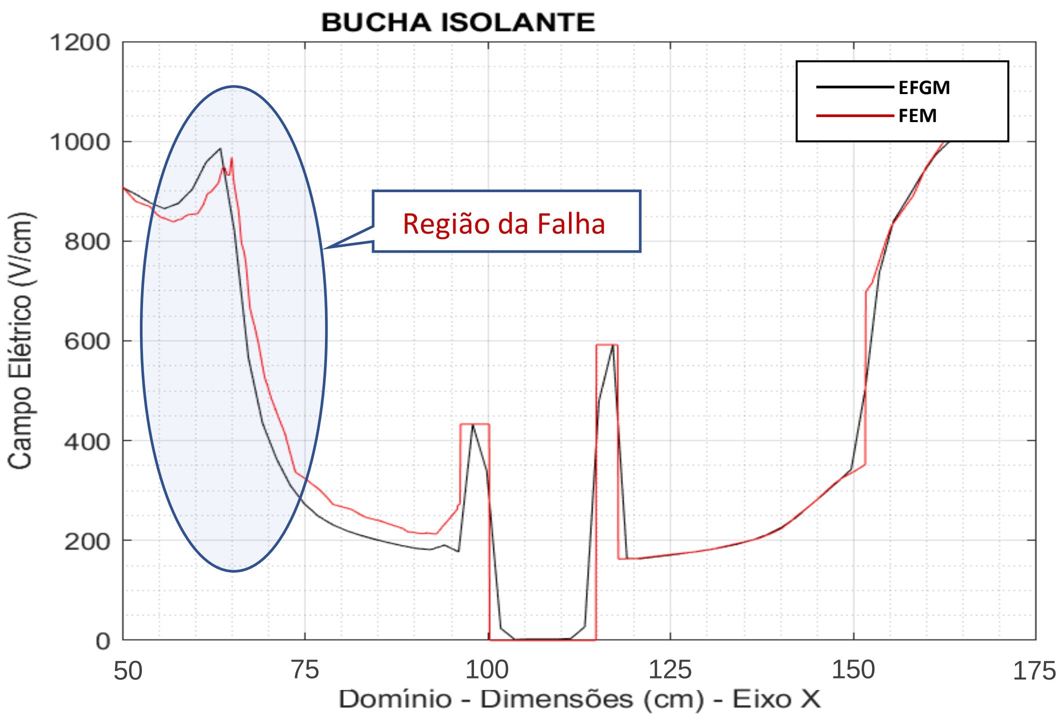
A figura 5.31, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,294 %

Figura 5.31 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

A figura 5.32, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
3,512 %

Figura 5.32 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

5.2.11 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NA PARTE INFERIOR

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **tensão nominal de 36,2 kV**.

A figura 5.33, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

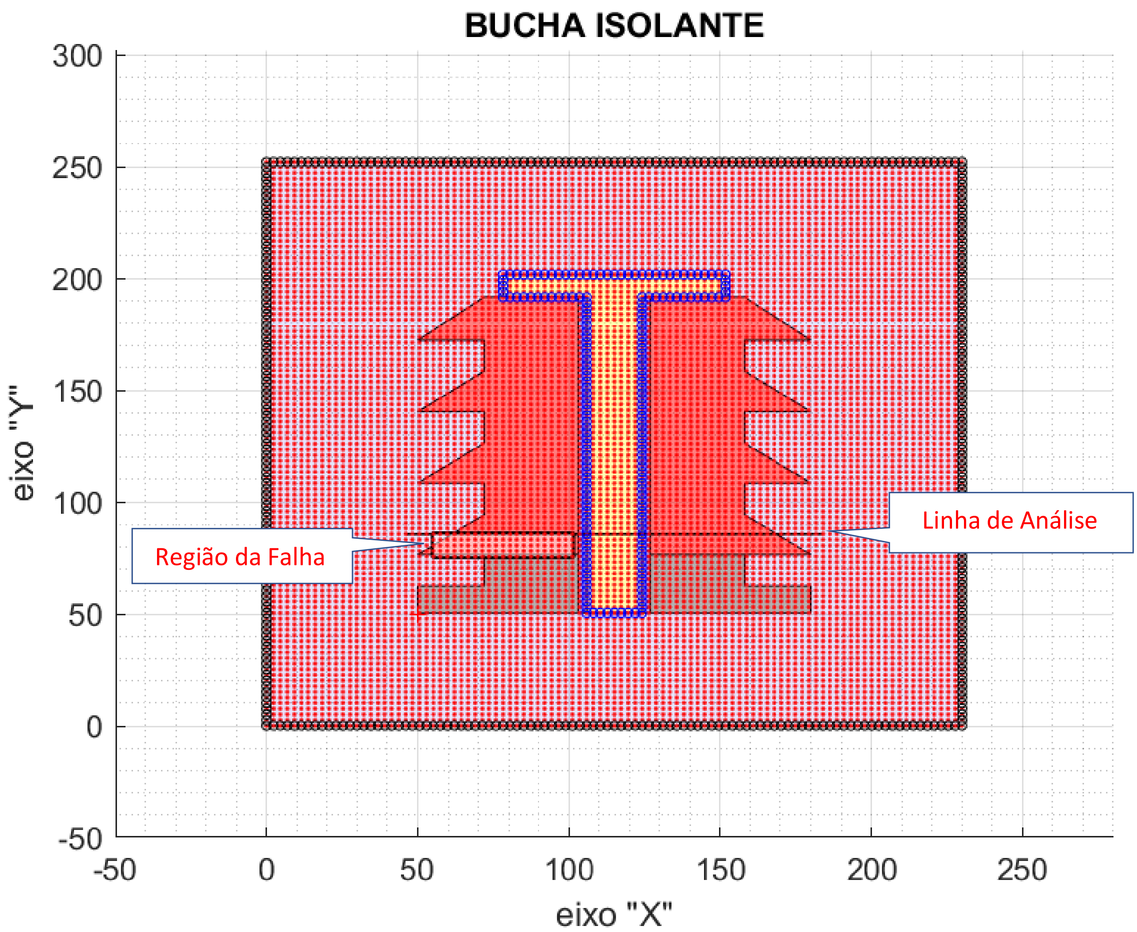


Figura 5.33 – Bucha Isolante Com Falha Inferior e Distribuição dos Nós

A figura 5.34, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

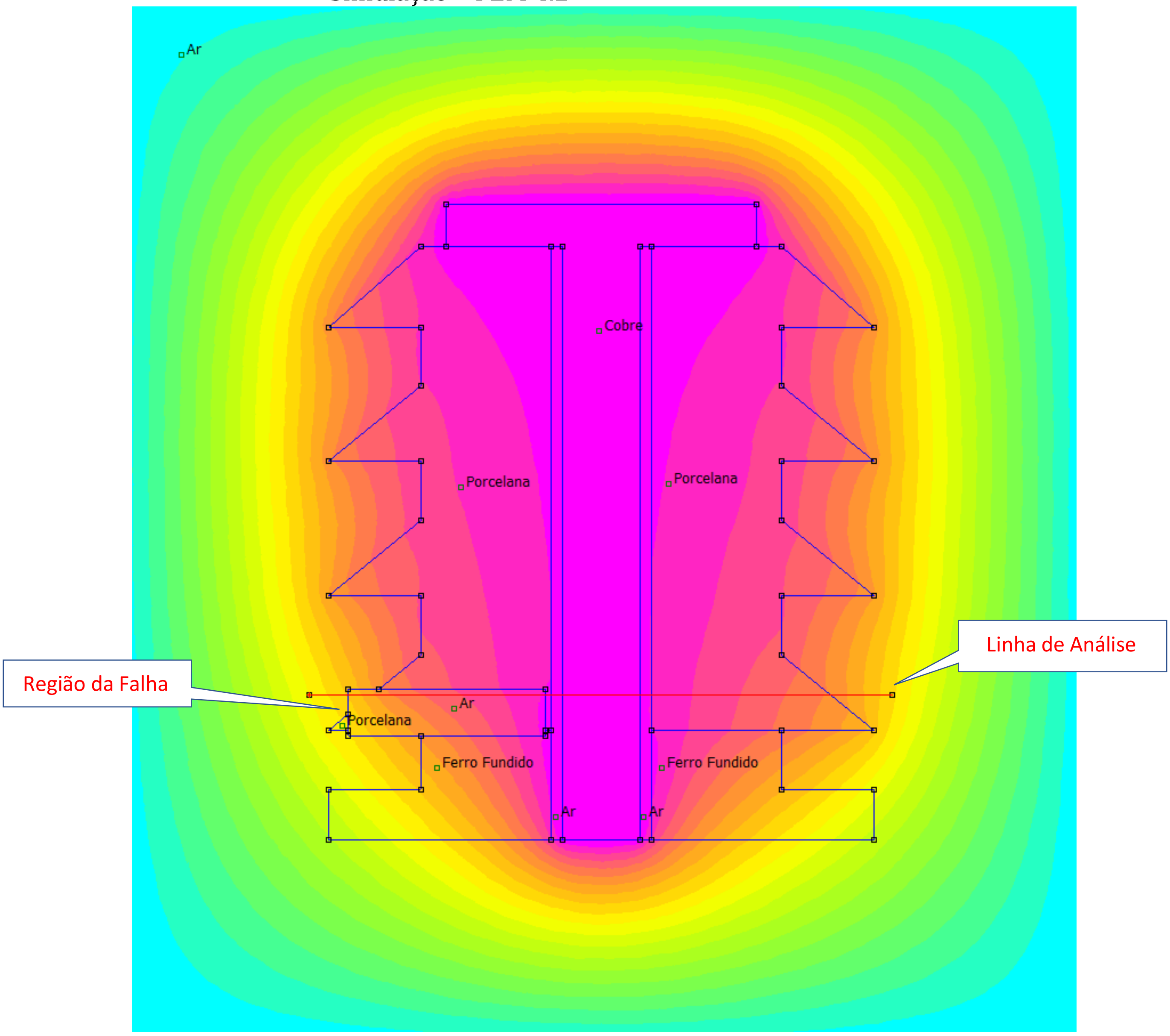
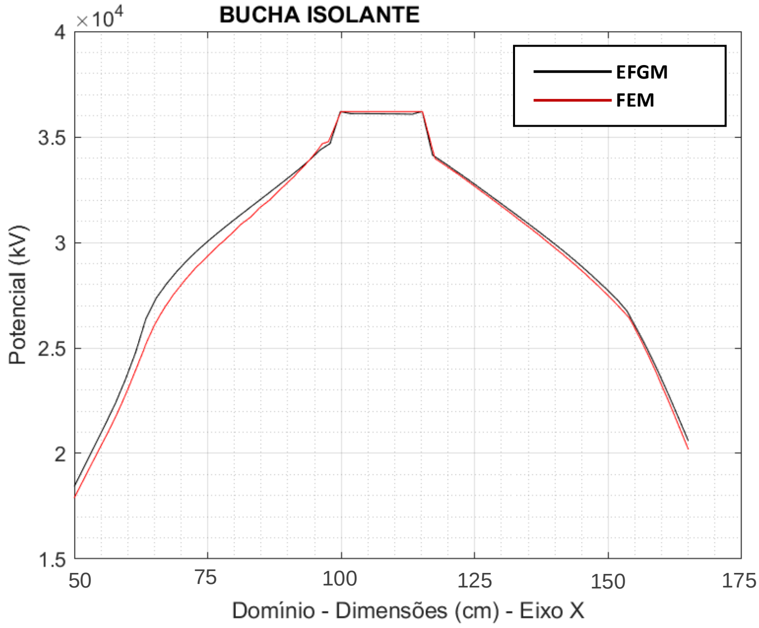


Figura 5.34 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

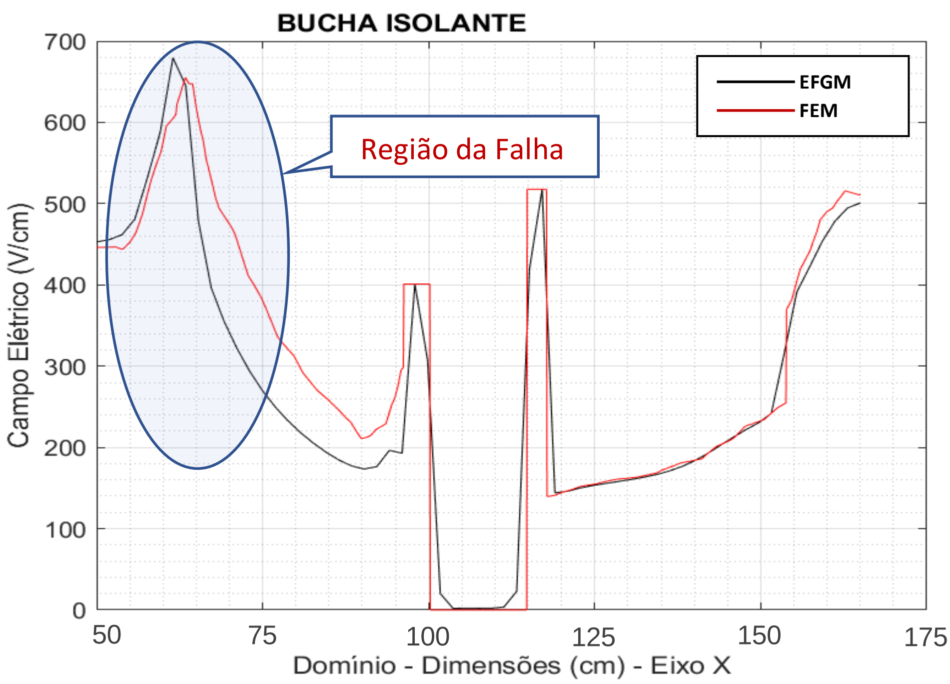
A figura 5.35, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,314 %

Figura 5.35 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.36, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,739 %

Figura 5.36 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

5.2.12 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NA PARTE INFERIOR

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal de impulso atmosférico pleno: 200.0 kV (crista)**.

A figura 5.37, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

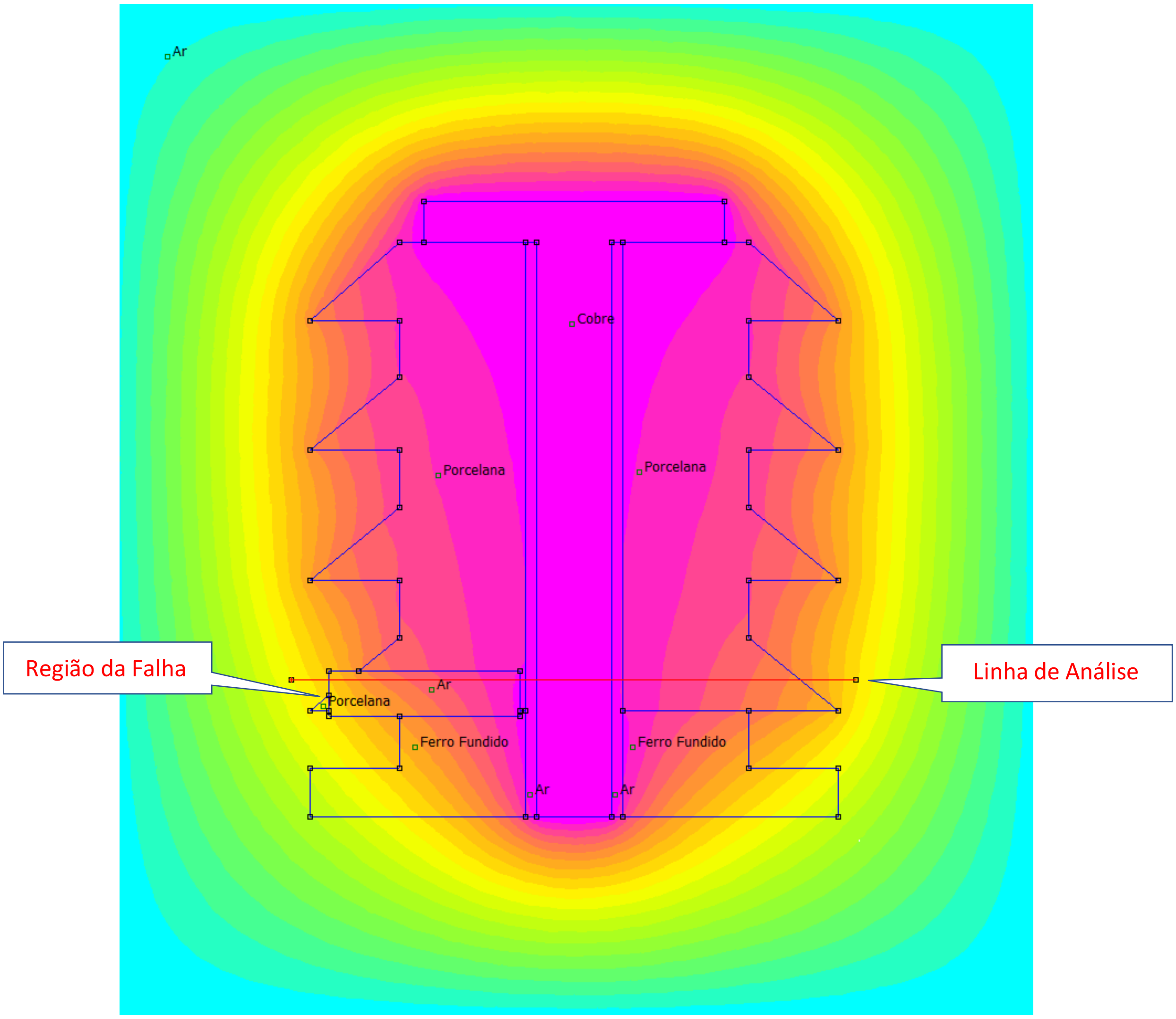
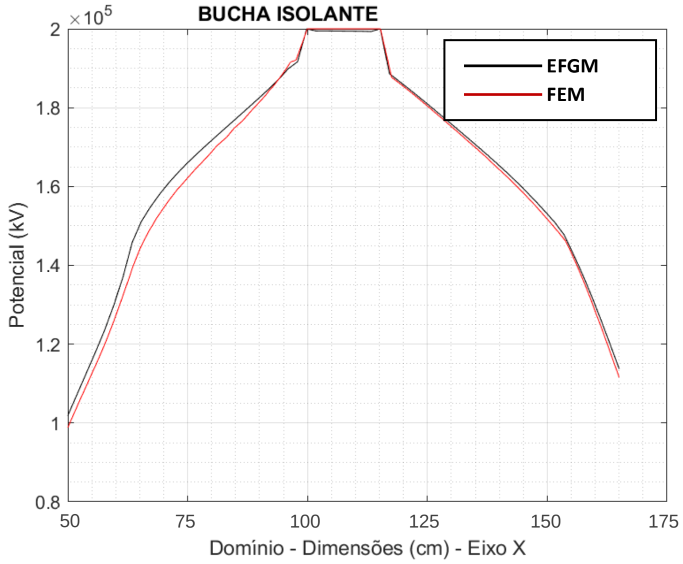


Figura 5.37 –Simulação no FEM 4.2 – 200.00kV

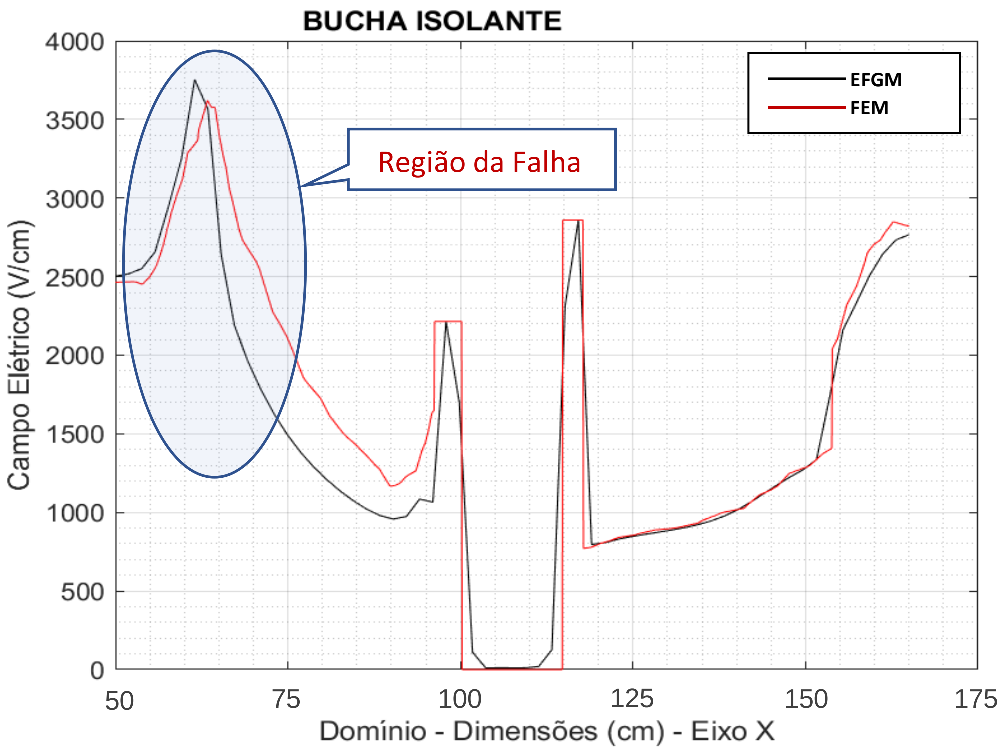
A figura 5.38, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,474 %

Figura 5.38 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

A figura 5.39, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,959 %

Figura 5.39 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 200.00kV

5.2.13 Bucha isolante hipotética – COM FALHA NA PARTE INFERIOR

- Nesta simulação foi considerada a bucha isolante com a presença de falha, representando a condição de **Tensão suportável nominal à frequência industrial, de 70,0 kV (eficaz)**.

A figura 5.40, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

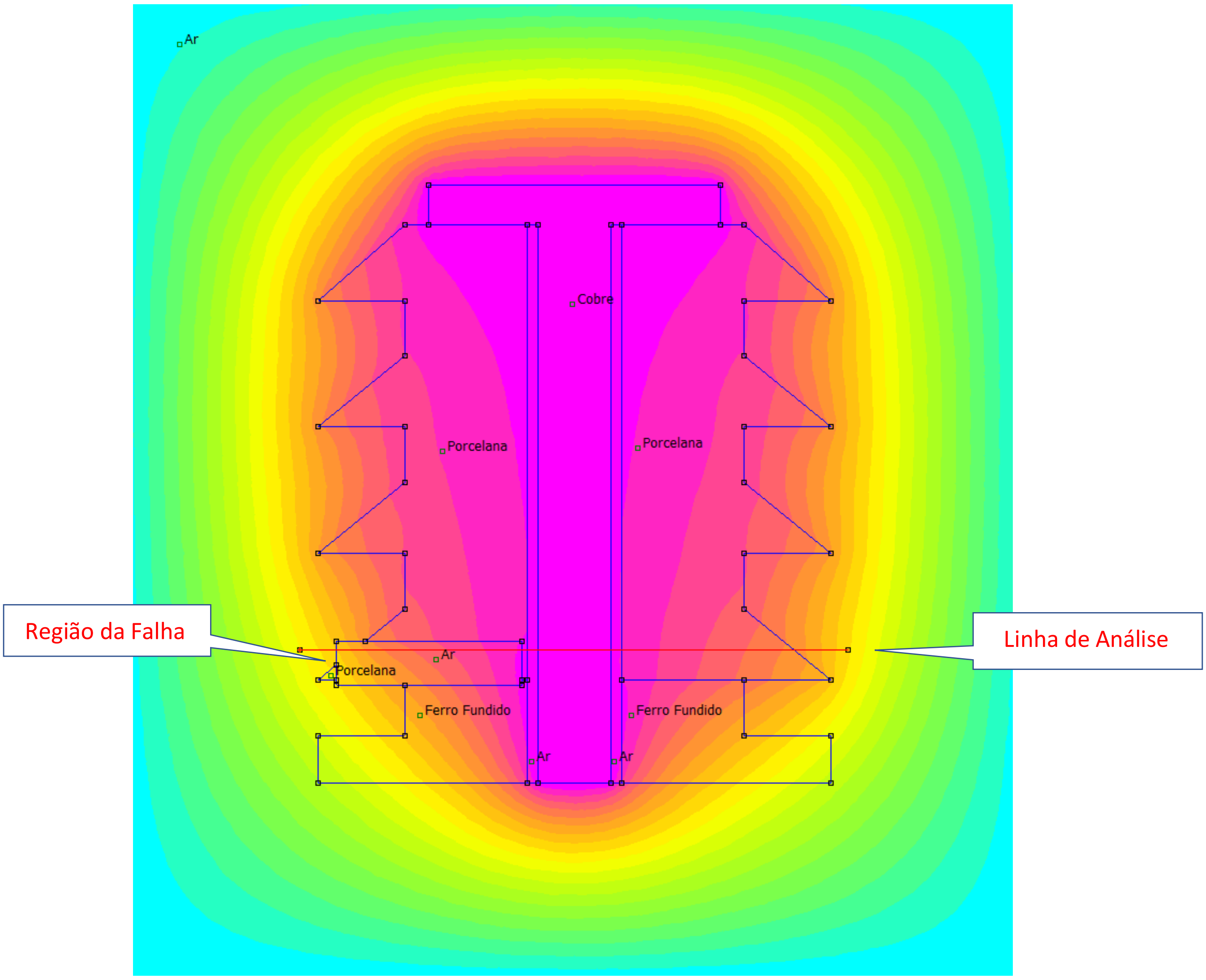
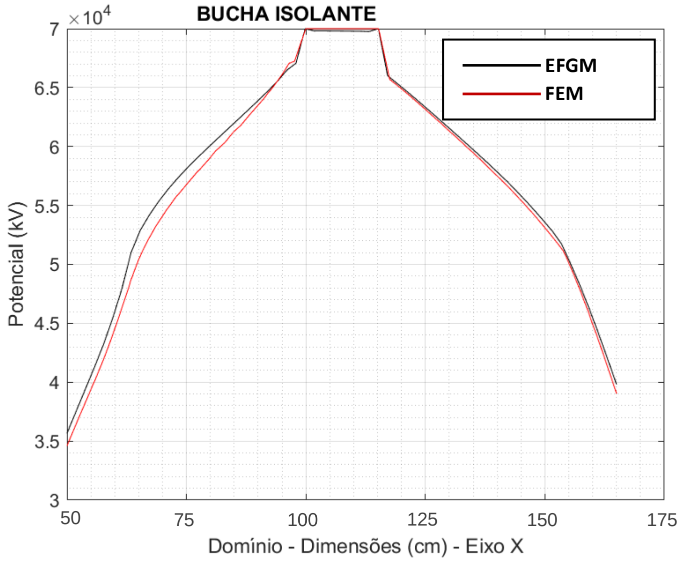


Figura 5.40 –Simulação no FEM 4.2 – 70.00kV

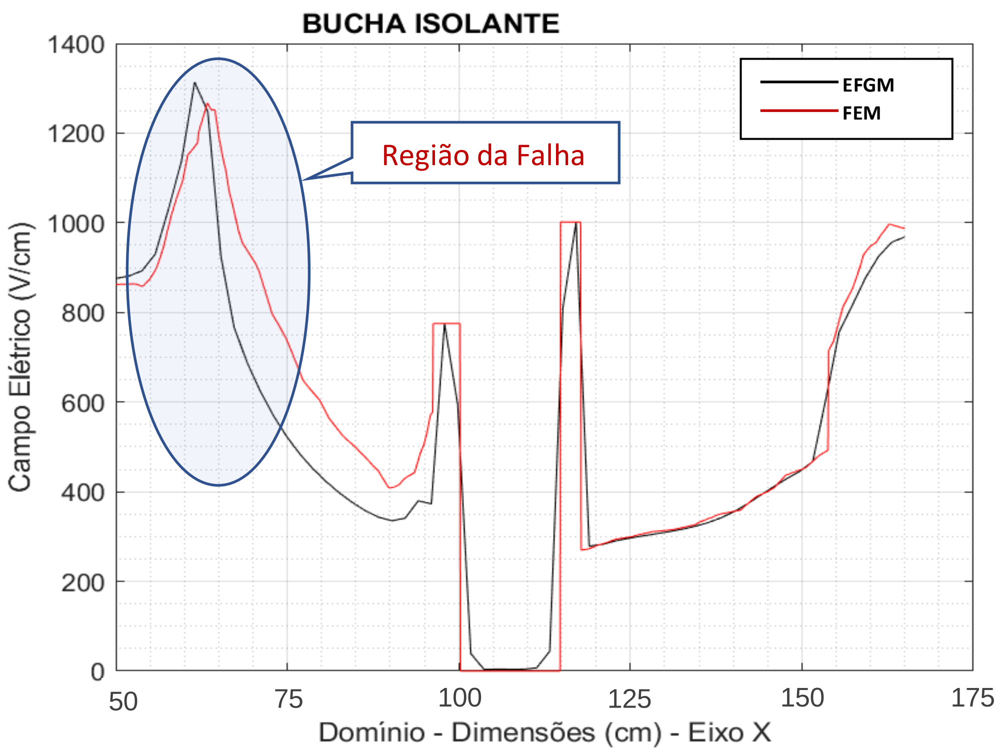
A figura 5.41, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,406 %

Figura 5.41 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

A figura 5.42, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
5,898 %

Figura 5.42 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 70.00kV

5.2.14 Outras Simulações

- Nesta parte são apresentadas simulações relacionadas a outros possíveis posicionamentos de regiões de falha sobre a bucha isolante, realizadas na tensão nominal.

- Com o objetivo de observar novas comprovações da existência de padrões de comportamento do potencial elétrico e do campo elétrico sobre a bucha isolante, diante a presença de falhas.

- Estas simulações são consideradas críticas, por estarem afetando a parte condutora da bucha isolante, mesmo assim, apresentaram o padrão de comportamento do potencial elétrico e campo elétrico similar aos estudos apresentados acima.

5.2.14.1 Falha envolvendo a parte condutora da bucha isolante Região da falha e Linha de Análise na Parte Superior da Bucha

A figura 5.43, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

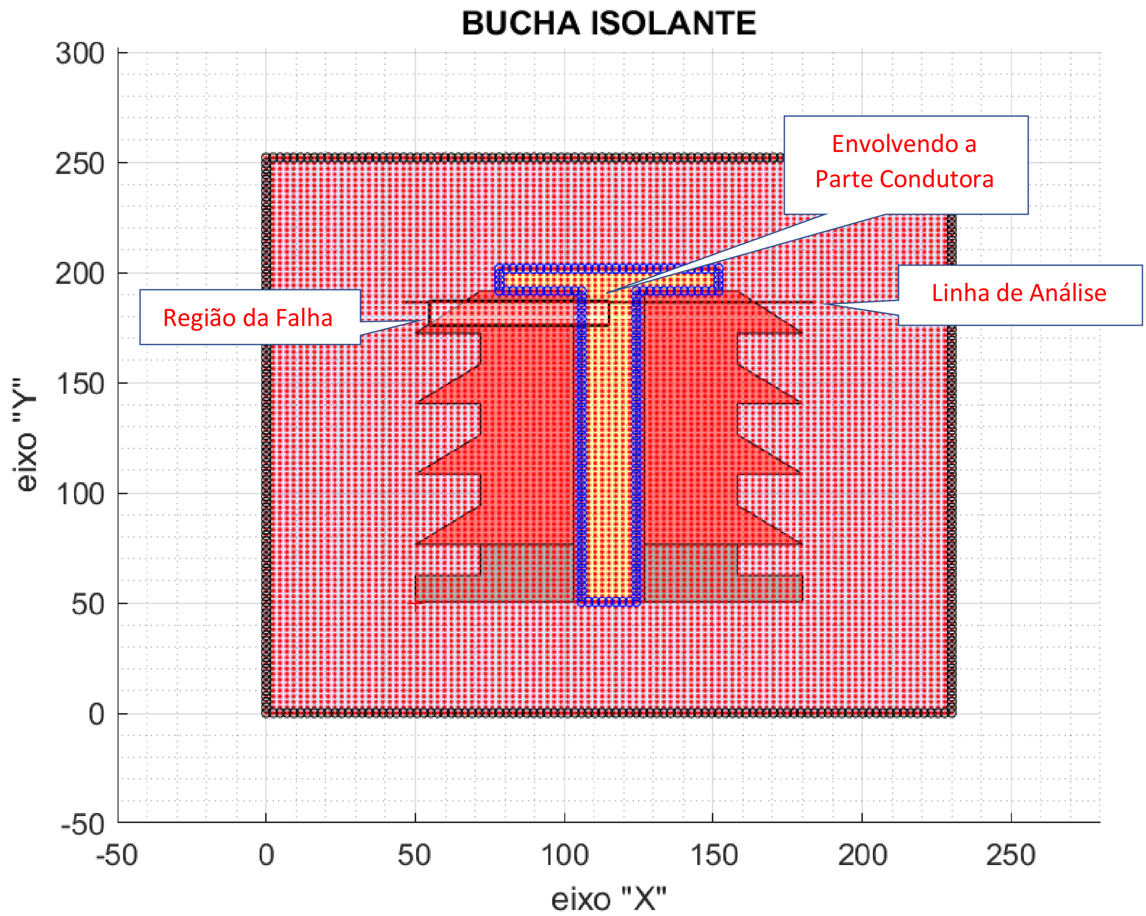


Figura 5.43 – Bucha Isolante Com Falha Superior e Distribuição dos Nós

A figura 5.44, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

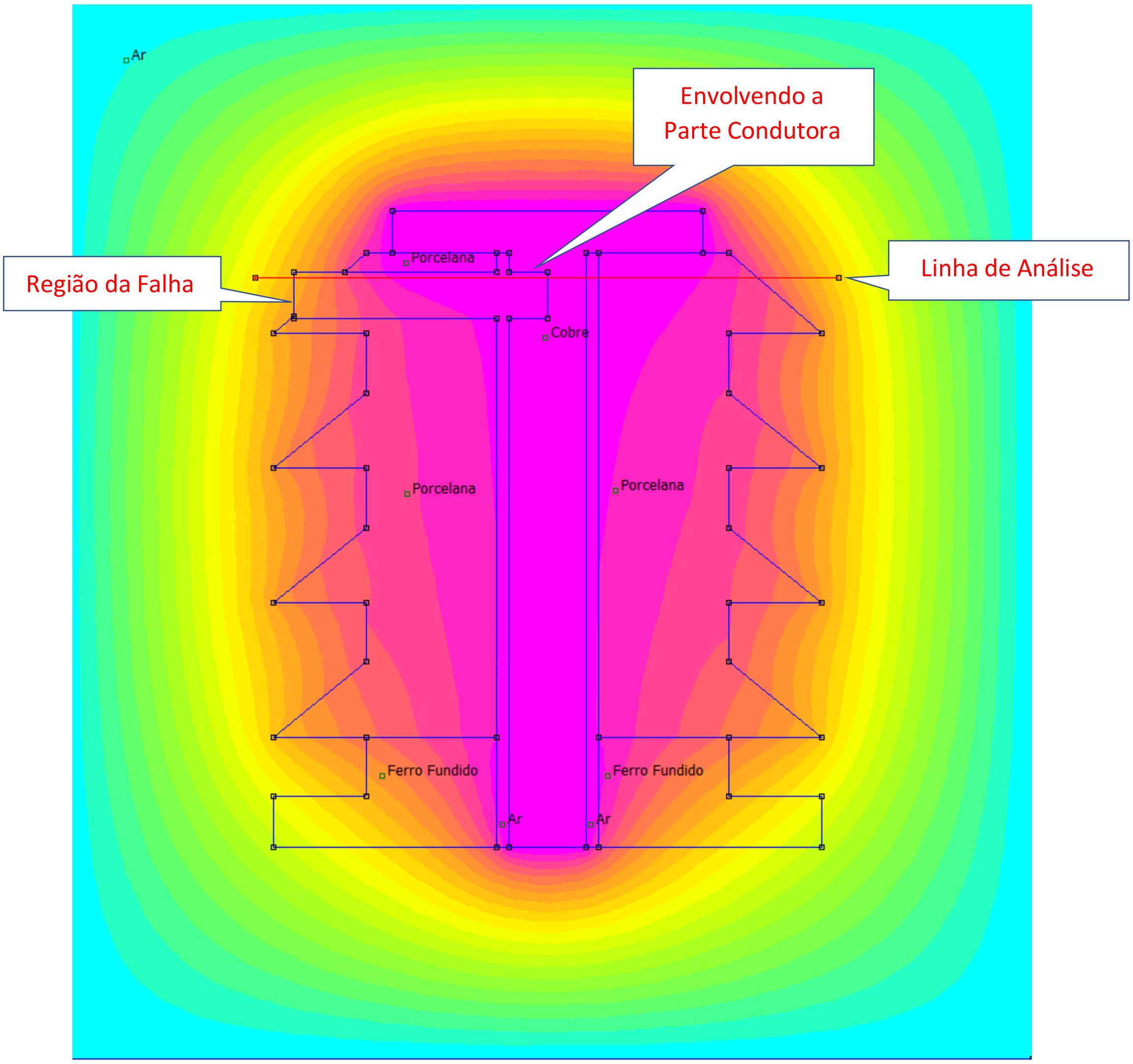
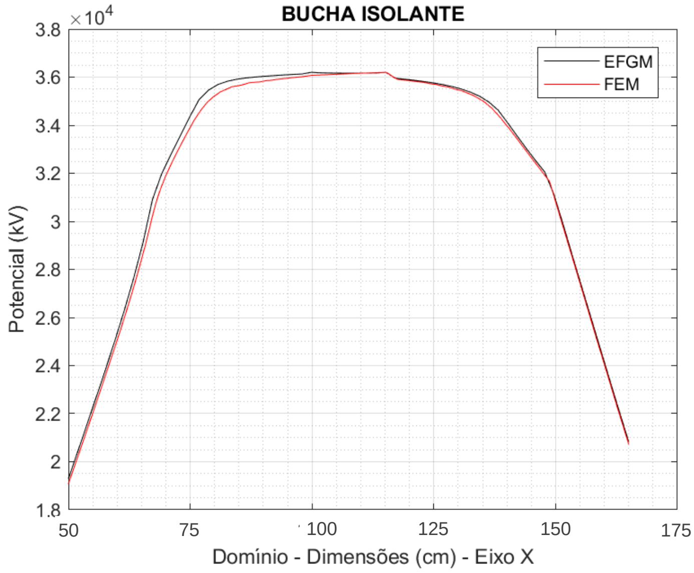


Figura 5.44 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

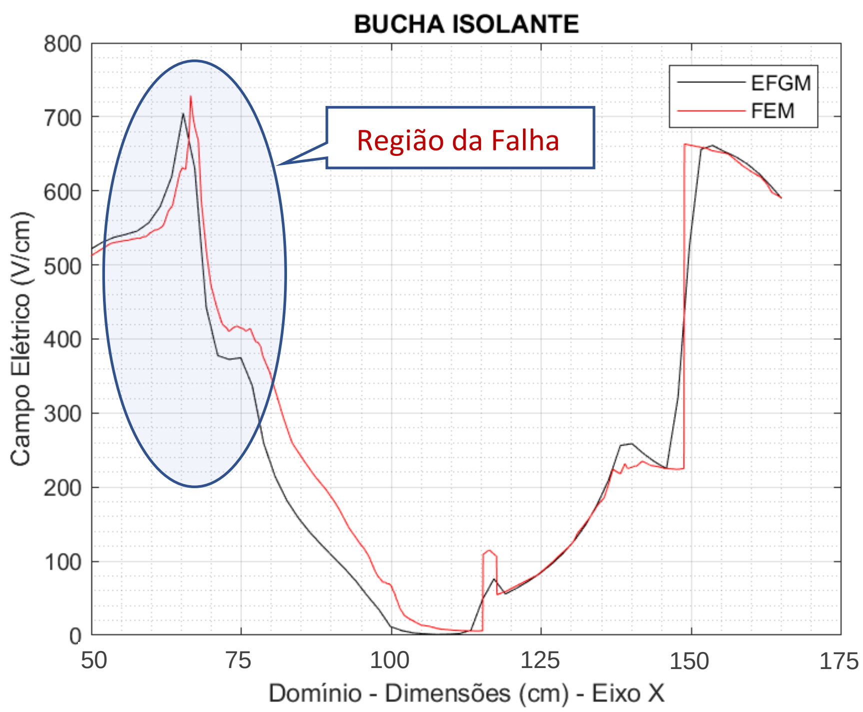
A figura 5.45, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,391 %

Figura 5.45 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.46, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,020 %

Figura 5.46 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

5.2.14.2 Falha envolvendo a parte condutora da bucha isolante Região da falha e Linha de Análise no Meio da Bucha

A figura 5.47, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

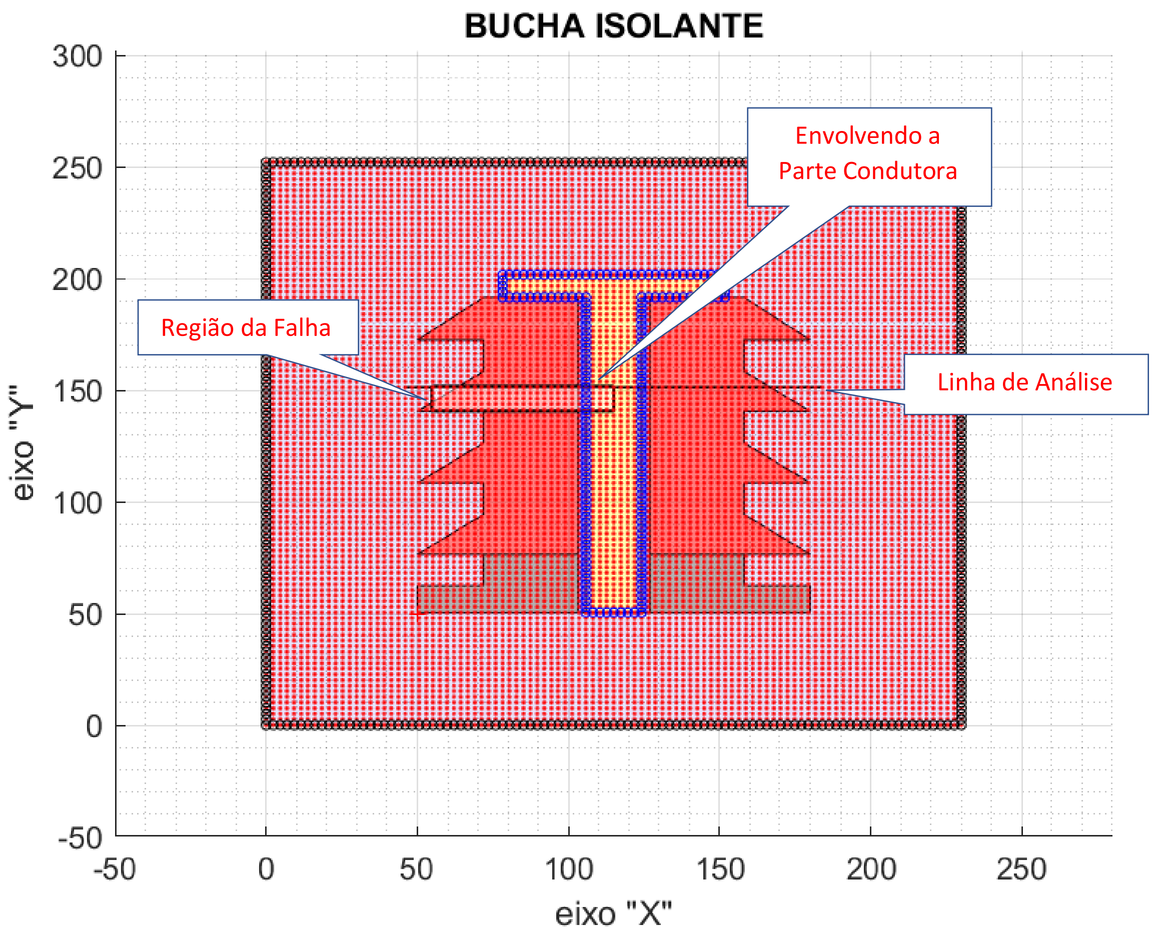


Figura 5.47 – Bucha Isolante Com Falha no Meio e Distribuição dos Nós

A figura 5.48, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

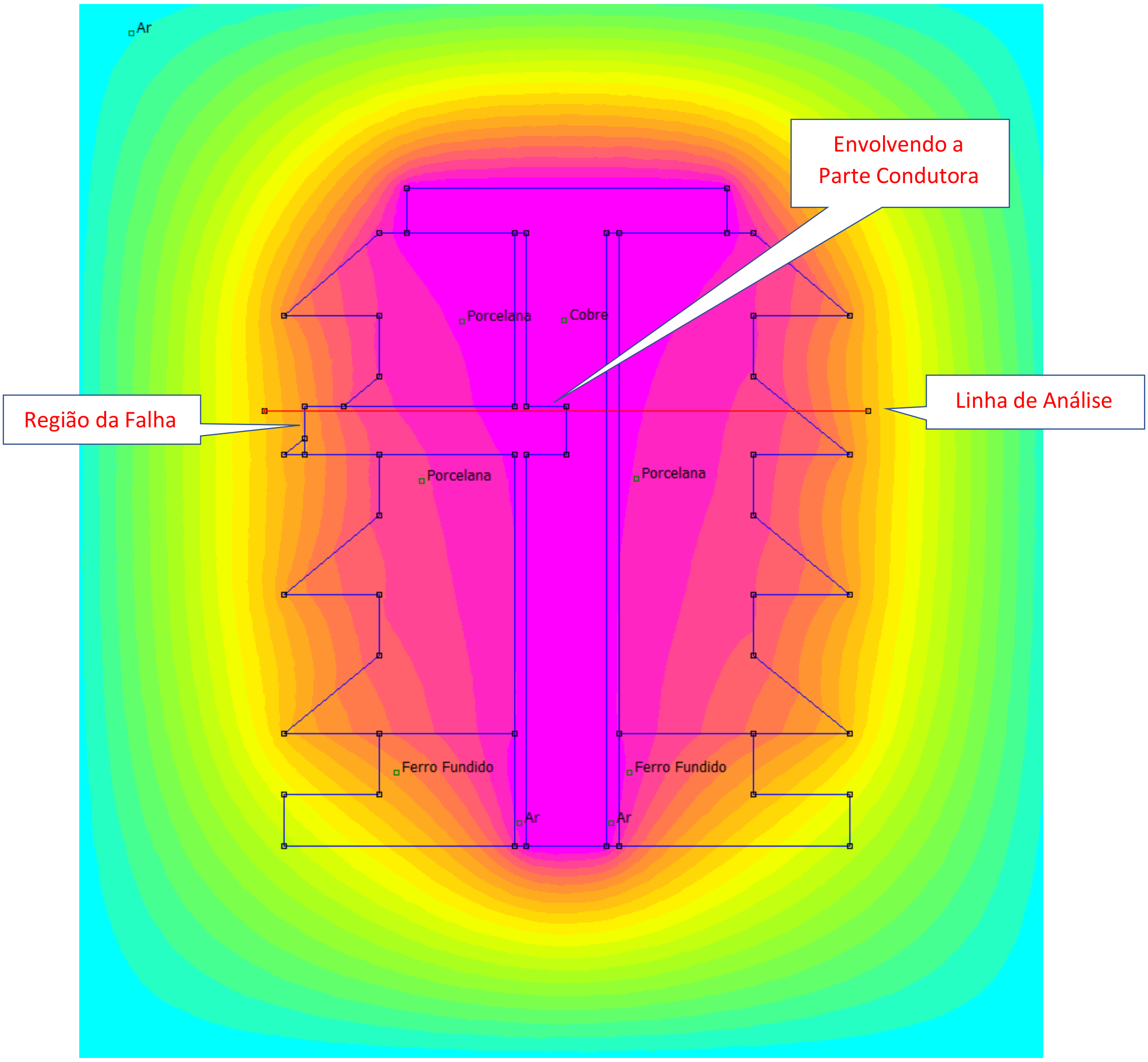
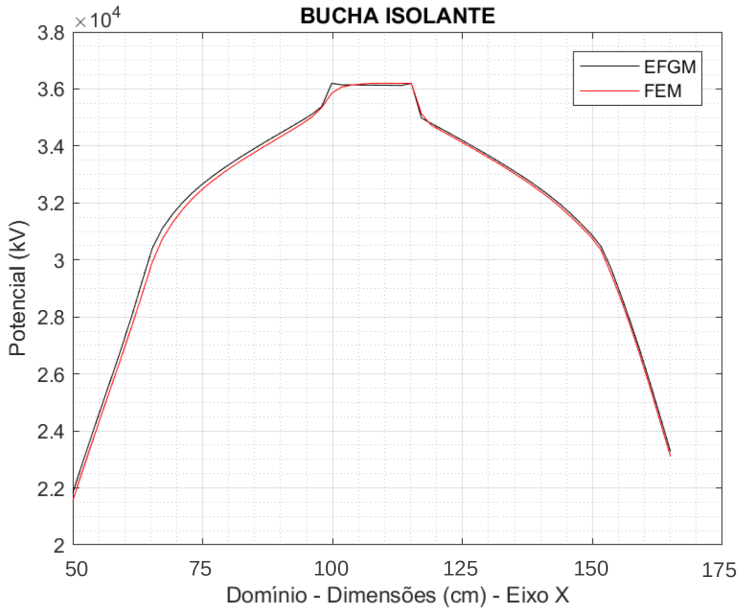


Figura 5.48 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

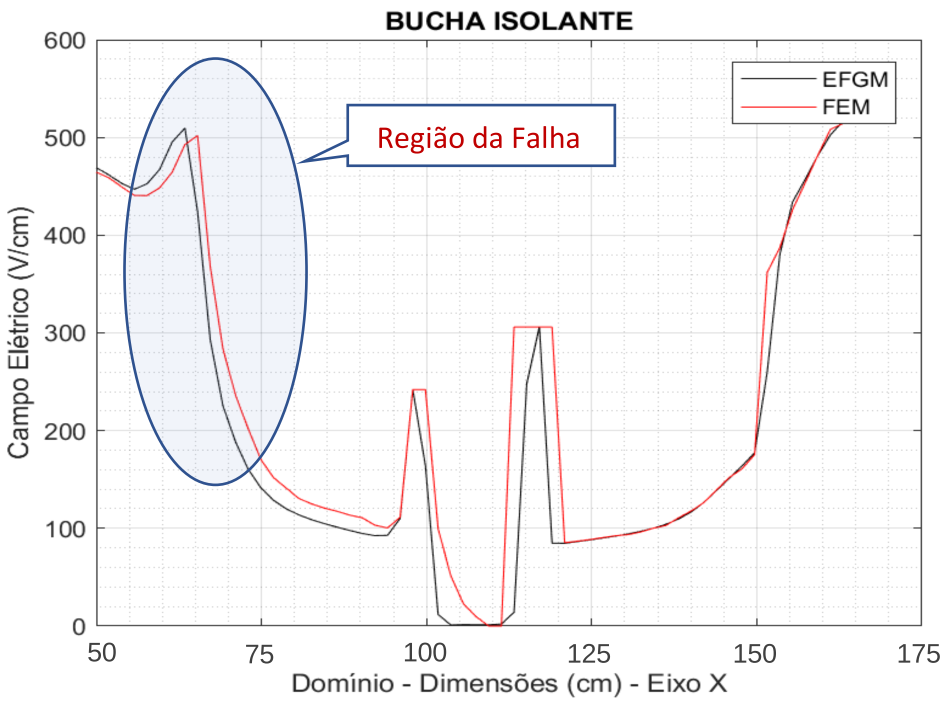
A figura 5.49, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,560 %

Figura 5.49 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.50, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
4,012 %

Figura 5.50 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

5.2.14.3 Falha envolvendo a parte condutora da bucha isolante Região da falha e Linha de Análise na Parte Inferior da Bucha

A figura 5.51, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos sem malha (EFGM).

- Simulação – EFGM

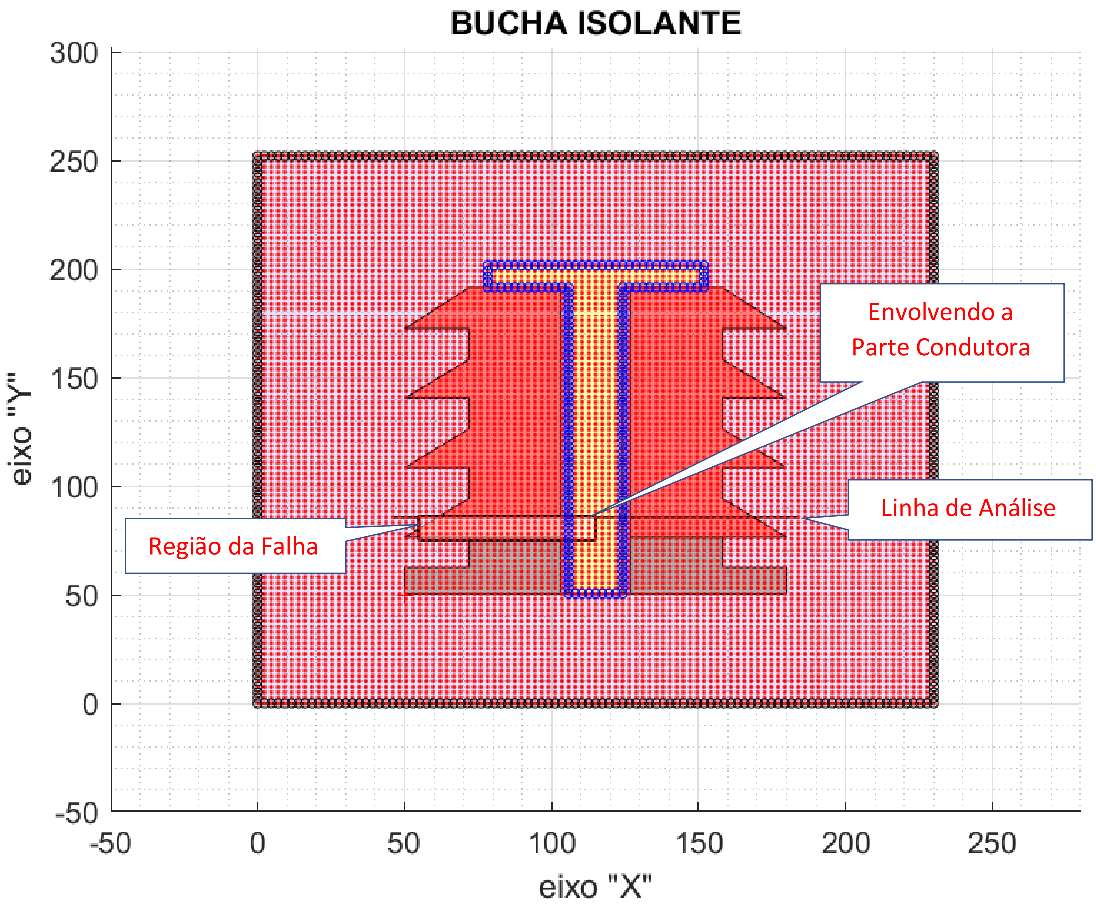


Figura 5.51 – Bucha Isolante Com Falha Inferior e Distribuição dos Nós

A figura 5.52, abaixo, mostra a simulação da geometria da bucha, o domínio do problema e a identificação da região da falha, pelo método de elementos finitos com malha (FEM), usando o aplicativo FEM 4.2.

- Simulação – FEM 4.2

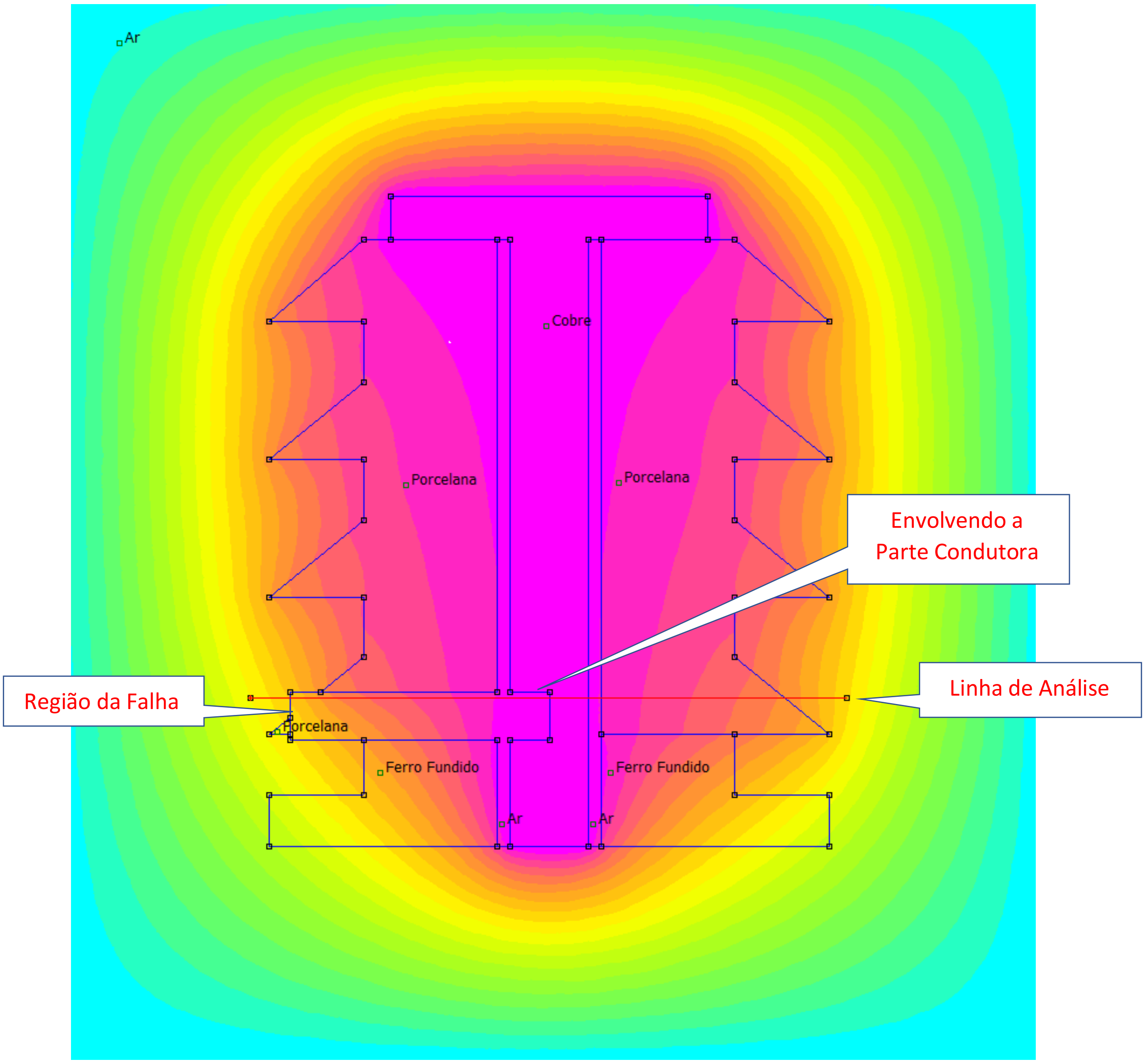
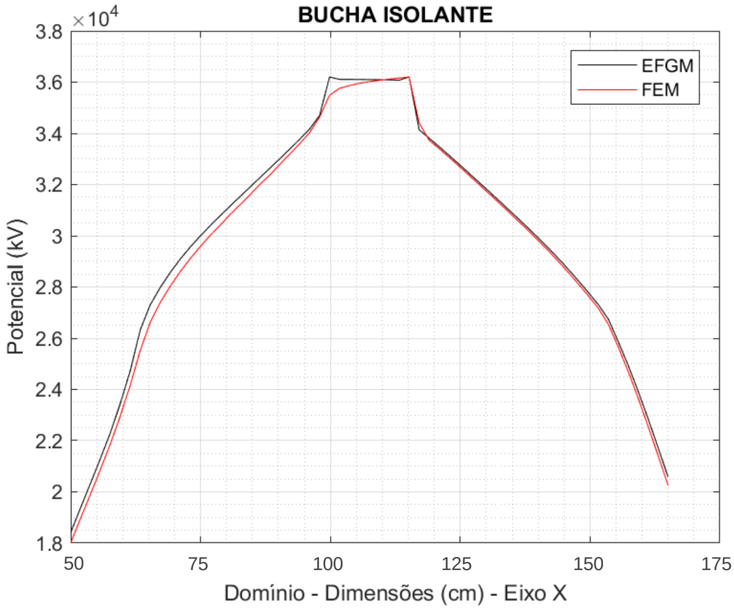


Figura 5.52 –Simulação no FEM 4.2 – 36.2kV

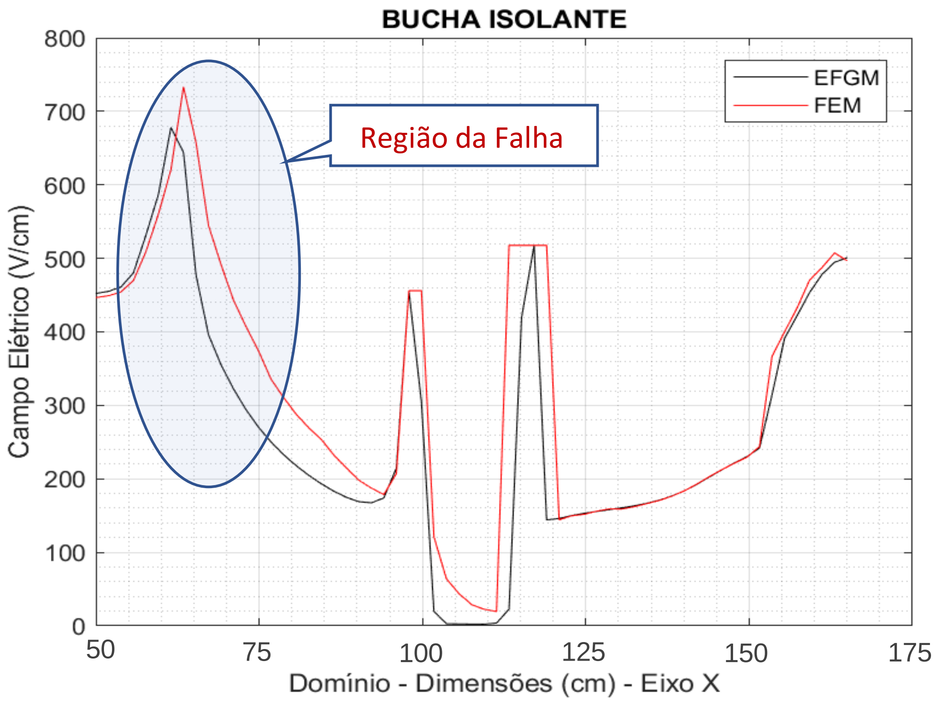
A figura 5.53, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do potencial elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
0,539 %

Figura 5.53 –Potencial EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

A figura 5.54, abaixo, apresenta o comparativo entre os métodos FEM e EFGM, para a distribuição do campo elétrico, na parte isolante da bucha.



Comparativo Percentual Médio (FEM x EFGM)
5,837 %

Figura 5.54 –Campo Elétrico EFGM x FEM 4.2 – 36.2kV

6 | Conclusão

6.1 Considerações Gerais

A proposta apresentada objetivou a implementação de um método sem malha aplicado a buchas isolantes de alta tensão hipotética, para análise da distribuição de campos elétricos e potenciais sobre a parte isolante

Através do Element-Free Galerkin Method, foi aplicado uma forma fraca global, evitando-se com isso uma série de implicações encontradas em métodos sem malha que fazem uso de domínio local, permitindo solucionar problemas que seriam complexos através da forma forte.

A aplicação da técnica sem malha em buchas isolantes de alta tensão é uma ferramenta adequada e promissora, por não haver necessidade da geração de malhas como no Elementos Finitos, possibilitando assim uma maior flexibilidade para tratar problemas de geometrias complexas. Já em contra partida o meshless possui uma complexidade envolvida na construção das funções de forma.

A aplicação do IMLS permitiu a imposição das condições de contorno essenciais no EFGM da mesma forma como é feito no Método de Elementos Finitos.

O EFGM é um método ainda em estágio relativamente inicial quando comparados a outros métodos já consolidados, e devido a este fato, os resultados encontrados não foram de fácil obtenção e muitas simulações foram necessárias até a validação do programa, porém a metodologia obteve resultados dentro de limites satisfatórios, através de uma forma simples e didática como descritos nos capítulos anteriores.

6.2 Estudos de Casos

Os estudos de casos, apresentados na parte 4, deste trabalho, gerou respostas significativas quanto a avaliação de buchas isolantes, como descrito abaixo:

1º Foi comprovado através de simulações, utilizando o aplicativo FEM 4.2, que o método EFGM está apropriado para a análise de potencial e campo elétrico nas buchas isolantes, apresentando respostas que foram similares e obtendo o mesmo comportamento, caracterizando um padrão de informações sobre a avaliação da bucha isolante.

2º Foi observado que os comportamentos dos campos elétricos são distintos para uma bucha isolante sem falha e uma bucha isolante com falha, permitindo assim, uma avaliação primária do estado da bucha isolante.

3º Foi visto que, na condição de falha, isto é, na existência de falhas na parte isolante, o comportamento do campo elétrico no corpo da bucha seguiu o mesmo padrão, para níveis de tensões e posicionamentos diferentes das falhas. Esta condição permite e capacita o método para a geração de futuros sensores, uma vez que, a forma padrão do comportamento é uma informação robusta da existência de uma falha.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros, sugere-se que:

- Aplicação no dimensionamento e cálculo de buchas isolantes de alta tensão, com base no desenvolvimento de simulações de campos elétricos, potenciais em condições físicas normais e com presença de falhas na parte isolante da bucha;

- Aplicação em sistemas de monitoramento contínuo de buchas isolantes, com a associação de termografia contínua, podendo-se obter a avaliação de uma falha em potencial da distribuição de campos elétricos e potenciais, diante a evolução de falhas na parte isolante da bucha, que podem ser descobertas em função de pontos quentes detectados pela termografia;

- Avaliação das condições de isolamento da bucha a medida que uma falha na parte isolante da bucha aumenta de tamanho, ou quando da alteração das propriedades do material isolante.

6.4 Artigo em evento e congresso

Com base neste trabalho, foi elaborado o artigo “SILVA, P.R.C; COPPOLI, E.H.R; “Estudo sobre os efeitos da perda de integridade física em buchas de transformadores de potência utilizando métodos sem malha”, e submetido e aprovado pelo comitê de análise do seminário MOMAG 2020 (submission 199).

Referências

SILVA, P.R.C; COPPOLI, E.H.R; Estudo sobre os efeitos da perda de integridade física em buchas de transformadores de potência utilizando métodos sem malha, submetido e aprovado pelo comitê de análise do seminário MOMAG 2020 (submission 199).

ATLURI, S. N.; ZHU, T. A new meshless local petrov-galerkin (mlpg) approach in computational mechanics. **Computational Mechanics**, v. 22., p. 117–127, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.

BABUSKA, J.; MELENK, J. M. The partition of unity method. **Technical Report TX 78712**, The University of Texas at Austin., 1996. Citado na página 7.

BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. 2nd. ed. Arizona: John Wiley & Sons, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 79.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI. **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**. New York, N. Y.: Marcel Dekker Inc., 2003. Citado 8 vezes nas páginas viii, 30, 34, 41, 42, 43, 53 e 54.

BELYTSCHKO, T.; GU, L. A new implementation of finite element-free galerkin methods. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston,USA, v. 113, p. 397–414, 1993. Citado na página 7.

BELYTSCHKO, T.; LU, Y. Y.; GU, L. Element-free galerkin methods. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston,USA, v. 37, p. 229–256, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 6, 7, 15 e 21.

BELYTSCHKO T., Y. K. D. O. M. F.; KRYSL, P. A meshless methods: An overview and recent developments. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, n. 139, p. 3–47, 1996. Citado na página 6.

BERNARD, P. A deterministic vortex sheet method for boundary layer flow. **Maryland**, s.n., p. 132–145, 1995. Citado na página 6.

BOTTAUSCIO, O.; CHIAMPI, M.; MANZIN, A. Eddy current problems in nonlinear media by the element-free galerkin method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 34, p. 823–825, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 23.

CARTENSEN, E. L. Magnetic fields and cancer. **IEEE Engineering in Medicine and Biology**, S.I., 1995. Citado na página 3.

CHEN, Q.; KONRAD, A. A review of finite element open boundary techniques for static and quasi-static electromagnetic field problems. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 33, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.

CHORIN, A. Numerical study of slightly viscous flow. j. of fluid mechanics. **Berkeley**, s.n., p. 785–796, 1973. Citado na página 6.

CINGOSKI, V.; MIYAMOTO, N.; H., Y. Element-free galerkin method for electromagnetic field computations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 34, p. 3236–3239, 1998. Citado na página 13.

CINGOSKI, V.; MIYAMOTO, N.; H., Y. Hybrid element-free galerkin - finite element method for electromagnetic field computations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 36, p. 1543–1547, 2000. Citado na página 13.

COPPOLI, E. H. **Modelagem de Dispositivos Eletromagnéticos Através de Métodos Sem Malhas**. Tese (Doutorado) — Laboratório Nacional de Computação Científica LNCC, Petrópolis, 2010. Citado 15 vezes nas páginas viii, 5, 9, 15, 17, 19, 20, 21, 22, 28, 29, 31, 32, 35 e 37.

COPPOLI, E. H.; ALÍPIO, R.; RIBEIRO, G.; RESENDE, U.; AFONSO, M. The element-free galerkin method for transmission line field computation. **IX European Conference on Numerical Methods in Eletromagnetics - NUMELEC 2017**, 2017. Citado na página 13.

CORDES, L. W.; MORAN, B. Treatment of material discontinuity in the element free galerkin method. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, Evanston, v. 139, p. 75—89, 1996. Citado na página 7.

DOLBOW, J.; BELYTSCHKO, T. An introduction to programming the meshless element free galerkin method. **Archives of Computational Methods in Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston,USA, v. 5; 3, p. 207–241, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 18.

FELLOW, P. S. M.; TURGEON, A.; GOULET, D. L. Study of population exposure to magnetic fields due to secondy utilization of transmission line corridors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, 1995. Citado na página 7.

FRASER, R. A.; JONES, W. P.; W., S. S. Approximations to functions and to the solutions of differential equations. **ISBN.**, s.n., p. 1799, 1934. Citado na página 6.

GINGOLD, R.; MONAGHAN, J. Smooth particle hydrodynamics: theory and applications to non spherical stars. **Cambridge**, v. 181, p. 375–379, 1977. Citado na página 6.

GIRAULT, V. Theory of a gdm on irregular networks. **S. I.**, s.n., p. 260–262, 1974. Citado na página 6.

HAVAS, M. Biological effects of low frequency electromagnetic fields. **Electromagnetic Environments and Health in Buildings. Spon Press**, S.I., p. 535, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.

ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz to 100 khz). **Health physics**, v. 74, p. 494–522, 1998. Citado 3 vezes nas páginas 3, 60 e 65.

ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 hz to 100 khz). **Health physics**, LWW, v. 99, n. 6, p. 818–836, 2010. Citado na página 3.

IEC.61786. Mensurement of low-frequency magnetic and eletric fields with regard to exposure of human beings - special requirements for instruments and guidance for measurement. **IEC**, S.I., p. s.n., 1998. Citado na página 3.

IEEE-STD.644-1994. Standart procedures for measurement of power frequency eletric and magnetic fields from ac power lines. **IEEE**, v. 74, 1994. Citado na página 3.

ISMAIL, H. Effect of oil pipelines existing in an hvtl corridor on the electric field distribution. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, p. 2466—2472, 2007. Citado na página 8.

JIN, J. **The Finite element Method in Electromagnetics**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 28.

KROK, J.; ORKISZ, J. A unified approach to the fe generalized variational fd method for nonlinear mechanics. **Springer-Verlag**, s.n., p. 353–362, 1989. Citado na página 6.

LANCASTER, P.; SALKAUSKAS, K. Surfaces generated by moving least squares methods. **Mathematics of Computation,**, v. 37., p. 141–158, 1981. Citado na página 17.

LANCZOS, C. Trigonometric interpolation of empirical and anlytical functions. **Math. Phys**, v. 17, p. 123–199, 1938. Citado na página 6.

LISZKA, T.; ORKISZ, J. Finite difference methods of arbitrary irregular meshes in non-linear problems of applied mechanics. **Poland**, S. I., p. 123–199, 1977. Citado na página 6.

LIU, G. R. **Mesh Free Methods**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2003. Citado 7 vezes nas páginas viii, 14, 18, 20, 21, 22 e 23.

LIU, G. R.; GU, Y. T. A local radial point interpolation method (lr-pim) for free vibration analyses of 2-d solids. **S.I.**, v. 246, p. 29–46, 2001. Citado na página 7.

LIU, G. R.; GU, Y. T. **A truly meshless method based on the strong-weak form**. [S.l.: s.n.], 2002. 259–261 p. Citado na página 7.

LIU, G. R.; GU, Y. T. An introduction to meshfree methods and their programming. **S.I.**, 2005. Citado 3 vezes nas páginas 14, 18 e 21.

LIU, W. K.; JUN, S.; F, Z. Y. Reproducing kernel particle methods. international journal for numerical methods in fluids. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Technological Institute, Northwestern University, Evanston,USA, S.I., p. 1081–1106, 1995. Citado na página 6.

MACEDO, A. **Eletromagnestimo**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1988. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 79.

MAISURADZE, G. G.; THOMPSON, D. L. Interpolating moving least squares methods for fitting potential energy surfaces: Illustrative approaches and applications. **J. Phys. Chem**, v. 1, p. 7118–7124, 2003. Citado na página 18.

MARECHAL, Y.; COULOMB J. L.; MEUNIER, G. T. G. Use of diffuse element method for electromagnetic field computation. In: **In Digest of Fifth Biennial IEEE Conference**. [S.l.]: IEEE, 1992. Citado na página 13.

MARINHO, M. R. **Uma Contribuição ao Estudo do Ajuste Ótimo de Par âmetros para Cálculo de Campos Eletromagnéticos Descontínuos com o EFG**. Dissertação (Mestrado) — UNESP, São José do Rio Preto, 2012. Citado 2 vezes nas páginas viii e 18.

MESQUITA, R. **Calculo de campos de campos eletromagneticos tridimensionais utilizando elementos finitos: Magnetostatica, Quase-estatica e Aquecimento Indutivo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1990. Citado na página 31.

MONAGHAN, J. J. Smoothed particle hydrodynamics. **Monash University, Australia**, p. 543–574, 1992. Citado na página 6.

MONAGHAN, J. J.; LATTANZIO, J. C. A refined particle method for astrophysical problems. **S. I.**, v. 149, p. 135–143, 1985. Citado na página 6.

MONTEIRO, G. S. C.; COPPOLI, E. H. R. Induced voltage on metallic structures near transmission line using the element-free galerkin method. **19TH Biennial IEEE Conference On Electromagnetic Field Computation - IEEE Transactions on Magnetics Review – CEFC 2020**, Pisa, Italy, 2020. Citado na página 66.

MUKHERJEE, Y. X. Boundary node method for potential problems. **S. I.**, v. 40, p. 797–815, 1997. Citado na página 7.

NAYROLES, B.; TOUZOT, G.; P, V. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements. **S. I.**, Springer-Verlag, v. 10, p. 307–318, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

NBR25415. Métodos de medição e níveis de referência para exposição de campos elétricos e magnéticos na frequência 50hz e 60hz. **NBR**, S.I., 2016. Citado na página 3.

NIEHS et al. Health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. **National Institute of Environmental Health Sciences, National Institutes of Health (NIEHS), North Carolina**, 1999. Citado na página 3.

OLSEN, R. G.; WONG, P. S. K. Characteristics of low frequency electric and magnetic fields in the vicinity of electric power lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 7, n. 4, p. 2046–2055, Oct 1992. ISSN 0885-8977. Citado na página 6.

OÑATE, E.; ZIENKIEWICZ, R. L.; TAYLOR, R. L.; SACCO, C. A stabilized finite point method for analysis of fluid mechanics problems. **International Center for Numerical Methods in Engineering**, Barcelona., 1995. Citado na página 7.

PAVLIN, V.; PERRONE, N. Finite difference energy rechniques for arbitrary meshs applied to linear plate problems. **Maryland**, p. 647–664, 1975. Citado na página 6.

REZENDE, U. C.; COPOLLI, E. H. D. R.; AFONSO, M. M. A meshless approach using efg interpolating moving least-squares method in 2-d eletromagnetic scattering analysis. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 51, p. 1–4, 2015. Citado na página 16.

ROSA, R. S. K. **Desenvolvimento do Método Híbrido IEFGM-MOM aplicado à solução do espalhamento Eletromagnético em duas dimensões**. Dissertação (Mestrado) — CEFET-MG, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 20.

SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo, vol. único**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul: Bookman, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 80.

SNELL, C.; VESEY, D. G. E. M. P. The application of a general ffdm to some boundary value problems. **S. I.**, v. 13, n. S.N., p. 547–552, 1981. Citado na página 6.

STEVENSON, W. D. J. **Elementos de Análise de sistemas de potência**. São Paulo: Editora McGraw Hill, 1986. Citado 2 vezes nas páginas viii e 48.

VERARDI, S. L. L.; MACHADO, J. M.; CARDOSO, J. R. The element free galerkin method applied to the study of fully developed magnetohydrodynamic duct flows. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 38, p. 941–944, 2002. Citado na página 14.

VIANA, S. **Estudo dos Métodos Sem Malhas na Resolução de Problemas Eletromagnéticos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 1998. Citado 7 vezes nas páginas viii, 5, 7, 8, 14, 28 e 31.

VIANA, S. A.; MESQUITA, R. C. Moving least square reproducing kernel method for electromagnetic field computation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 35, 1999. Citado na página 13.

WANG, J. G.; LIU, G. R. **Radial point interpolation method for elastoplastic problems.** [S.l.]: Proc. of the 1st Int. Conf. On Structural Stability and Dynamics, 2000. 703–708 p. Citado na página 7.

WERTHEIMER, N.; LEEPER, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. **American journal of epidemiology**, Oxford University Press, v. 109, n. 3, p. 273–284, 1979. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 8.

XUAN, L.; SHANKER, B.; ZENG, Z.; UDPA, L. Eelement-free galerkin method in pulsed eddy currents. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, v. 19, p. 463–466, 2004. Citado na página 13.

XUAN, L.; UDPA, L. Element free galerkin method for static and quasi-static electromagnetic field computation. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 40, p. 12–20, 2004. Citado na página 13.