

Influência de Partículas Sólidas Contaminantes no Campo Elétrico em Óleo Isolante

R. G. D. Oliveira ¹; E. G. da Costa ²; A. L. Cruz ¹; H. N. Santana ¹; J. M. C. L. da Silva ¹ e R. M. R. Barros ¹

¹ Mestrando do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE/UFCCG

² Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil

Resumo—Este trabalho tem como objetivo apresentar e analisar os resultados do comportamento dielétrico de materiais isolantes líquidos em função da presença de partículas sólidas suspensas. Para este fim, simulações computacionais foram realizadas no programa COMSOL Multiphysics®, que se baseia no método dos elementos finitos. As partículas sólidas suspensas reduzem a suportabilidade dielétrica de líquidos isolantes, comprometendo o desempenho da isolamento. Desta forma, foi investigado o comportamento de um material isolante líquido variando-se a posição, em relação aos eletrodos, das partículas suspensas presentes, bem como o material do qual estas partículas são formadas e a quantidade das mesmas. Os resultados obtidos mostraram perfis de campo elétrico similares para todas as partículas, entretanto, os valores máximos obtidos com a presença de elementos de óxido de ferro foram maiores que os observados para os demais. As quantidades de partículas verificadas (8 e 16) mostraram resultados bem próximos de campos elétricos. A posição de um elemento em suspensão com relação aos eletrodos se mostrou mais crítica quando este se encontra bastante próximo das placas, com maior concentração de linhas de campo.

Palavras-chave—simulações multifísicas, campo elétrico, líquidos isolantes, partículas sólidas contaminantes.

I. INTRODUÇÃO

Os meios isolantes comumente usados em equipamentos elétricos são os mais diversos, podendo ser gasosos como o ar, hexafluoreto de enxofre (SF₆) ou o vácuo, líquidos, como o Óleo Mineral Isolante - OMI ou o óleo sintético, e sólidos, como as resinas epóxi ou fibra de vidro [1].

Os líquidos isolantes são comumente utilizados em transformadores, disjuntores, cabos de alta tensão e capacitores. Nos transformadores, o dielétrico líquido é utilizado tanto para fornecer isolamento entre as partes ativas e as partes aterradas, como também entre seus enrolamentos, e para realizar a troca de calor entre enrolamentos, núcleo e tanque proporcionando assim um efeito de resfriamento [2].

O líquido isolante em serviço está sujeito a altas temperaturas, reações de oxidação, presença de umidade e impurezas que afetam a sua rigidez dielétrica. O acompanhamento das propriedades elétricas do dielétrico

líquido é de extrema importância para manter em boas condições o uso do transformador, bem como em outros equipamentos elétricos.

O conhecimento adquirido ao longo das últimas décadas, acerca da ruptura dos dielétricos líquidos é menos avançado que no caso dos dielétricos gasosos e sólidos. Muitos aspectos da ruptura em líquidos têm sido bastante estudados por muitos pesquisadores, entretanto, não existe uma teoria ampla e geral que possa ser aplicada a todos os líquidos em qualquer condição [3].

Neste trabalho apresenta-se uma análise do comportamento dielétrico do óleo mineral isolante contendo partículas não dissolvidas (em suspensão). Por meio de simulações computacionais no software COMSOL Multiphysics® a posição das partículas sólidas, a composição e a quantidade das mesmas presentes no isolante líquido foram investigadas, avaliando-se o impacto destes parâmetros na suportabilidade dielétrica do óleo.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Propriedades Elétricas dos Líquidos Isolantes

O óleo mineral, bem como qualquer líquido isolante, deve possuir boas propriedades elétricas, deve ter excelente capacidade de transferência de calor e ser quimicamente estável para suas condições de uso [4].

As propriedades elétricas essenciais de um líquido isolante e que determinam a sua capacidade dielétrica são alta permissividade relativa, alta resistividade, baixas perdas e capacidade de suportar campos elétricos elevados (rigidez dielétrica).

Em condições reais de serviço, a rigidez dielétrica do óleo mineral isolante diminui consideravelmente devido à presença de impurezas fibrosas, gotas de água e gases dissolvidos. Estudos sugerem que a presença de tais contaminantes contribui para a ocorrência de falhas em equipamentos de alta tensão, como por exemplo, buchas de transformadores [5]. A água pode existir no líquido isolante sob a forma dissolvida, não dissolvida (em suspensão) ou livre (depositada) [6]. O grau de refino e a

temperatura do líquido isolante são importantes para se controlar o nível de água no mesmo.

B. Descargas em Isolantes Líquidos

As teorias propostas para explicar a os processos de falha em líquidos isolantes são classificadas na seguinte ordem: repartição eletrônica, mecanismo de partículas sólidas em suspensão, ruptura por cavitação e volume de líquido isolante estressado. Neste artigo, um breve resumo sobre a falha em líquidos isolantes devida ao mecanismo de partículas sólidas será apresentado. Detalhes sobre este fenômeno bem como os demais podem ser obtidos nas referências [3] e [4].

Os líquidos isolantes sempre contêm impurezas sólidas, sejam fibras ou partículas dispersas. A permissividade das partículas sólidas, ϵ_1 , será sempre diferente das do líquido, ϵ_2 . A permissividade é a propriedade de um material ou meio dielétrico que representa o valor da energia eletrostática que pode ser armazenada por unidade de volume, quando aplicada uma unidade de tensão elétrica. Assumindo que essas partículas são esféricas de raio r , aplicadas em um campo elétrico E , as mesmas ficam polarizadas e submetidas a uma força F , dada pela Equação 2.

$$F = \epsilon_2 \cdot r^3 \cdot \left(\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2} \right) \cdot E \nabla E \quad (2)$$

Essa força é dirigida para um local de maior estresse se $\epsilon_1 > \epsilon_2$ e para um lugar de menos estresse se $\epsilon_1 < \epsilon_2$, quando ϵ_1 é a permissividade de bolhas de gases. A força dada acima aumenta à medida que a permissividade das partículas em suspensão aumenta. Para partículas condutoras, onde ϵ tende ao infinito, obtém-se uma força dada pela Equação 3 [3] [4].

$$F = F_\infty = r^3 \cdot E \nabla E \quad (3)$$

Assim, a força tenderá a fazer com que a partícula avance para regiões mais fortes do campo. Uma vez que a permissividade dessas partículas é maior que a do líquido, sua presença na região de campo uniforme causará uma concentração do fluxo na superfície, e se outras partículas estiverem presentes serão atraídas, ocasionando uma concentração mais elevada de fluxo [3].

Sendo grande a quantidade de partículas presentes, essa força faz com que elas permaneçam alinhadas formando uma ponte sobre o “gap”. O campo no líquido entre o “gap” irá aumentar até atingir seu valor crítico, ocasionando a ruptura do dielétrico no lugar. Sendo o número de partículas insuficiente para causar ruptura, as mesmas irão dar origem a um aumento no campo local, mas se o campo exceder a rigidez dielétrica do líquido, ocorrerá uma desagregação local próximo às partículas e, portanto, levando a ruptura do líquido [4].

III. MATERIAL E MÉTODO

A. COMSOL Multiphysics®

O COMSOL Multiphysics® é um software desenvolvido para modelagem e simulação de problemas físicos. Ele foi criado baseando-se na teoria do Método dos Elementos Finitos - MEF, ou seja, trabalha realizando aproximações das soluções de equações diferenciais parciais.

As principais vantagens do software são sua robustez e a possibilidade de construir diretamente o objeto a ser estudado. Após o desenho do modelo, são atribuídas às regiões do mesmo as constantes e grandezas físicas, não sendo necessária a construção das equações do MEF ou a criação de algoritmos de solução.

Para obter as soluções de problemas utilizando o software faz-se necessário definir a geometria da região onde o problema deve ser resolvido, indicando as características elétricas de cada sub-região e as condições de contorno. Ele também permite a importação de geometrias desenhadas em outros softwares de modelagem em diversos formatos.

B. Análise dos Líquidos Isolantes

O comportamento dos líquidos em questão foi tratado apenas sob o ponto de vista da visualização do campo elétrico no líquido isolante e nas partículas. As seguintes composições de partículas sólidas (suspensas) foram avaliadas: papel Kraft, comumente utilizado para envolver os enrolamentos de transformadores de potência; borra de óleo de transformador, óxido de ferro e carbono.

As seguintes situações foram simuladas:

- Líquido isolante contendo 8 partículas sólidas em suspensão distribuídas aleatoriamente;
- Líquido isolante contendo 16 partículas sólidas em suspensão distribuídas aleatoriamente.

Na Figura 1 é apresentado um esquema que ilustra como as simulações foram realizadas. As composições das partículas em estudo estão indicadas na parte inferior do esquema.

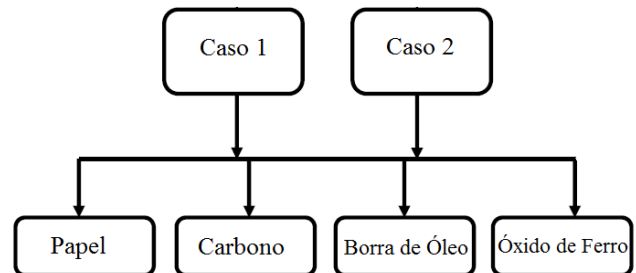


Figura 1. Esquema de Simulações.

Além disso, o comportamento dielétrico do líquido isolante foi estudado variando-se a posição das partículas em relação aos eletrodos.

C. Sistema Modelado e Simulação no COMSOL Multiphysics®

O primeiro passo para realização da simulação foi a construção do modelo gráfico do arranjo simulado, sendo a modelagem feita na própria plataforma de simulação em 2D.

O sistema trata de uma eventual situação que poderia ser visualizada no interior de um transformador de potência, onde o líquido isolante é o óleo mineral comercial e este está contido no interior do transformador exercendo as funções de isolamento e refrigeração.

Para simulação, considerou-se a presença do óleo com partículas suspensas entre duas placas metálicas de cobre espaçadas e com diferença de potencial de 100 kV. Para evitar a interferência do campo elétrico, que é mais intenso nas extremidades dos eletrodos, considerou-se estes como tendo comprimento maior que o recipiente onde está contido o óleo. O conjunto formado pelas placas metálicas e pelo óleo isolante encontra-se dentro de um elemento infinito, conforme ilustrado na Figura 2, cuja função é impedir a alteração das grandezas mensuradas durante a simulação.

Apesar das partículas suspensas terem formatos irregulares, considerou-se o tamanho destas como tendo aproximadamente 2,5 mm de diâmetro. Os desenhos dos sistemas modelados são apresentados na Figura 2.

Após a modelagem, foram determinadas as grandezas e constantes físicas que caracterizam cada material que constitui o sistema simulado. A maioria dos valores está presente na biblioteca do próprio simulador, no entanto, alguns valores foram retirados da literatura. Todas as constantes utilizadas encontram-se na Tabela I.

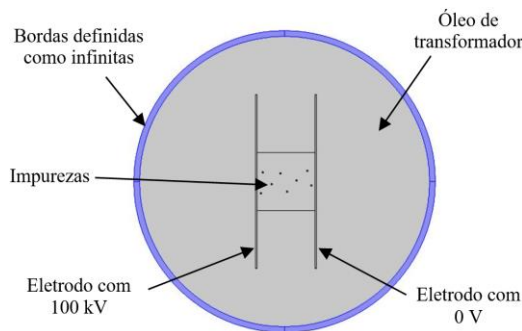


Figura 2. Modelo gráfico construído para simulação.

TABELA I
PERMISSIVIDADE RELATIVA DOS MATERIAIS PRESENTES NA SIMULAÇÃO

Material	ϵ_r - Permissividade Relativa
Ar	1,0
Óleo Mineral	2,2
Papel Kraft	3,6
Carbono	1,6
Borra de Óleo	3,0
Óxido de Ferro	$1,0 \times 10^5$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Caso 1

O valor máximo do campo elétrico foi calculado para cada composição das 8 partículas suspensas no óleo do transformador e na própria partícula. Na Tabela II estão apresentados os valores obtidos após a simulação.

TABELA II
VALORES MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

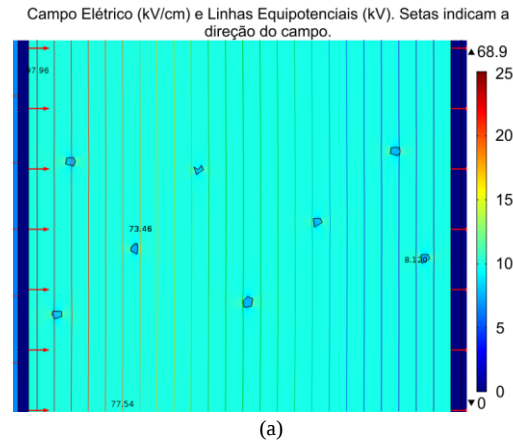
Material	$E_{\text{máx}}$ Óleo (kV/cm)	$E_{\text{máx}}$ Partícula (kV/cm)
Papel	12,9	10,0
Carbono	12,1	13,3
Borra de Óleo	10,8	10,1
Óxido de Ferro	27,9	$26,5 \times 10^{-4}$

A partir da análise da Tabela II, verifica-se que, apenas na condição em que o material da partícula em suspensão é o carbono, o campo elétrico sobre a mesma é maior que aquele observado no óleo. Isto se deve ao fato da permissividade relativa das partículas de carbono ser menor que a permissividade relativa do óleo em que estas se encontram em suspensão.

Na Figura 3 é mostrada a distribuição do campo elétrico na região das bolhas, incluindo linhas equipotenciais e a direção do campo para cada material que compõe as partículas sólidas em suspensão no óleo isolante.

As maiores distorções das linhas equipotenciais ocorrem onde há maior concentração de campo. Para as situações simuladas é possível perceber, observando a Figura 3, que as maiores distorções são apresentadas quando as partículas sólidas são de óxido de ferro.

O gráfico apresentado na Figura 4b corresponde ao campo elétrico ao longo de um trajeto específico entre os terminais dos eletrodos, apresentado na Figura 4a.



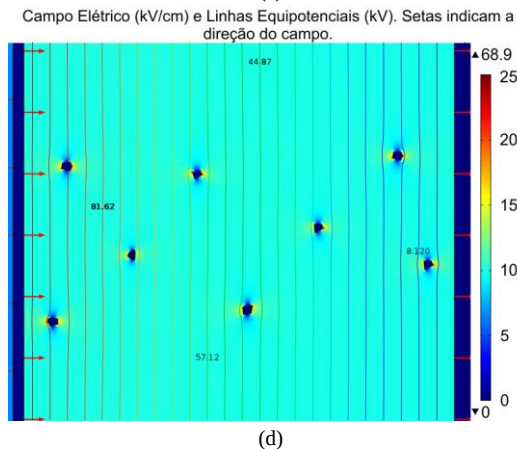
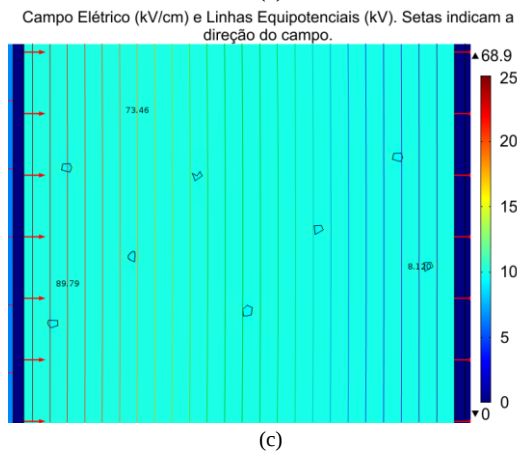
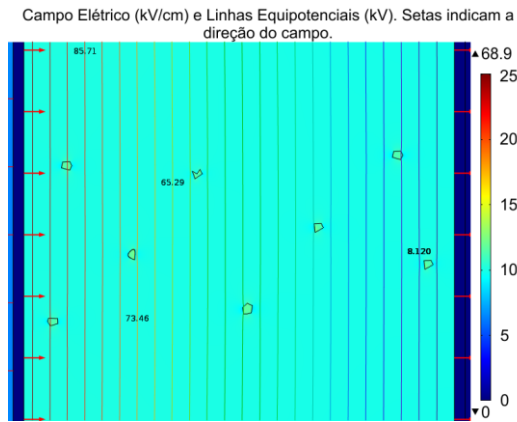


Figura 3. Distribuição do campo elétrico na região das bolhas, (a) Papel; (b) Carbono; (c) Borra de Óleo e (d) Óxido de Ferro.

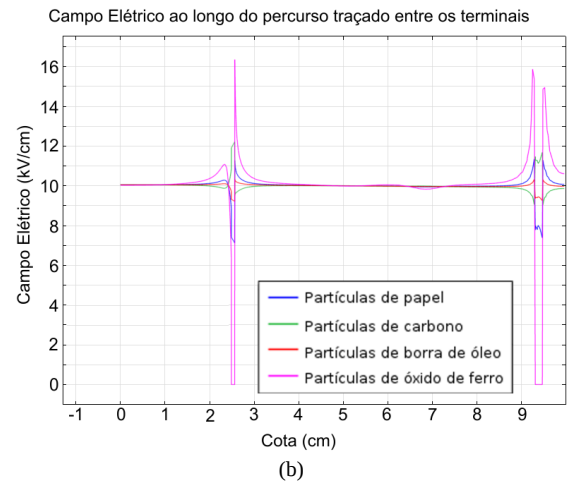
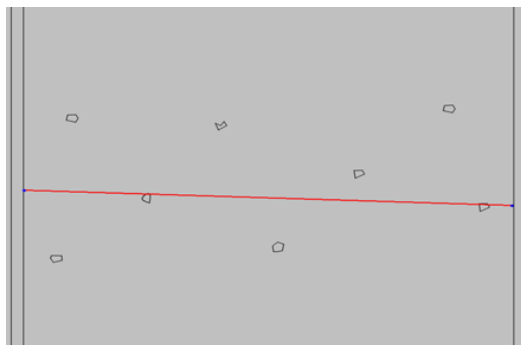


Figura 4. Trajeto traçado entre os terminais (a), e o campo elétrico ao longo do respectivo trajeto (b).

Nota-se que, no caso das partículas de óxido de ferro, o valor do campo elétrico é bem mais elevado que os demais verificados. Isso se deve ao valor da permissividade relativa deste material ser muito maior que a do óleo.

B. Caso 2

O valor máximo do campo elétrico foi calculado para cada composição das 16 partículas suspensas no óleo do transformador e na própria partícula. Na Tabela III estão apresentados os valores obtidos após a simulação.

TABELA III
VALORES MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

Material	$E_{\text{máx}} \text{ Óleo}$ (kV/cm)	$E_{\text{máx}} \text{ Partícula}$ (kV/cm)
Papel	12,9	10,0
Carbono	12,1	13,3
Borra de Óleo	10,8	10,1
Óxido de Ferro	27,4	$26,7 \times 10^{-4}$

A partir da análise da Tabela III, verifica-se que, apenas na condição em que o material da partícula em suspensão é o carbono, o campo elétrico sobre a mesma é maior que aquele observado no óleo. Isto se deve ao fato da permissividade relativa das partículas de carbono ser menor que a permissividade relativa do óleo em que estas se encontram em suspensão.

Na Figura 5 é mostrada a distribuição do campo elétrico na região das bolhas, incluindo linhas equipotenciais e a direção do campo para cada material que compõe as partículas sólidas em suspensão no óleo isolante.

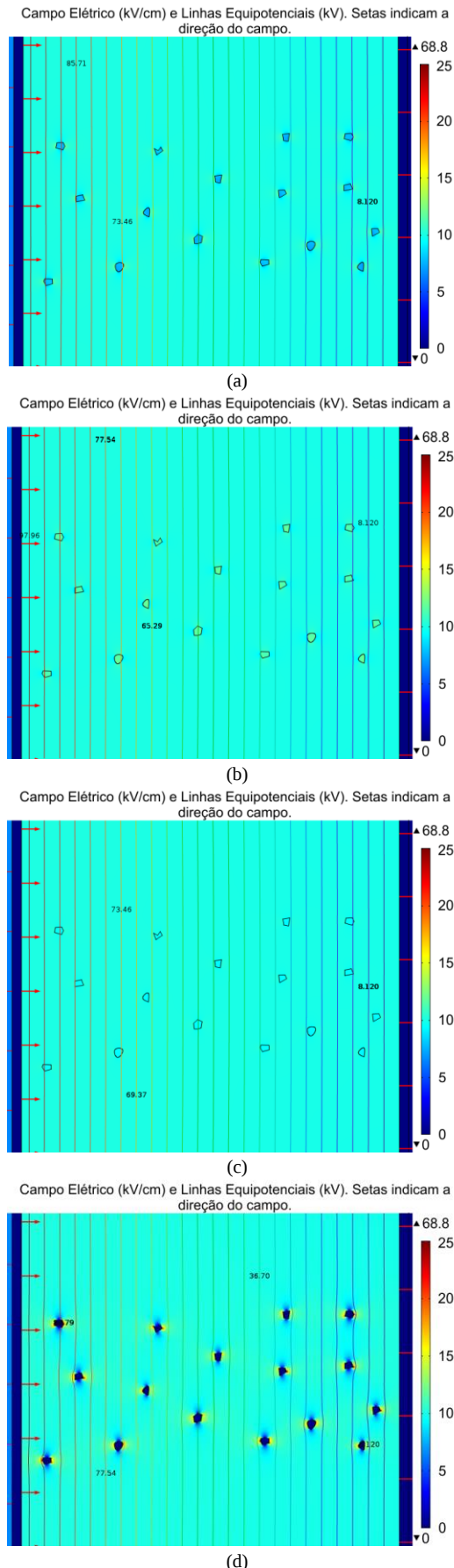


Figura 5. Distribuição do campo elétrico na região das bolhas, (a) Papel; (b) Carbono; (c) Borra de Óleo e (d) Óxido de Ferro.

Maiores distorções das linhas equipotenciais ocorrem onde há maior concentração de campo. Para as situações simuladas é possível perceber, observando a Figura 5, que as maiores distorções são apresentadas quando as partículas sólidas são de óxido de ferro.

O gráfico apresentado na Figura 6b corresponde ao campo elétrico ao longo de um trajeto específico entre os terminais dos eletrodos, apresentado na Figura 6a.

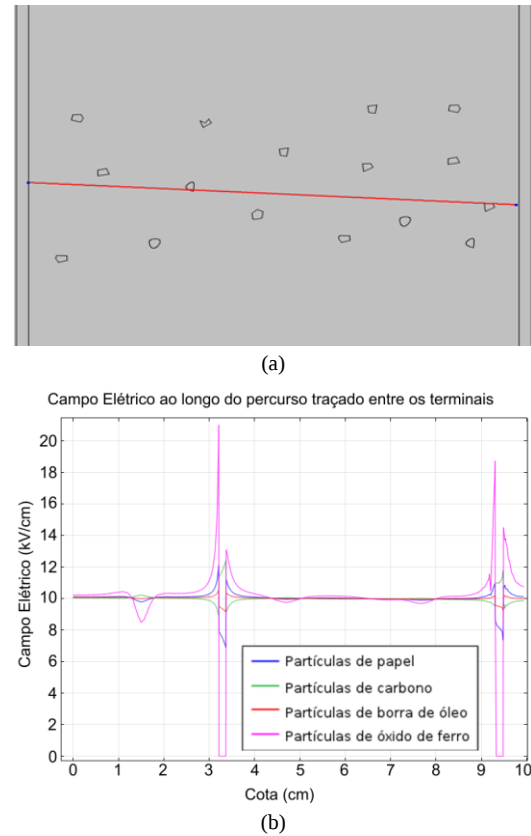


Figura 6. Trajeto traçado entre os terminais (a), e o campo elétrico ao longo do respectivo trajeto (b).

O trajeto das partículas compostas pelo material de óxido de ferro apresenta uma exposição maior ao campo elétrico em relação aos demais verificados. Isso se deve ao valor da permissividade relativa deste material ser extremamente maior que a permissividade relativa do óleo.

Analisando os dois casos simulados constata-se que o aumento no número de partículas sólidas, para todos os materiais no sistema, no caso 2, não alterou de forma significativa a distribuição do campo elétrico, quando comparado com os resultados obtidos para o caso 1. Para as partículas de óxido de ferro, os níveis do campo elétrico não aumentaram quando a quantidade das mesmas foi dobrada, de 8 para 16. A explicação para isso é que, mesmo dobrando o número de partículas, a quantidade das mesmas no sistema ainda continua muito pequena para se obter diferenças significativas.

C. Variação da distância da partícula em relação ao eletrodo

O campo elétrico das partículas sólidas em suspensão no líquido isolante foi analisado para diferentes distâncias dos eletrodos.

Na Figura 7 são mostradas as distribuições de campo elétrico para uma partícula de óxido de ferro em diferentes posições.

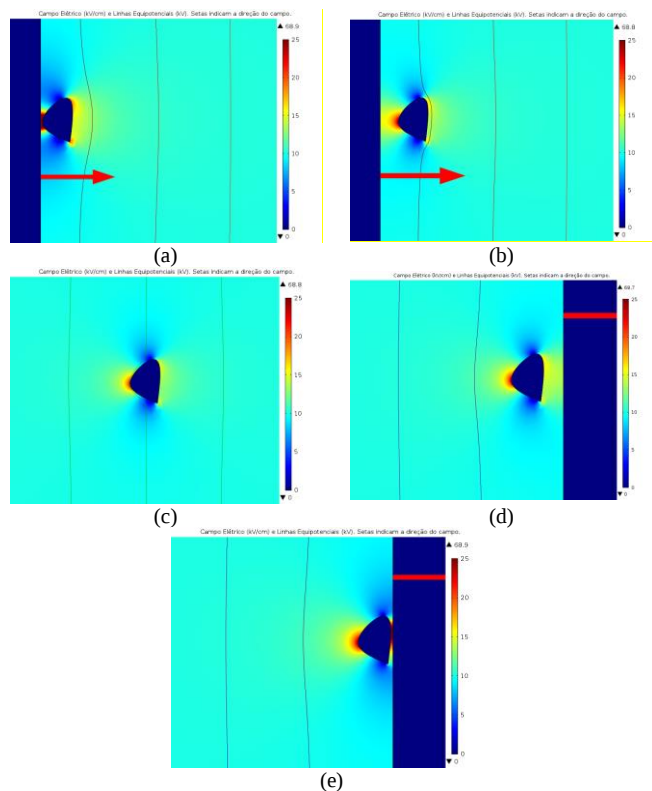


Figura 7. Distribuição do campo elétrico na região da bolha em diferentes posições em relação aos eletrodos.

A análise da Figura 7 permite verificar que as distorções das linhas equipotenciais de campo elétrico são maiores quando as partículas se encontram mais próximas do eletrodo energizado, localizado à esquerda da partícula.

Assim, quanto mais próxima a partícula estiver do eletrodo energizado, maiores são as chances de ruptura do líquido dielétrico nesta região.

As linhas de campo mais intensas próximas dos eletrodos podem ionizar moléculas de gases dissolvidos ou de água presentes no óleo mineral isolante, levando a um processo de avalanche pela formação e aceleração de elétrons livres.

V. CONCLUSÃO

O trabalho analisou o comportamento de partículas de diferentes materiais quando presentes em suspensão num óleo isolante líquido. Para isso, simulações computacionais no programa COMSOL Multiphysics® foram realizadas. A quantidade destas partículas também foi analisada, sendo simuladas duas condições: com 8 e 16 partículas presentes.

Os resultados mostraram que a presença de partículas suspensas de óxido de ferro distorceu as linhas de campo elétrico dentro do óleo. Este comportamento foi menos acentuado quando se observam as partículas dos demais materiais estudados.

O perfil de campo elétrico ao longo da trajetória do eletrodo se apresentou com maior intensidade para as partículas de óxido de ferro quando comparado com os perfis de campo produzidos pelos demais materiais. As distorções das linhas de campo observadas corroboram com estas observações.

Com relação ao número de partículas em suspensão presentes no óleo, verificou-se que o perfil de campo elétrico se manteve praticamente constante para ambos os casos com 8 e 16 partículas, porém, no caso das partículas de óxido de ferro, a intensidade do campo elétrico aumentou com o aumento do número de partículas.

As linhas de campo elétrico verificadas na condição de partícula de óxido de ferro se intensificaram quando esta se encontra mais próxima dos eletrodos. Esta maior concentração de linhas de campo pode provocar descargas devido à ionização de moléculas de água e de gases dissolvidos presentes no óleo.

AGRADECIMENTOS

À Capes e ao CNPq pelas concessão das bolsas de mestrado e ao CNPq pelos recursos financeiros - Chamada Universal – MCTI/CNPq Nº 14/2013.

REFERENCIAS

- [1] U. Wilson, “Aplicação de óleo vegetal como meio isolante em Equipamentos Elétricos, em Substituição ao Óleo Mineral”. Instituto de Engenharia do Paraná, 2007.
- [2] K. R. O. E. Amanda, “Aplicação de óleo vegetal para transformadores”. Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- [3] E. Kuffel; W.S. Zaengl; J. Kuffel, “High voltage engineering”. Newnes, 2000.
- [4] M. S. Naidu, V. Kamaraju, “High voltage engineering”. United States of America, McGraw-Hill Ltd, 1996.
- [5] D. J. Smith, S. G. McMeekin, B. G. Stewart and P. A. Wallace, “The Electric Field Modelling of a High Voltage Bushing with Contaminants on the Lower Porcelain Surfaces”. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Oct 2011. Pages 555 – 558.
- [6] M. Milasch, “Manutenção de transformadores em líquido isolante”. São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1984.