

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES
- GTM**

**SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE ISOLAMENTOS EM EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO
SOB EFEITO DE CONTAMINANTES USUALMENTE DESCONSIDERADOS EM CÁLCULOS DE CAMPO
ELÉTRICO**

**CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA(1);ADRIANA DE CASTRO PASSOS MARTINS(2);FELIPE
TEODORO DE OLIVEIRA(1);ORSINO BORGES DE OLIVEIRA FILHO(1);ROBERTO COUCEIRO LOIS(2)
CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL(1);CEMIG GERACAO E TRANSMISSAO S.A(2)**

RESUMO

Diversos fatores podem influenciar o desempenho de um sistema isolante óleo-papel (OIP). Observa-se que a disrupção ocorre em limites inferiores à teoria, devido às alterações dos materiais ou presença de contaminantes. Outro aspecto é o cálculo ser realizado em modelos simplificados, sendo que, na prática, as solicitações impulsivas aumentam a severidade do problema. O objetivo deste trabalho é analisar os efeitos de contaminantes no desempenho elétrico dos isolantes, simulando condições típicas encontradas no campo. A metodologia consistiu no levantamento dos parâmetros físicos e a modelagem por elementos finitos para caracterizar uma estrutura de colunas isolantes, incluindo um modelo estocástico para representação dos contaminantes.

PALAVRAS-CHAVE

Simulação, papel isolante, método de elementos finitos, campo elétrico, contaminação

1 INTRODUÇÃO

Sistemas isolantes compostos de papel permeados por óleo (*oil impregnated paper* - OIP) estão entre os mais consagrados para equipamentos de alta tensão e possibilitam projetar e construir estes equipamentos com dimensões relativamente reduzidas e com alta confiabilidade. Idealmente ambos os meios, o OIP e o próprio óleo, devem ser homogêneos de forma a assegurar seu bom desempenho, possibilitando também a otimização de projetos devido a redução das incertezas. Na prática, diversos fatores podem contribuir para a alteração do papel ou do óleo, tais como: variações de temperatura e umidade, tolerâncias dimensionais e a presença de lacunas ou contaminantes sólidos, líquidos ou gasosos.

É usual o cálculo do campo elétrico em equipamentos de alta tensão, com uma representação dos dielétricos como sendo meios homogêneos, havendo solução analítica para as geometrias mais simples. Os cálculos na fase de projeto são feitos com a premissa de que o campo elétrico não pode superar o limite de disrupção em qualquer local do equipamento. Na prática observa-se que a disrupção ocorre em limites inferiores ao valor teórico, notadamente devido a estes fatores. Outro aspecto é o cálculo do campo elétrico ser realizado em modelos simplificados e com considerações simplificadoras, como em frequência fundamental, sendo que, na prática, há solicitações elétricas de forma impulsiva e sobretensões resultantes de interações entre equipamentos adjacentes e o sistema elétrico no qual estão inseridos.

2 O SISTEMA DE ISOLAMENTO OIP - PAPEL IMPREGNADO EM ÓLEO ISOLANTE

Os materiais dielétricos possuem uma resposta ao campo elétrico, mesmo sem produzirem corrente, denominada susceptibilidade dielétrica ou permissividade. Esta resposta varia com a frequência, intensidade do campo e outros fatores físico-químicos alheios, tais como a temperatura do meio. O papel é um exemplo de um isolante sólido, sendo usualmente impregnado com um fluido dielétrico. O papel do isolamento sólido é produzido a partir de madeira com celulose de fibra longa (*softwood*) pelo processo *kraft* sem branqueamento. A madeira é formada por lignina, celulose e hemicelulose. No processo de fabricação por polpagem da madeira a lignina e a hemicelulose são removidas, principalmente a lignina, que é um material polar.

O sistema de isolamento OIP, onde o papel isolante e demais partes moldadas e calandradas, com matéria prima fabricada pelo processo *kraft*, e possuindo como líquido impregnante o óleo mineral isolante é o mais largamente

utilizado em equipamentos elétricos em todos os segmentos, tendo aplicações clássicas em transformadores, reatores e buchas.

3 INVESTIGAÇÃO DA PRESENÇA DE CONTAMINANTES EM MATERIAIS DIELÉTRICOS

O sistema de isolamento OIP é um dos mais utilizados por permitir permissividades da ordem de 3 [1]. Em função disto, todas as medidas para evitar fontes de contaminação deste sistema são tomadas antes da entrada dos equipamentos em operação: na manufatura dos materiais isolantes, transporte, manuseio na fabricação e montagem dos equipamentos no campo. Os projetos dos equipamentos elétricos geralmente possuem margens de segurança, definidas por cada fabricante, considerando a aplicação de cada equipamento e a necessidade de que operem confiavelmente durante sua expectativa de vida útil. No entanto, na ocorrência de determinados modos de falha em equipamentos elétricos, a investigação da possibilidade de presença de contaminantes nos sistemas de isolamento é uma variável a ser considerada.

A investigação da presença de contaminantes deste trabalho partiu das seguintes premissas:

- Óleo mineral isolante em condições normais no que diz respeito às suas propriedades dielétricas e físico-químicas;
- Sistema de isolamento sólido do tipo OIP com o papel isolante em condição de pouco uso, sem envelhecimento significativo por quebra das cadeias de celulose pela determinação do GP (Grau de Polimerização do Papel Isolante) [2];
- Equipamento de geometria coaxial: bucha de transformadores de alta tensão.

Nas análises e avaliações normalmente realizadas sobre a condição dos isolamentos sólido e líquido em investigação de falhas de equipamentos, nenhuma alteração relevante teria sido encontrada.

A sequência proposta foi:

- Avaliação visual e preparação da amostra;
- Microscopia Ótica, por luz transmitida e luz refletida;
- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando-se imagens de elétrons retroespalhados para visualização de possíveis contrastes químicos, acoplado à Espectrometria de Raios X por Dispersão de Energia (EDS) para identificação da composição química dos materiais, caso detectados.

Todas as amostras do papel foram desimpregnadas do óleo mineral isolante, utilizando-se clorofórmio em condensador antes das análises.

A Figura 1 apresenta as imagens obtidas em um papel isolante de referência, sem uso, com GP em torno de 1200. Nada foi observado de anormal na inspeção visual deste papel

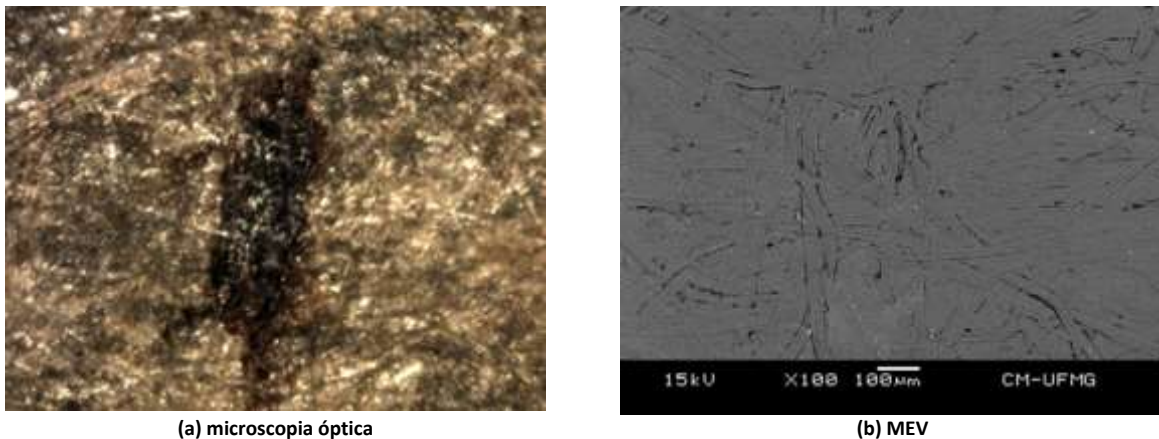


Figura 1 - Imagens da primeira amostra

A imagem 1(a) apresenta o aspecto da amostra por microscopia ótica, em luz transmitida, onde foi detectada uma área escurecida. Observa-se, no entanto, que há ainda passagem de luz por esta área. A realização de MEV, imagem de elétrons retro espalhados, apresentada em 1(b), no entanto, não revelou nenhum contraste químico. Conclui-se que a área escurecida possui a mesma composição química da matriz, ou seja, papel de celulose. Mesmo com uma imagem de elétrons retroespalhados é possível notar que a região escurecida é perfeitamente integrada a toda amostra, sob a forma de fibras de celulose. A diferença de coloração deve-se, provavelmente, à presença de uma área com uma variação de cor micrométrica na polpagem do papel.

Dezenas de medições com a mesma sequência foram realizadas em outras amostras de papel de referência, em amostras de papel retiradas de equipamentos que nunca haviam operado, de equipamentos que estavam em operação (amostras testemunha), sendo obtidos invariavelmente os mesmos resultados. Estas análises corroboram a premissa de que a presença de contaminantes de qualquer natureza no papel isolante de equipamentos elétricos

é, de fato, um evento incomum e não esperado e que os controles empregados geralmente são eficientes para evitar esta ocorrência.

A Figura 2 apresenta o aspecto visual de uma amostra de papel obtida a partir de um equipamento que se encontrava há dois anos em operação. Foram observadas, visualmente, pequenas manchas escurecidas em diversas amostras de papel retiradas deste equipamento.



Figura 2 - Amostra de papel coletada de equipamento de geometria coaxial

Nesta amostra, procedeu-se a avaliação por Microscopia Óptica e MEV, conforme Figura 3.

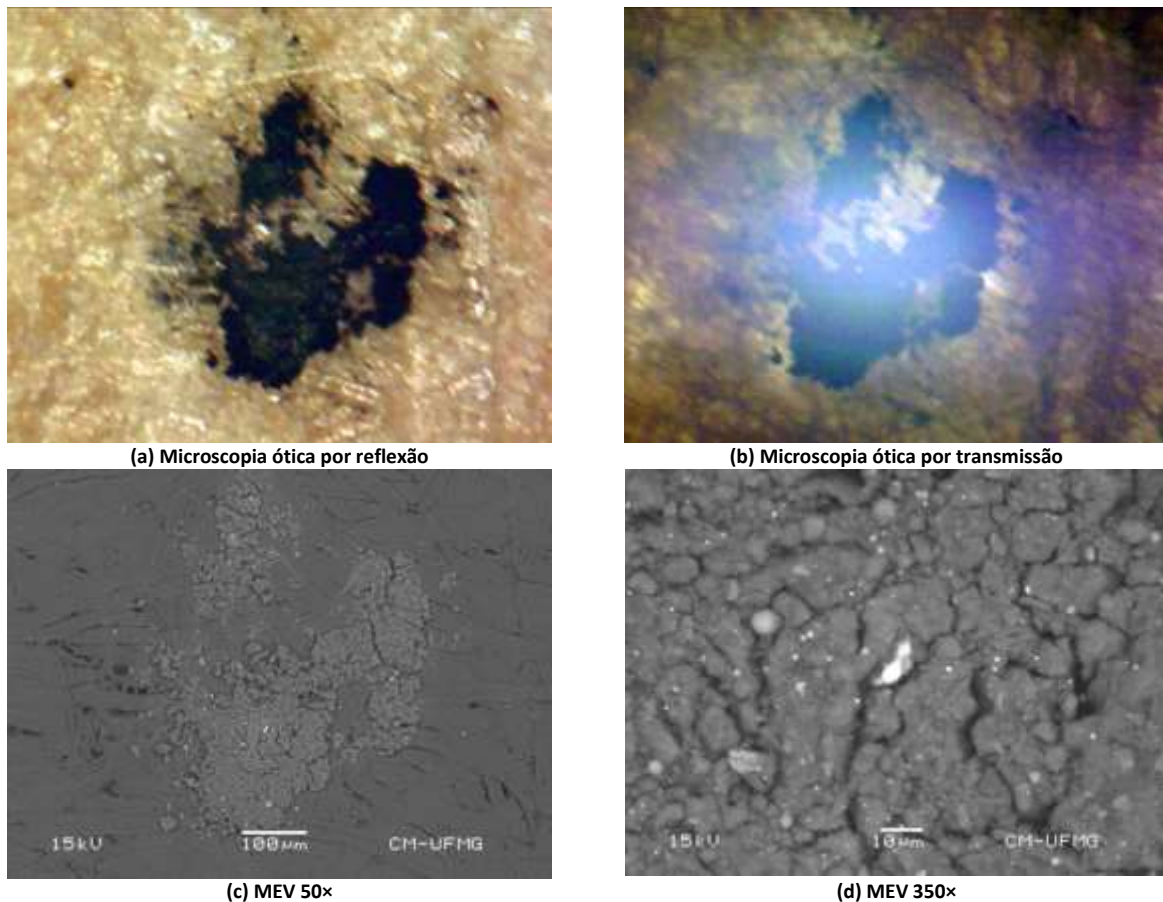


Figura 3 - Imagens da amostra

Pode-se observar que a região avaliada apresentou aspecto escuro na microscopia óptica de reflexão e praticamente sem transparência vista sob a luz transmitida. A mesma região apresenta baixo contraste químico em relação à matriz de papel no MEV com aumento de 50x. Com o aumento de 350x, estas partículas revelam morfologia predominantemente esférica e tamanhos que variam de 1 a 10 μm , bem como são observadas partículas de alto contraste químico.

A análise por EDS exibida na Figura 4 revela a presença majoritária de ferro, alumínio e carbono. Relacionando-se os elementos encontrados por EDS ao contraste químico das imagens, pode-se concluir que o ferro e o alumínio detectados estão contidos no material particulado esférico, que provavelmente é de natureza orgânica, assim como a matriz papel isolante. Ou seja, a composição química do material depositado sobre as fibras de celulose tem como base compostos de carbono, como a celulose.

A presença de elementos químicos como Fe e Al indica que a contaminação do material isolante sólido se deu, possivelmente, por fatores externos.

A análise complementar por Espectrometria de Infravermelho por Transformada de Fourier do material demonstrou que a parte orgânica (partículas esféricas) são cadeias de hidrocarbonetos de tamanhos diversos, similares a cadeias poliméricas, que, ao se formarem no meio líquido, tendem a assumir formato esférico. Esta é a mesma composição química do material conhecido pelos profissionais da área de engenharia elétrica como x-wax, que é encontrado durante inspeções associado a defeitos internos por descargas parciais em equipamentos.

Em amostras de outro equipamento investigado, foi encontrada a densidade de material particulado apresentada na Figura 5. A composição química deste material particulado é formada por cobre e alumínio. O carbono refere-se à matriz de celulose.

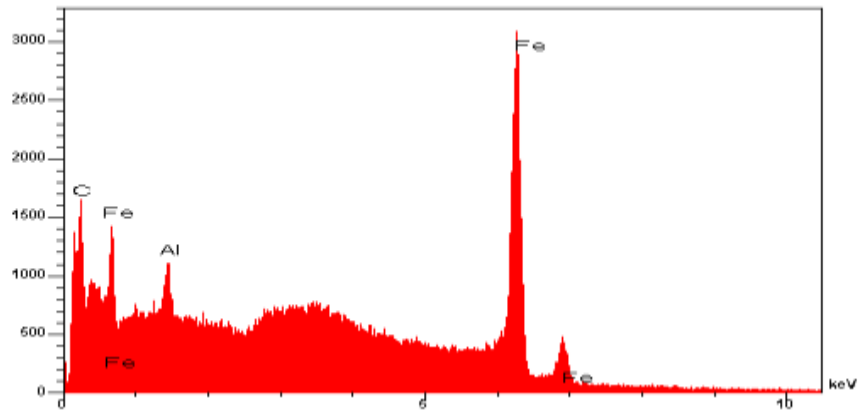


Figura 4 – Análise EDS da primeira amostra

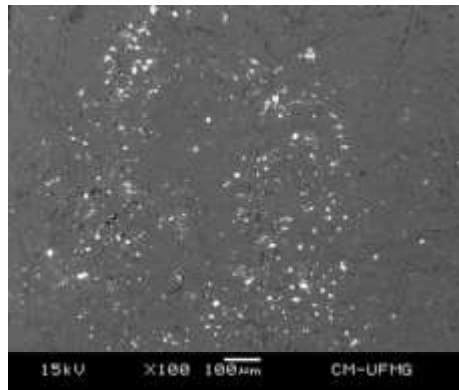


Figura 5 - MEV da segunda amostra

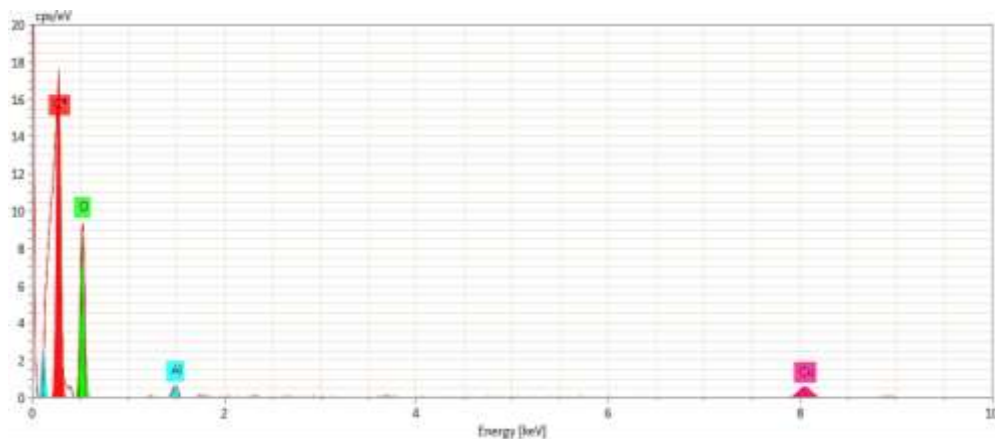


Figura 6 - Espectro EDS da segunda amostra

4 MODELAGEM

4.1 Estado da arte de modelos físicos de descargas parciais

A maioria das modelagens trata de vazios no dielétricos, particularmente bolhas de ar ou outros gases. Primeiramente, deve-se caracterizar os tipos de defeitos, para se inferir a suas possíveis origens e, de acordo com o tipo de equipamento, os pontos mais prováveis de ocorrência, tanto na geometria do equipamento quanto na escala

de tempo, ou seja, corresponder o defeito com a curva de confiabilidade (ou “curva da banheira”), classificando-o como uma falha prematura, aleatória ou por desgaste.

Uma referência seminal neste aspecto é o artigo de Niemeyer [3], no qual buscou-se uma modelagem física dos defeitos em isolamentos de alta tensão. Primeiramente enfatizou-se a distinção entre modelos de descargas parciais (DPs), modelos de envelhecimento e degradação e modelos de disrupção. Como exemplos chegou-se a um modelo de esfera imersa no meio isolante e um modelo de protusão do eletrodo. O artigo é focado em isolamento por meios gasosos, mas fornece uma forma de classificação dos tipos de defeitos de uma forma geral, por tipo de interface (eletrodo, isolante sólido e fluido).

A referência [4] segue os moldes deste trabalho, com uma aplicação de elementos finitos em OIP de buchas de alta tensão, incluindo uma inferência de uma célula de teste com medições reais. Para este trabalho, o foco está no efeito da partícula no campo local, não se fazendo o mérito de que tipo de equipamento se refere, referindo-se apenas àqueles que utilizam OIP no seu isolamento.

Alguns desenvolvimentos recentes [5][6][7][8][9] apresentam a modelagem de defeitos dielétricos, consistindo em vazios imersos no óleo isolante, ou seja, bolhas compostas por gases ou líquidos de condutividade igual ou inferior ao do óleo, e permissividade diferenciada. Neste aspecto a diferença de permissividades provoca uma concentração de campo, que, dependendo do meio e presença de cargas, pode levar a descargas parciais, e consequentemente, a evolução para uma falha. Notadamente em [8] foca-se na modelagem desta evolução, transformando a bolha após a descarga em uma partícula condutora, alterando assim o campo elétrico local.

4.2 Modelo em elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) caracteriza um domínio de solução e seus respectivos contornos, que devem respeitar pelo menos uma das condições: Dirichlet (valor prescrito) ou Neumann (derivada prescrita). Em geral a qualidade da solução depende da geometria do elemento, das funções de aproximação adotadas e da qualidade da malha. Independente da necessidade, o MEF calcula a solução para todos os elementos no domínio.

Neste trabalho utilizou-se o MEF através do Comsol [11], utilizando o módulo AC/DC, física “electric currents”, aonde as condutividades e permissividades dos materiais são consideradas. Nesta etapa utilizou-se a aproximação estacionária, sendo adequada para a estimativa do campo elétrico crítico e uma análise qualitativa da intensidade do campo em função das geometrias. Adicionalmente, o Comsol é um sistema adequado para um eventual estudo multifísica, como por exemplo investigar a variação das permissividades em função da temperatura.

4.2.1 Discretização do domínio

A partir da análise microscópica das amostras de papel apresentada na Figura 5, modelou-se a distribuição de partículas. Utilizando a ferramenta de análise de imagem do Matlab [12], obtendo-se uma densidade de 55 partículas/mm². Extraíu-se também o diâmetro equivalente das partículas, conforme histograma na Figura 7. A maioria das ocorrências corresponde a dimensão de um pixel na imagem.

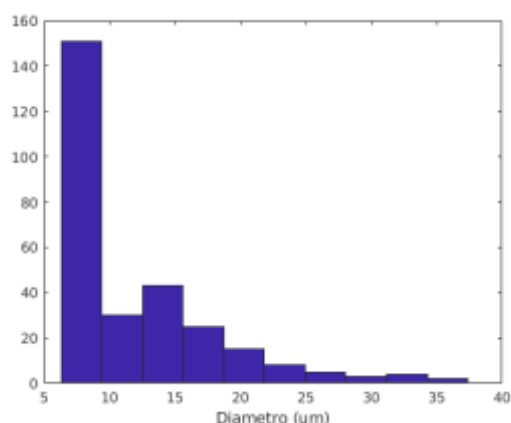


Figura 7 – Histograma do diâmetro equivalente das partículas

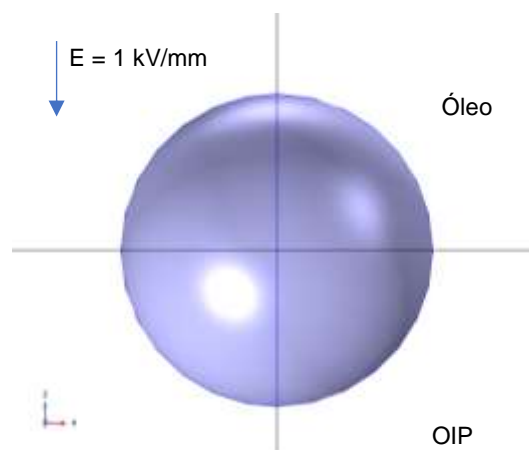


Figura 8 – Domínios de simulação

O domínio da simulação consiste em uma “célula” de $2 \times 2 \times 2$ mm, representativa de um meio papel-óleo com a presença dos contaminantes na fronteira, conforme Figura 8. A célula é considerada retangular e o campo prescrito constante, devido a dimensão característica da simulação não se considerou o efeito de curvaturas usuais em equipamentos de alta tensão, (e.g. buchas). As permissividades adotadas foram 2,8 para o OIP e 2.2 para o óleo. Quando aplicável, a condutividade adotada foi de 10^{-12} S/m para ambos os meios.

Em todas as simulações considerou-se um campo uniforme de 1 kV/mm normal à superfície. Independente dos materiais aplicados no domínio, na ausência de contaminantes, o campo mantém-se uniforme.

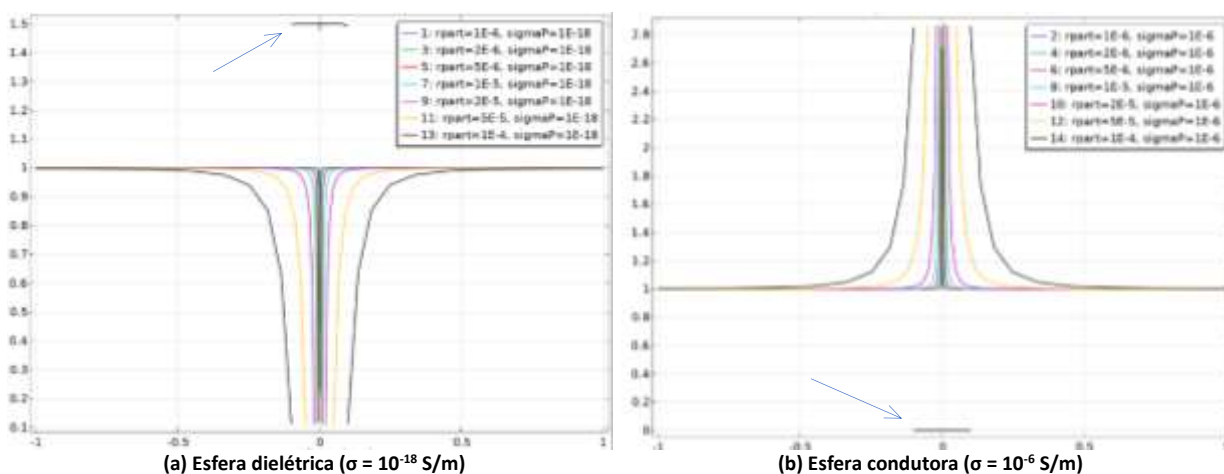
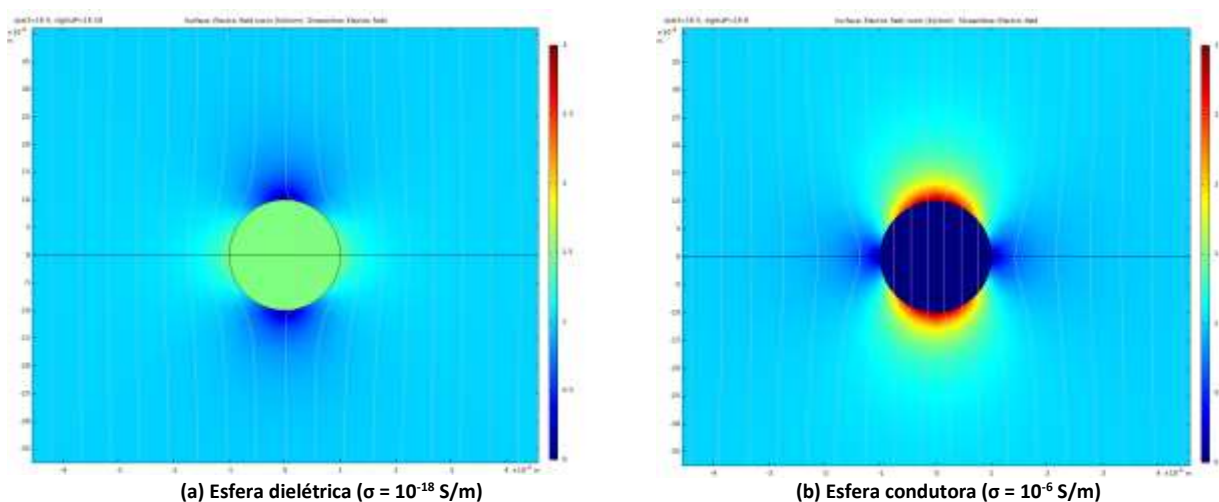
4.2.2 Geração de partículas no espaço

Inicialmente demonstrou-se o efeito individual em uma partícula esférica. Na sequência, realizou-se a geração aleatória de partículas no plano de interface entre OIP-óleo, no caso 55×4 partículas. O raio das partículas foi fixado em $5 \mu\text{m}$. O modelo no Comsol foi gerado com auxílio de uma rotina em Java, utilizando a função “Random” para o sorteio de cada coordenada (x,y) neste plano, logo assumindo uma distribuição uniforme.

5 RESULTADOS

5.1 Efeito da dimensão e condutividade da esfera

No primeiro exemplo demonstra-se o efeito da condutividade das partículas no meio. A Figura 9a demonstra uma esfera considerada dielétrica, de 10^{-18} S/m e Figura 9b uma esfera condutora de 10^{-6} S/m , ambas com diâmetro de $20 \mu\text{m}$. Figura 10 refere-se ao perfil transversal para uma variação de diâmetros, com o detalhe atentado pelas setas do campo no interior da partícula. Como esperado, a esfera dielétrica provoca uma moderada concentração de campo no seu interior, enquanto a esfera condutora concentra o campo na sua superfície, apresentando campo zero no seu interior. Assim, nas simulações seguintes considerou-se a esfera como um condutor perfeito (sem malha no seu interior), e sua superfície como um equipotencial flutuante.



5.2 Efeito da forma da elipsoide

A forma da partícula influencia fortemente nos resultados. Como demonstração, partiu-se do formato esférico e alongaram-se os eixos normais à superfície do OIP, formando uma elipsoide conforme Figura 11. Esta posição seria a mais provável de se encontrar uma partícula contaminante de forma alongada. Para um estudo paramétrico da assimetria (equivalente a um multiplicado dos semieixos normais em relação ao semieixo vertical), obteve-se uma concentração de campo para o elemento esférico, Figura 12, pelo perfil conforme indicado na Figura 11.

Para o caso de assimetria igual a 8, observa-se o campo aumentado na superfície e uma redução nas bordas. Novamente, para o caso prático de partículas com arestas mais irregulares, esta afirmação não se sustenta.

5.3 Distribuição de esferas na superfície do papel

Figura 14 ilustra o domínio da simulação com uma geração aleatória de partículas sobre a interface OIP/ óleo.

Figura 15 é o detalhe do campo elétrico na superfície do OIP, com valor nominal de 1 kV/mm, e o valor máximo obtido em uma das partículas. Conforme visto, a presença do contaminante provoca a elevação do campo local, mas para a densidade e dimensão média das partículas, não se observou alteração expressiva nos parâmetros da célula. Por uma funcionalidade do Comsol pode-se extrair uma função de transferência de admitância, sendo neste caso utilizado o estudo “frequency domain”, até 10 MHz, demonstrando um comportamento linear.

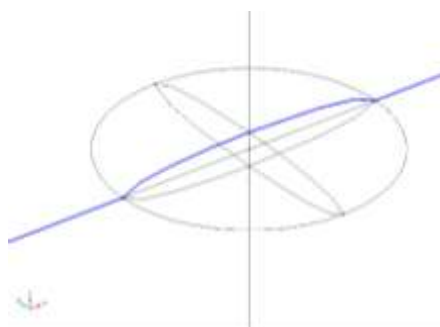


Figura 11 – Perspectiva do formato da elipsoide e perfil

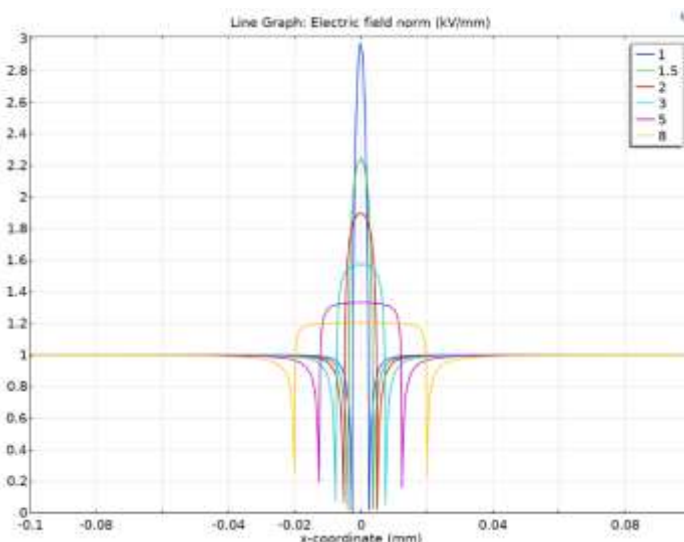


Figura 12 - Efeito da assimetria de uma partícula elipsoide no campo elétrico aplicado ao longo do perfil da Figura 11

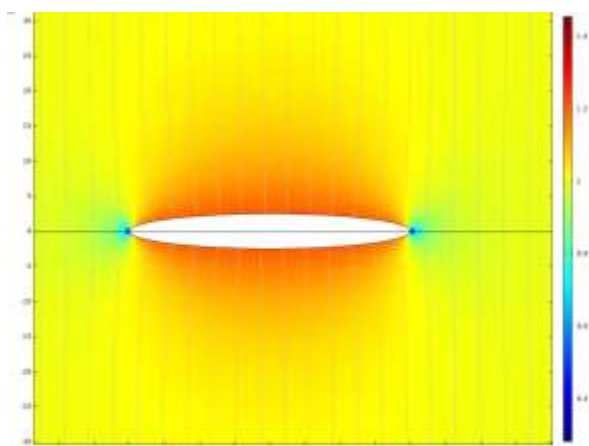


Figura 13 – Intensidade do campo elétrico em kV/mm na partícula elipsoidal, para assimetria igual a 8

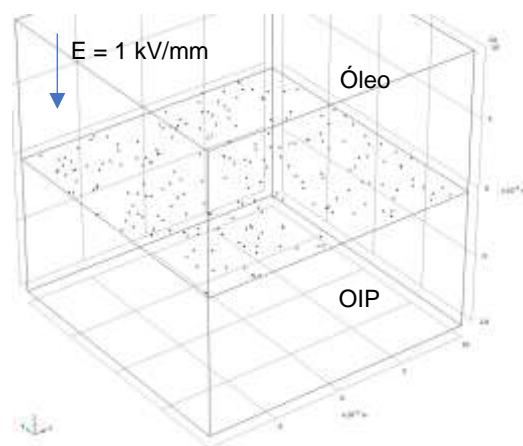


Figura 14 - Simulação do papel com densidade de partículas conforme obtido na microscopia

5.4 Esfera condutora em lacuna dielétrica

Como último exemplo, considerou-se uma partícula condutora de diâmetro de 10 μm em uma lacuna de ar, com um meio homogêneo equivalente ao OIP. A geometria da lacuna assemelha-se a um elipsoide, assumindo que a partícula se encontra entre duas camadas de papel, forçando uma abertura entre as camadas. Parte da partícula encontra-se em contato com o papel, e, como visto na Figura 16, na interface entre os meios (ponto triplo) ocorre uma grande concentração de campo no meio da lacuna. Mesmo que não se considere que a lacuna seja preenchida por ar e sim por óleo, por exemplo, a distinção entre as permissividades ainda provocaria uma concentração semelhante.

6 CONCLUSÕES

Com a evolução da aplicação de técnicas com a Microscopia Eletrônica de Varredura acoplado a um EDS é possível obter um nível de detecção da presença e natureza de contaminantes diversos no isolamento sólido (OIP) de tamanho microscópico.

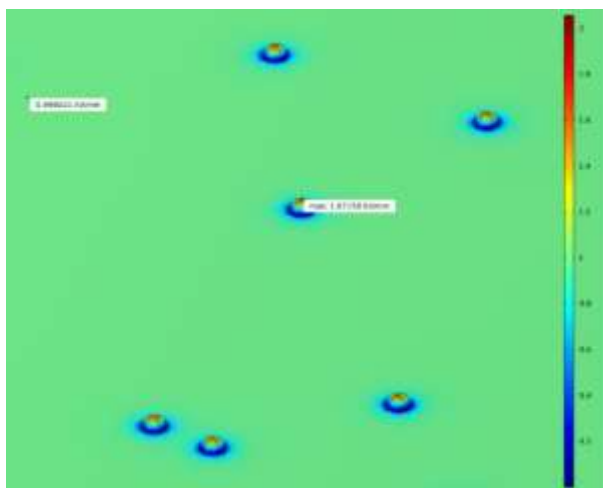


Figura 15 - Comparação entre o valor nominal de campo no meio e máximo encontrado na partícula

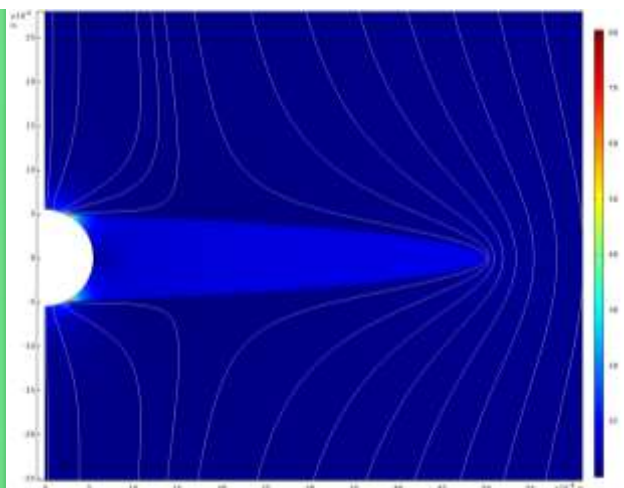


Figura 16 – Intensidade de campo elétrico em kV/mm, esfera condutora em lacuna de ar

A partir desta detecção, as consequências da eventual presença destes contaminantes nos equipamentos, quando em operação, foi estudada por meio de modelos teóricos e extraídos das observações experimentais, demonstrando assim o efeito de partículas contaminantes no campo elétrico local para sistemas isolantes OIP. Este tipo de fenômeno pode não ser detectável nos ensaios de rotina, pois o nível de atividade de DP, no seu início, pode estar abaixo do limite de detecção do ensaio.

As simulações foram realizadas em geometrias simplificadas como encontradas em buchas de alta tensão de transformadores, estipulando-se um campo elétrico uniforme, focando-se no efeito local da partícula contaminante. Para um caso prático, deve-se considerar a geometria completa do equipamento, obtendo-se assim regiões de concentração de campo, o que pode levar a efeitos ainda mais importantes.

O modelo estático permite uma estimativa inicial do campo elétrico de início da descarga. O desenvolvimento natural é o modelo de alta frequência, no qual as partículas são consideradas como dipolos. O resultado deste tipo de modelo permitirá a inferência de defeitos a partir de medições de DPs, distinguindo-se, por exemplo, a assinatura eletromagnética dos contaminantes de outros defeitos.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais (CM-UFGM) por disponibilizar seus equipamentos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REZENDE, S. M. **A Física de Materiais e Dispositivos Eletrônicos**, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1996.
- [2] CIGRE WG D1.53. **Ageing of Liquid Impregnated Cellulose for Power Transformers**, Technical Brochure 738, August 2018.
- [3] NIEMEYER, Lutz. A generalized approach to partial discharge modeling. **IEEE transactions on Dielectrics and Electrical insulation**, v. 2, n. 4, p. 510-528, 1995.
- [4] AHMED, Zeeshan. **Analysis of Partial Discharge in OIP Bushing Models**. Degree project in Electrical Engineering/ Electromagnetic Engineering, Stockholm, 2011.
- [5] RAHMAN, Muhammed Faisal; NIRGUDE, Pradeep. A New Approach to Study Partial Discharge Inception due to Particles in Transformer Oil Using Electric Field Analysis. In: **2019 International Conference on High Voltage Engineering and Technology (ICHVET)**. IEEE, 2019.
- [6] WANG, Dongyang et al. Simulation for Transient Moisture Distribution and Effects on the Electric Field in Stable Condition: 110 kV Oil-Immersed Insulation Paper Bushing. **IEEE Access**, v. 7, p. 162991-163002, 2019.
- [7] WANG, Yongqiang et al. Effect of aging on material properties and partial discharge characteristics of insulating pressboard. **BioResources**, v. 14, n. 1, p. 1303-1316, 2019.
- [8] BORGHEI, Moein; GHASSEMI, Mona. Finite element modeling of partial discharge activity within a spherical cavity in a solid dielectric material under fast, repetitive voltage pulses. In: **2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)**. IEEE, 2019.
- [9] BORGHEI, Moein et al. A Finite Element Analysis and an Improved Induced Charge Concept for Partial Discharge Modeling, in: **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 36, no. 4, pp. 2570-2581, Aug. 2021
- [10] CIGRE WG D1.43. **Insulation Degradation under Fast, Repetitive Voltage Pulses**, Technical Brochure 703, September 2017.
- [11] COMSOL AB. **COMSOL Multiphysics 5.6** (Build 280), 2020.
- [12] MATHWORKS. **MATLAB Image Processing Toolbox**, R2017b, 2017.

DADOS BIOGRÁFICOS

**CARLOS KLEBER DA COSTA ARRUDA**

Formado em Engenharia Industrial Elétrica pelo CEFET-RJ (1999), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFRJ (2003, 2012). Atualmente é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel). Tem experiência em pesquisa de modelos computacionais aplicados em linhas de transmissão e equipamentos, campos eletromagnéticos, aterramento, descargas atmosféricas e confiabilidade aplicada a subestações.

(2) ADRIANA DE CASTRO PASSOS MARTINS

Técnico Profissionalizante, Química, Cefet-MG. Graduação em Engenharia Química, Escola de Engenharia UFMG; Mestrado em Engenharia Metalúrgica, ênfase em Eng. de Materiais, EEUFG; Especialização em Engenharia de Materiais para o Setor Elétrico, UFPR; Engenharia Econômica, Fundação Dom Cabral - MG. Engenheira Especialista na Cemig GT, na área de Engenharia e Planejamento de Manutenção com ênfase em Monitoramento Preditivo, Gerenciamento de Manutenção, Ciência de Materiais. Atual coordenadora do Comitê de Estudos D1 - Materiais e Tecnologias Emergentes - do CIGRÉ-Brasil, representante do Brasil no Study Committee D1 CIGRÉ Internacional, especialista do Advisory Group D1.01-Liquids and Liquid Impregnated Insulation Systems,

(3) FELIPE TEODORO DE OLIVEIRA

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2014) , mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2018), curso-técnico-profissionalizante em Técnico em Eletrotécnica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca(2007). Atualmente é Profissional Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Atua principalmente nos seguintes temas: avaliação de campos eletromagnéticos em subestações e linhas de transmissão, métodos numéricos, gestão de ativos de sistemas de energia, efeito corona, ultra-alta tensão, corredores híbridos.

(4) ORSINO BORGES DE OLIVEIRA FILHO

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFRJ (1984). M.Sc. pela COPPE/ UFRJ (1991). Pós-graduado em Gestão do Conhecimento pela COPPE/UFRJ (2003). Pesquisador do Cepel de 1984 a 2013 e diretor de Laboratórios desde 2017. Tem mais de 35 anos de experiência com projetos de P&D e serviços tecnológicos em Engenharia de Alta Tensão. De 2008 a 2014 foi coordenador do CE D1: Materiais e Tecnologias Emergentes do Cigre-Brasil. Em 2016 recebeu o prêmio internacional "Technical Award 2016" do SC D1: Materials and Emerging Test Techniques do Cigré. Possui mais de 50 artigos em eventos técnicos nacionais e no exterior.

(5) ROBERTO COUCEIRO LOIS

Técnico Químico do Centro de Monitoramento Preditivo da AT/CP-CEMIG GT com experiência em análises instrumentais e ciência dos materiais.