

Análise Dielétrica e Metodologia de Amostragem para Ensaios Dielétricos em Transformadores de Potência

Daniela M. Bueno, Leonardo H. Medeiros, Matheus S. Quintiliano, Antônio M. Kaminski, Gabriel C. Nogueira, Rafael C. Beltrame, Vitor C. Bender e Tiago B. Marchesan
Laboratório de Engenharia Assistida por Computador - INRI CAE
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria, RS, Brasil
Email: daanielambueno@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta a análise dielétrica de uma configuração de eletrodos de teste, capaz de representar o estresse elétrico interfacial ao longo da superfície dos componentes de isolamento de um transformador. O estudo baseou-se em curvas de projeto da indústria e no método do estresse elétrico cumulativo, bem como em modelagem e simulações empregando engenharia assistida por computador através do Método dos Elementos Finitos (MEF) no *software* Ansys Electronics® e análises no *software* MATLAB®. Os resultados apresentados permitem validar o modelo de testes, garantindo que a ruptura dielétrica ocorra na região desejada, para a realização de ensaios dielétricos experimentais. Além disso, com base em uma metodologia estatística, realizou-se a definição do número mínimo de amostras de papel necessário para a execução do ensaio dielétrico, com o intuito de garantir que se obtenham resultados com relevância estatística.

Index Terms—Análise dielétrica, configuração de eletrodos, estresse elétrico interfacial, relevância estatística, ruptura dielétrica, transformador.

I. INTRODUÇÃO

O transformador de potência é um dos ativos mais importantes e de elevado custo do sistema elétrico de potência [1]–[3]. Sua importância está diretamente relacionada à continuidade no fornecimento de energia elétrica, que pode ser interrompida em caso de falhas ou defeitos que venham a ocasionar a perda do equipamento [4]. A confiabilidade desses equipamentos depende sobretudo de seu sistema de isolamento que, por sua vez, deve suportar não somente as solicitações dielétricas provenientes de sua operação normal, mas também, as originadas de diferentes sobretensões durante os testes de fábrica e em operação [5], [6].

Uma falha no sistema de isolamento pode causar prejuízos técnicos, com a interrupção do fornecimento de energia, e financeiros, com multas, reparo ou substituição do transformador. Por essa razão, o projeto dielétrico é extremamente criterioso, sendo considerado um ponto primordial no dimensionamento de um transformador. Ele deve atender às especificações de projeto e apresentar uma margem de segurança adequada para que a operação contínua do transformador seja garantida, sem comprometer o custo do equipamento [7], [8].

Por muitos anos, o projeto de transformadores imersos em líquido isolante baseou-se na combinação entre isolamento sólido de celulose e óleo mineral [9]. Testes extensivos realizados nesse sistema, bem como a experiência da indústria, levaram a práticas de projeto de sistemas de isolamento que satisfazem aos critérios de desempenho dielétrico definidos nos padrões de transformadores [10]. As limitações térmicas desses materiais impulsionaram a busca de novas soluções que permitissem a operação de transformadores em temperaturas mais elevadas. Como alternativa, foram desenvolvidos os papéis e cartões prensados sintéticos à base de aramida, com classe térmica superior aos isolantes celulósicos [11]. Além disso, a substituição do óleo mineral pelo éster natural, dado que estes óleos apresentam vantagens, como o menor impacto ao meio ambiente e maior segurança contra incêndio [12]. A suportabilidade dielétrica dessas novas soluções precisa ser investigada para que sua aplicação no projeto de sistemas de isolamento de transformadores de potência seja avaliada.

Nesse contexto, este trabalho apresenta a análise dielétrica de uma configuração de eletrodos de teste, a qual representa o estresse elétrico interfacial na superfície dos componentes de isolamento sólido. Para isso, baseou-se nas curvas de projeto da indústria e no método do estresse elétrico cumulativo, bem como em modelagem e simulações empregando engenharia assistida por computador através do Método dos Elementos Finitos (MEF) no *software* Ansys Electronics® e análises no *software* MATLAB®. O estudo tem como objetivo a validação do modelo de ensaio, permitindo a construção de uma unidade experimental para a realização de ensaios dielétricos. Tais experimentos visam a obtenção da curva de projeto, referente ao estresse de fluência, empregando óleo vegetal e aramida como materiais isolantes. Para isso, é preciso analisar as regiões de provável ruptura e garantir que ela irá ocorrer na região desejada, ou seja, na superfície do papel. Além disso, com base em uma metodologia estatística, realizou-se a definição do número mínimo de amostras de papel a serem testadas nos ensaios dielétricos para alcançar resultados com relevância estatística.

II. ESTUDO DIELÉTRICO DE TRANSFORMADORES

A. Caminhos Críticos de Análise

A ruptura dielétrica em fluido isolante é considerada um fenômeno muito complexo e ainda em estudo. Apesar de existirem muitas dúvidas, sabe-se que as descargas elétricas ocorrem em lacunas entre eletrodos, superfície dos eletrodos e volumes de óleo contido entre eletrodos. Sendo assim, existem três caminhos críticos, que representam a maioria dos pontos suscetíveis a descargas elétricas internas no transformador, a serem analisados [13], [14]:

- Descarga superficial: ao longo de superfícies de barreiras sólidas próximas à pontos de elevado campo elétrico;
- Eletrodo isolado ou não isolado: entre um eletrodo com potencial elétrico diferente de zero e um plano de terra com potencial igual a zero;
- Lacunas de óleo ou dutos internos: formadas entre duas estruturas de isolamento sólida.

Conforme apresentado no primeiro item, um componente crítico do projeto do sistema de isolamento, situa-se ao longo da superfície dos componentes de isolamento sólido, onde podem existir tensões interfaciais ou de fluência. No ponto onde as linhas equipotenciais cruzam a superfície de um determinado isolante sólido, haverá uma diferença de potencial que resulta em um estresse elétrico tangencial à sua superfície. O projetista do sistema de isolamento deve garantir que as tensões ao longo da interface sólido-líquido estejam dentro dos limites aceitáveis [10].

B. Curvas de Projeto

Para cada um dos três caminhos críticos, foram obtidas curvas de projeto (do inglês, *design curves*), as quais indicam o máximo campo elétrico que o óleo isolante dos transformadores deve suportar sem que haja ruptura da sua isolamento elétrica. Essas curvas, descritas por Moser [15], foram desenvolvidas entre os anos de 1950 e 1980 e são utilizadas até hoje por muitos fabricantes em projetos dielétricos. Baseiam-se na probabilidade de descarga de 1% para aplicação de tensão alternada em frequência industrial pelo tempo de um minuto, definido como o teste padrão [15], [16].

Tais curvas foram obtidas para o óleo mineral isolante. Alguns estudos indicam que o comportamento para o óleo vegetal isolante é semelhante [10], [17], [18]. Outros estudos, no entanto, apontam diferenças [19]. Como baseiam-se no ensaio padrão de um minuto, quando se faz uma análise sobre um ensaio diferente do padrão, é preciso realizar as correções das características das curvas resultantes para que possam ser comparadas com as curvas de projeto. Essas correções são feitas por meio do uso do fator de nível de isolamento (do inglês, *design insulation level factor*) [13], [14].

C. Método dos Elementos Finitos

Diante da grande variabilidade de geometrias de eletrodos ou configurações de isolamento de um transformador, torna-se complexo e pouco viável a obtenção de um equacionamento analítico do campo elétrico. Por conta disso, faz-se necessário

uma ferramenta capaz de realizar o mapeamento de tensão e campo elétrico, de maneira eficaz, para qualquer formato geométrico de eletrodos e de isolamento de transformadores [7].

Para esta finalidade, utiliza-se o Método dos Elementos Finitos (do inglês, *Finite Element Method - FEM*), uma poderosa técnica computacional de soluções aproximadas, para uma variedade de problemas de engenharia com domínios complexos, descritos através de equações diferenciais parciais com determinadas condições de contorno [20]. A ideia básica do MEF é encontrar a solução de um problema complicado, substituindo-o por um mais simples [21].

D. Método do Estresse Elétrico Cumulativo

A partir dos dados da distribuição de tensão e campo elétrico mapeados via MEF, utiliza-se uma metodologia matemática, chamada de Método do Estresse Elétrico Cumulativo (do inglês, *Cumulative Stress Method*). O método consiste em calcular o gradiente de tensão elétrica acumulado ao longo de um caminho crítico pré-definido, sujeito a descargas elétricas no interior de um transformador, a partir da distribuição de tensão elétrica, à qual ele está sujeito [22].

Como resultado, obtém-se um perfil resultante de estresse cumulativo em função da posição no caminho, que pode ser comparado com as curvas de projeto. Através da comparação entre as curvas, é possível constatar se o projeto dielétrico do transformador encontra-se dentro dos padrões. Se o perfil resultante estiver totalmente abaixo da respectiva curva de projeto, então o projeto é considerado satisfatório. Caso contrário, se alguma parte do perfil resultante estiver acima da curva de projeto, para aquele caminho, o projeto é considerado inseguro [23].

III. METODOLOGIA ESTATÍSTICA DE AMOSTRAGEM

A fim de avaliar com precisão a suportabilidade dielétrica dos materiais isolantes em transformadores de potência, é necessário estabelecer o número mínimo de amostras de papel a serem testadas para garantir uma caracterização estatística confiável do ensaio de ruptura dielétrica. Para isso, baseou-se em uma metodologia estatística proposta em [24], a qual calcula-se o tamanho da amostra de compósitos de polímero usados em testes de tração através das distribuições normal e Weibull. Visto que muitos estudos revelam que a distribuição de Weibull é a mais apropriada, o conservadorismo de ambas foi comparado.

Ao comparar os resultados de cada distribuição, verifica-se que o tamanho das amostras com base na distribuição Weibull e na distribuição normal são muito similares, sendo os valores baseados na distribuição normal ligeiramente maiores. Assim, verifica-se que a distribuição Weibull não leva a uma estimativa mais conservadora do tamanho da amostra, e que o tamanho da amostra com base em uma distribuição normal também é aplicável [24].

Dessa forma, escolheu-se o método baseado na distribuição normal para definição do tamanho das amostras de papel deste trabalho, principalmente por sua facilidade de compreensão, adotando as seguintes considerações [24]:

- Seja X_1, X_2, \dots, X_n uma amostra retirada de uma distribuição normal $N(\mu, \sigma^2)$, onde n é o tamanho da amostra, e μ e σ são a média e o desvio padrão da distribuição normal, respectivamente;
- A estatística $T = \frac{(\bar{X} - \mu)}{S/\sqrt{n}}$ segue a distribuição t de Student com $n - 1$ graus de liberdade, onde \bar{X} é a média da amostra e S é o desvio padrão da amostra;
- A distribuição t de Student é simétrica e, portanto, o limite superior e inferior de confiança de T com um nível de confiança de γ (ou $1 - \alpha$, onde α é denominado como nível de significância) são $1 - \alpha/2$ valor percentil $t_{1-\alpha/2}(n-1)$ e $\alpha/2$ valor percentil $t_{\alpha/2}(n-1)$, respectivamente.

Fazendo $T = \frac{(\bar{X} - \mu)}{S/\sqrt{n}}$ igual a $t_{1-\alpha/2}(n-1)$ obtém-se a equação (1), que pode ser transformada na equação (2).

$$n = \left(\frac{t_{1-\alpha/2}(n-1) \times S}{\bar{X} - \mu} \right)^2 \quad (1)$$

$$n = \left(\frac{t_{1-\alpha/2}(n-1) \times COV}{e} \right)^2 \quad (2)$$

onde $COV = S/\bar{X}$ representa o coeficiente de variação da amostra e $e = |\bar{X} - \mu|/\bar{X}$ denota o erro relativo ou precisão. A equação exata para e é $e = |\bar{X} - \mu|/\mu$, no entanto, como μ não está disponível, uma alternativa é substituir μ por \bar{X} .

Aplicou-se a metodologia assumindo um nível de confiança de 95% e um limite de erro relativo de 5%. A Tabela I apresenta os valores calculados utilizando os dados das amostras obtidos experimentalmente em [18]. O tamanho da amostra de papel (representado por N na Tabela I), pode ser determinado pelo método de tentativa e erro. Para garantir a precisão e a confiabilidade, N deve ser maior ou igual ao valor calculado em (2). Ou seja, deve-se supor o tamanho da amostra de papel N até que o resultado da equação (2) corresponda a um valor igual ou inferior a N . Sendo assim, para a realização do ensaio dielétrico considerando esses parâmetros, deve-se adotar o número mínimo de 37 amostras de papel.

Tabela I
PARÂMETROS USADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO TAMANHO DA AMOSTRA DE PAPEL.

Média da amostra (\bar{X})	193,5
Desvio padrão (S)	28,60
COV	0,14
N	37
Graus de liberdade ($N-1$)	36
Tabela t-Student ($t_{1-\alpha/2}(n-1)$)	2,028
n	35,94

IV. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Conforme mencionado anteriormente, um ponto crítico do projeto dielétrico do sistema de isolamento, situa-se ao longo da interface sólido-líquido. Por essa razão, através de simulações

realizadas no *software* Ansys Electronics® baseadas no MEF, uma configuração de eletrodos de teste foi analisada. Como o estresse elétrico de fluência ao longo da superfície do sólido é o objeto de estudo, deve-se garantir que o mesmo será o local crítico de ruptura dielétrica, ao realizar os ensaios dielétricos experimentais, e não em outros locais.

A configuração de eletrodos utilizada, baseada no modelo apresentado em [18], consiste em dois eletrodos de aço com 50 mm de diâmetro e 40 mm de altura, utilizados como eletrodo de alta tensão e eletrodo de aterramento, e uma abertura de 2 mm, utilizada para a inserção da amostra de papel. Todas as arestas dos eletrodos foram arredondadas com um raio de 5 mm para as arestas externas e 1 mm para as arestas internas. Com isso, busca-se evitar a ocorrência de descargas nas extremidades. O espaçamento entre os eletrodos foi variado para os valores de 10, 20 e 35 mm. Adotou-se como isolamento sólido um papel prensado com 2 mm de espessura [25]. Para todas as análises considerou-se o modelo dentro de uma câmara de polietileno, imerso em óleo vegetal isolante. As Figuras 1 e 2 apresentam, respectivamente, as dimensões dos eletrodos e sua representação 3D com a amostra de papel.

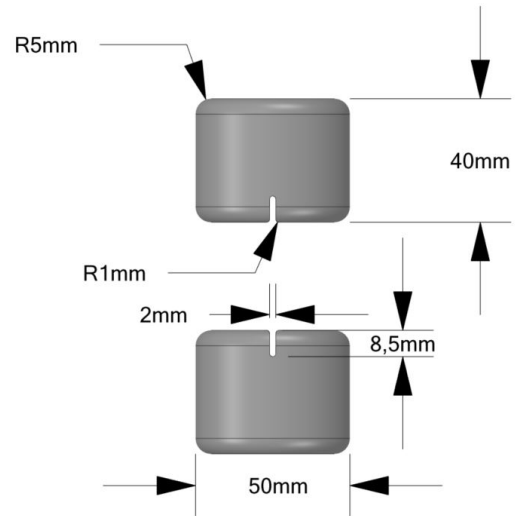


Figura 1. Vista lateral dos eletrodos.

As simulações são realizadas em um corte 2D da geometria em que é feita a análise eletrostática, o que representa os mesmos resultados da configuração 3D original. Foram aplicados níveis de tensão impulsiva de 1,2/50 μ s conforme a NBR 5356-3 [26], de 50 a 500 kV, com passo de 50 kV, totalizando 10 diferentes níveis de tensão. Dessa forma, para cada nível de tensão, obteve-se a distribuição das linhas equipotenciais e do campo elétrico ao longo da estrutura analisada. As Figuras 3 e 4 demonstram as distribuições obtidas para um nível de tensão de 500 kV.

Na Figura 3, observa-se a distribuição das linhas equipotenciais partindo do eletrodo superior (eletrodo de alta tensão) em direção ao eletrodo inferior (eletrodo de aterramento). Na Figura 4, percebe-se as regiões onde há a maior concentração

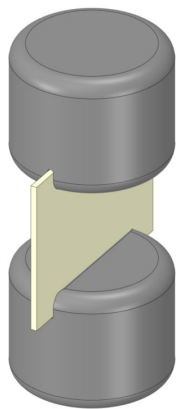


Figura 2. Representação 3D dos eletrodos com a amostra de papel.

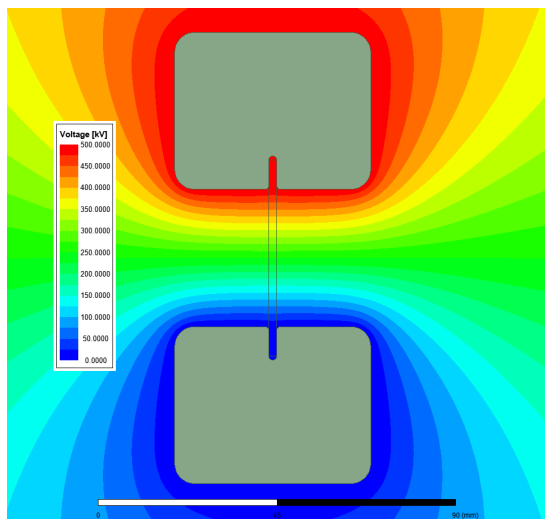


Figura 3. Distribuição das linhas equipotenciais para 500 kV.

de campo elétrico, sendo elas nas arestas internas e externas dos eletrodos. Para os demais níveis de tensão simulados, o comportamento das distribuições de tensão e campo elétrico é análogo, apresentando apenas magnitudes diferentes.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, é possível analisar os caminhos críticos da configuração e obter os perfis resultantes referentes ao método do estresse elétrico cumulativo, conforme discutido nas seções anteriores.

V. RESULTADOS

Para garantir que o estresse tangencial da interface sólido-líquido seja a região crítica de ruptura, o estresse de fluência da configuração deve ficar acima da respectiva curva de projeto, ou seja, maior que o limite de projeto. Já o estresse no óleo, deve ficar abaixo da respectiva curva de projeto, em outras palavras, menor que o limite de projeto [10]. Dessa forma, é possível validar a configuração de eletrodos de teste, de forma que a ruptura dielétrica esteja relacionada ao estresse elétrico de fluência.

Após o final da simulação, são traçadas linhas nos trechos em que se deseja explorar o comportamento dielétrico. Para

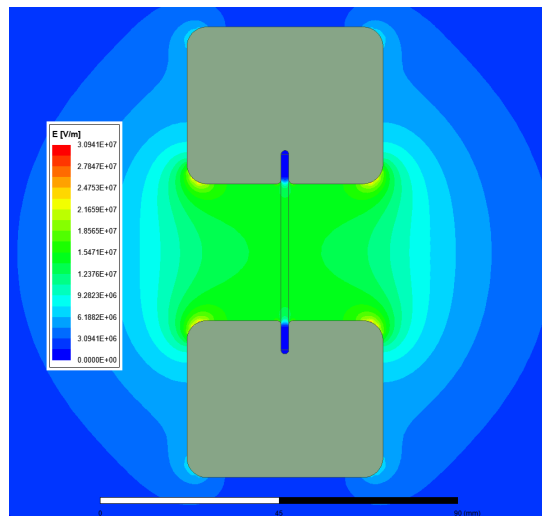


Figura 4. Distribuição da intensidade de campo elétrico para 500 kV.

analisar o estresse elétrico de fluência, traçou-se uma linha, representada pela cor vermelha na Figura 5, que se inicia nas bordas internas dos eletrodos e percorre a superfície do isolamento sólido. Para analisar o estresse no óleo, uma linha representada pela cor azul na Figura 5 foi traçada no caminho de óleo entre as bordas externas dos eletrodos. Note que os caminhos definidos referem-se aos caminhos críticos de descarga superficial e de eletrodo não isolado, abordados nas seções anteriores.

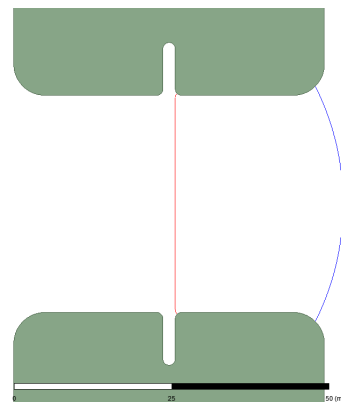


Figura 5. Caminhos críticos.

Com as linhas traçadas para os dois tipos de análise, obtém-se os dados de tensão ao longo de todo o trecho analisado. Em seguida, exportam-se os dados de cada simulação para que sejam avaliados. Por fim, utiliza-se o *software* MATLAB® para realizar a aplicação do método do estresse elétrico cumulativo e obter as curvas que representam o estresse elétrico cumulativo dos caminhos críticos.

Após aplicado o método, para cada variação de distância entre eletrodos, obteve-se dois resultados: um referente ao caminho de descarga superficial e outro ao de eletrodo não isolado. Esses resultados contêm a curva de projeto, referente

ao tipo de análise realizada, sendo comparada com as curvas geradas pelo método do estresse elétrico cumulativo para os diferentes níveis de tensão.

Nas Figuras 6 e 7, são apresentados os gráficos referentes à descarga superficial e eletrodo não isolado, para um espaçamento de 10 mm entre os eletrodos. A partir dos resultados, observa-se que na análise de descarga superficial (Figura 6) a probabilidade de 1% de ocorrer a ruptura dielétrica nessa região acontece para um nível de tensão de 150 kV, pois a curva gerada pelo método do estresse elétrico cumulativo correspondente a esse nível de tensão foi a primeira curva a interceptar a curva de projeto. De forma análoga, em relação à análise de eletrodo não isolado (Figura 7), a probabilidade de 1% de ruptura ocorre para um nível de tensão de 250 kV.

Sendo assim, percebe-se que, na região de fluência, a probabilidade de 1% de ruptura dielétrica ocorre para níveis de tensão menores que os exigidos pela região de eletrodo não isolado. Portanto, garante-se que para um nível de tensão de até 250 kV, o local crítico será a região de fluência, ou seja, a ruptura do dielétrico poderá ocorrer na superfície do isolamento sólido e não na região de eletrodo não isolado.

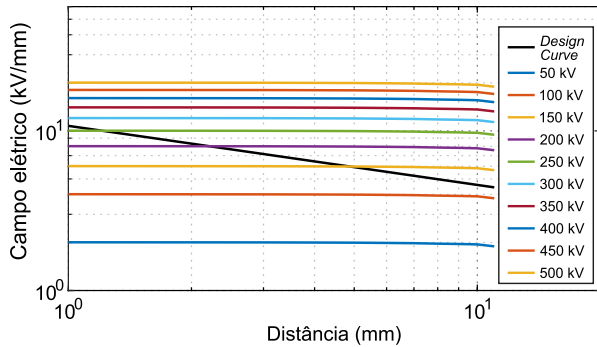


Figura 6. Resultados para descarga superficial para espaçamento de 10 mm.

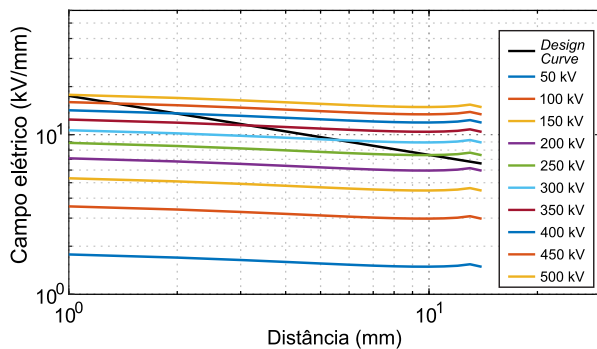


Figura 7. Resultados para eletrodo não isolado para espaçamento de 10 mm.

Da mesma maneira, as Figuras 8 e 9 apresentam os resultados para um espaçamento de 20 mm entre eletrodos. Neste caso, para a análise de descarga superficial (Figura 8) a probabilidade de 1% de ruptura ocorre para 200 kV e para a análise de eletrodo não isolado (Figura 9), para 350 kV. Dessa forma, a região de fluência será o local crítico para um nível de tensão de até 350 kV.

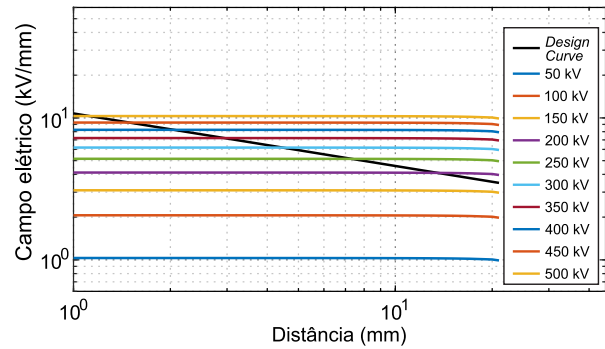


Figura 8. Resultados para descarga superficial para espaçamento de 20 mm.

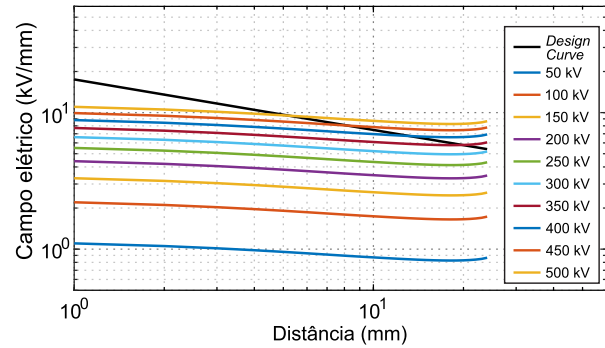


Figura 9. Resultados para eletrodo não isolado para espaçamento de 20 mm.

Por fim, obteve-se os resultados para um espaçamento de 35 mm entre eletrodos, mostrados pelas Figuras 10 e 11. Nessa situação, a probabilidade de 1% de ruptura dielétrica acontece para um nível de tensão de 250 kV para a análise de descarga superficial (Figura 10) e 450 kV para a análise de eletrodo não isolado (Figura 11). Assim, até 450 kV a região de fluência também será o local crítico.

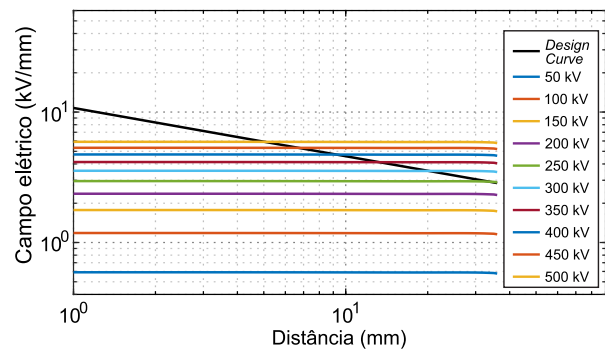


Figura 10. Resultados para descarga superficial para espaçamento de 35 mm.

A partir desses resultados, conclui-se que a configuração de eletrodos utilizada garante que o estresse elétrico de fluência ao longo da superfície do papel será a região crítica de análise. Dessa forma, espera-se que para as 37 amostras de papel definidas pela metodologia estatística, a ruptura dielétrica ocorra na superfície do isolamento sólido durante os ensaios. Além disso, percebe-se que conforme aumenta-se o espaçamento

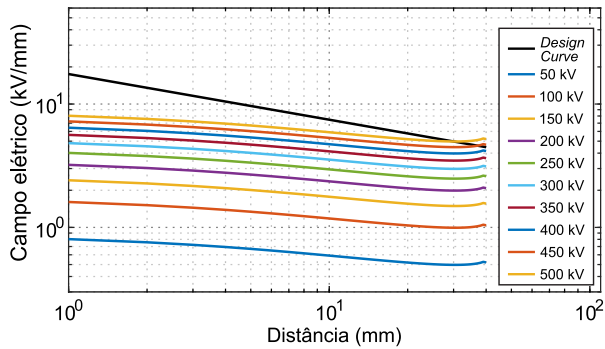


Figura 11. Resultados para eletrodo não isolado para espaçamento de 35 mm.

entre eletrodos, maior é o nível de tensão exigido para que a probabilidade de 1% de ruptura ocorra.

VI. CONCLUSÃO

Este artigo propôs a análise dielétrica de uma configuração de eletrodos de teste capaz de representar o estresse elétrico presente na interface óleo-papel do sistema de isolamento de um transformador de potência. Além disso, apresentou-se uma metodologia estatística para a definição do número mínimo de amostras de isolamento sólido necessário para a realização dos ensaios dielétricos. Ao analisar os resultados obtidos através das simulações computacionais empregando o MEF e pelo método do estresse elétrico cumulativo, é possível validar a configuração de eletrodos como um modelo de ensaio que garante que a ruptura dielétrica ocorrerá na região de interesse, na superfície do papel, e não no caminho de eletrodo não isolado. Dessa forma, torna-se possível a realização de ensaios dielétricos em uma unidade experimental, para que a suportabilidade à fluência do cartão prensado de aramida imerso em óleo vegetal isolante seja investigada. Com relação ao número de amostras de papel obtido pela metodologia estatística, evidencia-se a importância de se ter um número relativamente grande de corpos de prova, necessários para alcançar resultados com relevância estatística.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer o apoio técnico e financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da UFSM e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCT-GD).

REFERÊNCIAS

- [1] M. F. Al Hamdani, R. Azis Prasajo, Suwarno, and A. Abu-Siada, "Power transformer degradation condition and insulation index estimation based on historical oil dat," in *2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS)*, 2019, pp. 1–5.
- [2] D. K. Mahanta and S. Laskar, "Investigation of transformer oil breakdown using optical fiber as sensor," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, pp. 316–320, 2018.
- [3] M. R. Hussain, Q. Khan, A. A. Khan, S. S. Refaat, and H. Abu-Rub, "Dielectric performance of magneto-nanofluids for advancing oil-immersed power transformer," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 163 316–163 328, 2020.
- [4] C. d. J. Ribeiro, A. P. Marques, C. H. B. Azevedo, D. C. P. Souza, B. P. Alvarenga, and R. G. Nogueira, "Faults and defects in power transformers - a case study," in *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 142–145.
- [5] Z. Wang, L. Pang, T. Wang, H. Yang, Q. Zhang, and J. Li, "Breakdown characteristics of oil-paper insulation under lightning impulse waveforms with oscillations," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 2620–2627, 2015.
- [6] W. Ries, *Transformadores - Fundamentos para Projeto e Cálculo*. EDIPUCRS, 2007.
- [7] O. Iaronka, "Metodologia para dimensionamento do projeto dielétrico de transformadores," Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.
- [8] D. L. P. Feil, "Substituição de transformadores de potência em subestações de energia: uma estratégia global," Master's thesis, Universidade Federal de Santa Maria, 2019.
- [9] J. Duart and L. C. Bates, "Aging of high temperature insulation systems with alternative fluids," in *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010, pp. 1–5.
- [10] T. A. Prevost, "Dielectric properties of natural esters and their influence on transformer insulation system design and performance — an update," in *2009 IEEE Power Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1–7.
- [11] B. S. Kang, M. R. Levit, R. P. Marek, R. C. Wicks, and R. L. Provost, "Development of a new solid insulation for liquid-immersed transformers," in *2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2014, pp. 344–347.
- [12] D. M. Mehta, P. Kundu, A. Chowdhury, V. K. Lakhiani, and A. S. Jhala, "A review on critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, no. 2, pp. 873–880, 2016.
- [13] L. H. Medeiros, "Desenvolvimento de um programa computacional para análise dielétrica de transformadores de potência imersos em óleo isolante," Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- [14] W. Ziomek, K. Vijayan, D. Boyd, K. Kuby, and M. Franchek, "High voltage power transformer insulation design," in *2011 Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2011, pp. 211–215.
- [15] H. P. Moser, *Transformerboard*. Scientia Electrica, 1979.
- [16] T. B. Marchesan and D. F. Harmel, "Emprego do óleo vegetal isolante em transformadores de potência: uma abordagem dielétrica," in *Décimo Quinto Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÊ.*, 2013.
- [17] K. J. Rapp, J. Corkran, C. P. Mcshane, and T. A. Prevost, "Lightning impulse testing of natural ester fluid gaps and insulation interfaces," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 6, pp. 1595–1603, 2009.
- [18] S. Haegele, F. Vahidi, S. Tenbohlen, K. Rapp, and A. Sbravati, "Investigation of interfacial surface creep breakdown at oil-pressboard interfaces in natural ester liquid and mineral oil," in *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, 2017, pp. 1–5.
- [19] Rongsheng Liu, C. Tornkvist, V. Chandramouli, O. Girlanda, and L. A. A. Pettersson, "Ester fluids as alternative for mineral oil: The difference in streamer velocity and li breakdown voltage," in *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2009, pp. 543–548.
- [20] E. Madenci and I. Guven, *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*. Springer, 2015.
- [21] S. S. Rao, *The Finite Element Method in Engineering*. Butterworth-Heinemann, 2011.
- [22] J. H. Junior, "Otimização do projeto dielétrico de transformadores de distribuição por meio de simulações em elementos finitos," Master's thesis, Universidade Federal de Santa Maria, 2018.
- [23] J. Nelson and C. Shaw, "The impulse design of transformer oil-cellulose structures," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 3, pp. 477–483, 2006.
- [24] Y. Yang, W. Li, W. Tang, B. Li, and D. Zhang, "Sample sizes based on weibull distribution and normal distribution for frp tensile coupon test," *Materials*, vol. 12, no. 126, p. 10, 2019.
- [25] *Dupont Nomex® Pressboard*, DuPont. [Online]. Available: <https://www.dupont.com.br/products/nomex-900-series0.html>
- [26] "Transformadores de potência - parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar," *ABNT NBR 5356-3*, pp. 1–44, 2007.