



XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CB/GTM/07

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - XIII

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

ESTUDO COMPARATIVO DA RIGIDEZ DIELÉTRICA EM CONDIÇÕES DE CAMPO NÃO HOMOGÊNEO EM
ÓLEOS VEGETAIS E MINERAIS

Alan Sbravati(*)
CARGILL - CIS

Kevin J. Rapp
CARGILL - CIS

Stephanie Haegele
IEH - University of Stuttgart

Stephan Tenbohlen
IEH - University of Stuttgart

RESUMO

Ensaio para avaliação da rigidez dielétrica do óleo vegetal devem levar em conta as particularidades do líquido ensaiado, especialmente sua maior viscosidade e absorção de umidade. Para condições de campo homogêneos e levemente não homogêneos já existem comprovações da equivalência entre o OVI e o OMI. Neste trabalho investigou-se o nível de concentração de campo que resulta em divergências entre os líquidos isolantes. Obteve-se valores de rigidez dielétrica inferiores para o OVI somente para o ensaio de impulso atmosférico e em geometrias que seriam consideradas inaceitáveis para um transformador, tais como no eletrodo tipo "agulha" com 0,12mm.

PALAVRAS-CHAVE

Óleo Vegetal; Éster Natural; Projeto de Dielétrico; Campos Concentrados, Rigidez Dielétrica

1.0 - INTRODUÇÃO

O uso de óleos vegetais como meio isolante líquido em transformadores de potência oferece muitas vantagens em comparação com os óleos minerais convencionais, incluindo, por exemplo, a segurança a incêndios, em função dos pontos de fulgor e combustão bem mais altos, o maior limite de saturação para umidade e a sustentabilidade ambiental. Apesar de diversos *papers* e estudos confirmarem que a capacidade dielétrica dos óleos vegetais, serem equivalente a do óleo mineral para os elementos construtivos típicos de transformadores, estudos com distribuições de campo extremamente não homogêneas indicam valores de tensão de ruptura mais baixos para os óleos de base vegetal. Este estudo foi desenvolvido para investigar mais profundamente a influência da distribuição do campo eléctrico na rigidez dielétrica de óleos de origem vegetal, em comparação com os óleos minerais.

Foram realizados testes dielétricos em gap de óleo utilizando diferentes configurações experimentais e diferentes tipos de tensão de excitação. A tensão de ruptura para impulso atmosférico padrão de 1,2 / 50 μ s foi medida com base na norma ASTM D3300. Diferentes eletrodos foram utilizados, com diferentes distâncias de separação (gaps), de maneira a representar diversos níveis não homogeneidade do campo eléctrico. A distribuição de campo menos não homogênea foi obtida usando dois eletrodos de esfera, com gaps pequenos. Já para a condição de campo extremamente não homogêneo, também definido como altamente concentrado ou divergente, os eletrodos de esfera foram substituídos por um eletrodos de agulha com diferentes raios de ponta, até 0,12mm.

Os resultados de ensaios dielétricos dependem da estrutura química dos líquidos utilizados, podendo não ser os mesmos para diferentes óleos minerais e também para variações de óleos vegetais. Por isso, consideramos essencial a informação dos óleos utilizados, que nesse estudo foram o Envirotemp™ FR3™ como óleo vegetal e o Lyra X como o óleo mineral. Ambos os óleos passaram por tratamento de secagem e desgaseificação, para um teor de umidade relativa de inferior a 15% de saturação antes do início dos ensaios.

Os resultados obtidos para as distribuições de campo eléctrico homogêneo e não homogêneo confirmaram valores de rigidez dielétrica bastante próxima para ambos os óleos. No entanto, assim como já reportado por estudos de outros institutos e universidades, em campos eléctricos extremamente concentrados, foi identificada uma queda da tensão de ruptura nos óleos vegetais em comparação com o óleo mineral. Essa diferença é devida a diferenças na estrutura química e dos mecanismos de descarga dos óleos vegetais em relação ao óleo mineral.

Neste trabalho, com a utilização de cinco eletrodos diferentes, ensaiados em diferentes distâncias de separação, foi possível identificar o limite de transição, o valor máximo de concentração de campo onde a capacidade dielétrica dos óleo vegetal ainda pode ser considerada equivalente a do óleo mineral. Para permitir o uso dos resultados com diferentes geometrias, foram utilizados os conceitos dos "fatores de Schwaiger", onde a geometria é convertida em fatores adimensionais "p" e "q", para indicação dos resultados.

2.0 - INTRODUÇÃO TEÓRICA

Os ensaios dielétricos aplicados para avaliação da rigidez dielétrica de líquidos isolantes podem ser classificados em três grupos essenciais: testes representativos de elementos construtivos de transformadores, investigações do fenômeno e da propagação de descargas e avaliação do comportamento "em serviço" a longo prazo. Para definição dos critérios de projeto para transformadores, o primeiro grupo é o mais importante. O entendimento do processo de ignição e propagação de descargas também pode ter implicações para o projeto, muitas vezes como um ensaio "em escala", ainda que os eletrodos utilizados não sejam representativos de elementos reais de um transformador de potência corretamente projetado e fabricado. O terceiro grupo de ensaios está altamente relacionado com o desempenho a longo prazo e a os critérios de manutenção.

Considerando que a simulação de todas as possíveis configurações de transformadores seria virtualmente impossível, a abordagem geralmente utilizada é a definição das estruturas mais críticas e a realização de ensaios comparativos entre a solução em investigação e a tradicional, em óleo mineral. Uma extensa matriz de ensaios, em sua maioria representando elementos construtivos, foi proposta e realizada. Mais detalhes nas referências [1] a [5].

Tendo como base os ensaios representativos de elementos construtivos de transformadores, ajustando eletrodos e procedimentos de ensaio conforme as particularidades dos óleos vegetais, observa-se que os resultados de diversos estudos concordam com a equivalência de valores de rigidez dielétrica entre o óleo vegetal e o óleo mineral. Divergências são observadas nos ensaios de campos altamente concentrados, não representativos de elementos de um transformador, uma vez que, especialmente nas classes de tensão mais elevadas, todos os fabricantes de alta qualidade tem regras e procedimentos rígidos de controle quanto a presença de cantos vivos. Em termos práticos, a maioria dos fabricantes adota arredondamento das bordas em valores mínimos de cerca de 3 mm ou algumas construções especiais com valores não inferiores a 1 mm, com proteções adicionais. Arestas com menos de 1 mm de arredondamento são inaceitáveis para a maioria, senão totalidade, dos fabricantes.

A investigação da ignição e propagação de descargas geralmente usa eletrodos de tipo "agulha". Com um raio de ponta de 60 μ m, atinge-se níveis de concentração do campo extremamente elevados. Este ensaio permite atingir gradientes de tensão (kV/mm) bem altos sem a necessidade de tensões elevadas, como um ensaio de escala. Enquanto um importante critério de projeto de transformadores é a tensão de ignição de descarga parciais (PDIV,

da sigla em inglês), tais ensaios geralmente aplicam níveis de tensão entre os valores de ignição e de ruptura. A definição de critérios de projeto a partir destes ensaios requer conhecimentos de especialistas. As diferenças identificadas podem ou não trazer impactos para diferentes elementos construtivos de um transformador. Tendo-se em conta resultados como os apresentados em [6], onde os valores de tensão para ignição de descargas parciais nos óleos vegetais são superiores aos valores do óleo mineral e de outros líquidos isolantes, conclui-se que haverá vantagens para os transformadores em óleo vegetal que sejam projetados para serem livres de descargas parciais, melhorando a segurança do projeto.

A avaliação do comportamento em serviço é também extremamente relevante, porém ainda mais desafiadora, uma vez que requer a "simulação" de condições de envelhecimento. O principal desafio está nas diferenças entre os processos de degradação dos líquidos isolantes, dificultando a validação da "equivalência" entre as condições de ensaio aplicadas. Geralmente são inseridos teores de umidade e de material particulado em amostras de óleo novo, buscando avaliar a variação da rigidez dielétrica em tais situações.

O estudo apresentado neste trabalho está sendo realizado em várias etapas. Apesar de ter como foco elementos construtivos de transformadores, o escopo do estudo inclui eletrodos para campos concentrados, altamente inhomogêneos, buscando assim avaliar o limite de equivalência da rigidez dielétrica entre os distintos líquidos. Em etapas futuras serão também repetidos os ensaios sob diferentes condições de umidade e teor de partículas, para avaliação do comportamento a longo prazo.

3.0 - TÉCNICAS DE MEDIÇÃO E SIMULAÇÃO DE CAMPO

3.1 Procedimento de medição

Ensaio de impulso atmosférico com diferentes níveis de inhomogeneidade de campo, para distâncias entre eletrodos de 10 mm, 25 mm, 40 mm e 50 mm, aplicando dez descargas em cada configuração, sempre à temperatura ambiente. Tendo uma esfera de 12,7 mm (1/2") de diâmetro como o eletrodo aterrado, e como eletrodo de aplicação de tensão, um conjunto de eletrodos incluindo: esfera de 12,7 mm, eletrodo com ponta terminando em diâmetro de 3 mm, 0,8 mm e 0,6 mm e uma agulha de 0,12 mm. Os eletrodos são mostrados na Fig. 1. Os eletrodos do tipo "agulha" foram verificados quanto ao seu desgaste com microscópio eletrônico de varredura (SEM) após cada ensaio de impulso atmosférico. Duas células de medição diferentes, uma para medições até 250 kV e outra até 600 kV, foram utilizadas. Ensaio preliminares foram realizados para excluir possíveis efeitos volumétricos.

A formação de bolhas durante o processo de enchimento de cada célula exige tempos de espera mais longos antes do início dos ensaios. Os tempos mínimos requeridos foram de pelo menos cinco minutos para os ensaios com o óleo mineral Lyra X (OMI) e de pelo menos 15 minutos para os ensaios com óleo vegetal Envirotemp FR3 (OVI). O teor de umidade relativa foi mantido inferior a 12% para todos os ensaios.

Para o ensaio de impulso (1,2 / 50 μ s) com polaridade negativa, o aumento da tensão foi realizado com base na ASTM D3300, em passos de 10 kV começando aproximadamente 40 kV abaixo do nível de tensão de ruptura esperado com pelo menos três níveis sem ocorrência de descarga antes do nível de ruptura. Os eletrodos de esfera foram polidos após cinco descargas, enquanto que os eletrodos mais pontiagudos foram polidos após cada descarga e os eletrodos de agulha precisaram ser substituídos após cada descarga.

Foi identificado que o desgaste dos eletrodos pontiagudos, mesmo com diâmetro de 3 mm, especialmente nos ensaios com altas tensões, leva a uma considerável redução da rigidez dielétrica se eles não forem polidos após cada descarga. Essa redução do nível de ruptura devido ao desgaste é observada já na segunda descarga após o polimento. Em tensões elevadas (por exemplo, eletrodo de 3 mm com gap de 25 mm e tensão média de ruptura em 500 kV), a redução do nível de suportabilidade atinge até 100 kV após algumas descargas. Em tensões superiores a 450 kV, a célula de ensaio precisou ser imersa num tanque de óleo maior, para evitar o flashover para o meio externo. O óleo da célula foi substituído após cada descarga.



FIGURA 1 – Eletrodos de diferentes diâmetros usados nos experimentos. Esfera de 12,7mm, eletrodos com ponta de diâmetro de 3mm, 0,8mm e 0,6mm e agulha de 0,12mm de diâmetro.

A tensão de ruptura AC (ensaio à frequência industrial) foi determinada usando um incremento de tensão de 3% (deve ser entre 1 e 6%) da tensão de ruptura esperada e tempo de permanência de um minuto em cada nível de tensão. Os eletrodos de esfera e os pontiagudos foram polidos após dez descargas e os eletrodos de agulha foram substituídos após cada descarga. Adicionalmente às investigações em [7], ensaios preliminares foram feitos para determinar a faixa de intervalos quando seria necessária a substituição de óleo, para ambos os óleos. Os resultados não mostraram nenhuma influência na tensão de ruptura com a substituição do óleo após dez descargas. Assim, o volume de óleo de cada célula foi substituído após dez descargas.

3.2 Simulação do fator de homogeneidade de campo

O valor de intensidade máxima de campo (kV/mm) é o fator determinante para ocorrência de descargas e, portanto, essencial para o projeto de isolamento de alta tensão. A intensidade de campo depende do nível de homogeneidade do campo elétrico, que pode ser expresso pelo conhecido "Fator de Schwaiger", que é definido como a relação entre a intensidade de campo média e máxima em (1).

$$\eta = E_{\text{mean}} / E_{\text{max}} \quad (1)$$

O fator de Schwaiger " η " pode ser correlacionado com duas características geométricas definidas como " p " e " q ", para quantificar o nível de homogeneidade do campo. Os parâmetros " p " e " q " são calculados em função do afastamento entre os eletrodos (gap) e pelos raios r e R das terminações dos eletrodos [8]. As equações para " p " e " q " são dadas por (2) e (3).

$$p = (s+r)/r \quad (2)$$

$$q = R/r \quad (3)$$

Na figura 2 são apresentadas combinações de " p " e " q " para configurações de eletrodo e gaps ensaiados. O primeiro passo foi a realização dos ensaios com os fatores " p " e " q " mais comuns, "configuração de ensaio padrão", que seriam os valores de inhomogeneidade mínimos (esfera-esfera) e máximo (esfera-agulha).

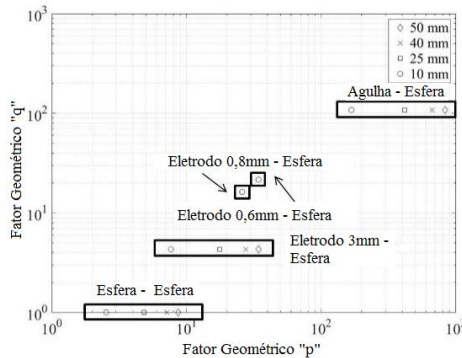


FIGURA 2 – Composição de fatores de geometria " p " e " q " das configurações de eletrodos e gaps testadas

Entre esses fatores mínimo e máximo, foram simuladas condições com valores intermediários, representativos de diferentes níveis de inhomogeneidade. O objetivo do diagrama p - q é avaliar a influência dos diferentes níveis de concentração, com base em parâmetros adimensionais, permitindo a extrapolação dos resultados.

O objetivo inicial deste projeto foi investigar a existência de um certo valor limite de η para o qual a rigidez dielétrica do óleo vegetal e do mineral podem ser consideradas como equivalentes e a intensidade da variação dessa diferença quando o nível de inhomogeneidade é crescente, tendo-se como premissa que a rigidez dielétrica do óleo vegetal, para os eletrodos de "agulha" é mais baixa do que a do óleo mineral, conforme em [9] para campos fortemente não homogêneos. Uma vasta gama de fatores " p " e " q " foram utilizados.

4.0 - RIGIDEZ DIELÉTRICA COMO FUNÇÃO DO NÍVEL DE INOMOGENEIDADE DE CAMPO

Os valores de rigidez dielétrica dos diferentes líquidos isolantes, para nível de confiança de 98% (distribuição de Weibull e normal para 2%) para níveis de homogeneidade de campo são apresentados na forma de gráficos. Os valores de rigidez foram determinados usando distribuições estatísticas tipo "Normal" e "Weibull" e comparados em gráficos de probabilidade. As figuras 3 e 4 mostram as curvas resultantes, como exemplo, para eletrodos de esfera de 12,7 mm com afastamento de 10 mm em OMI e OVI, para ensaios de tensão aplicada (AC) e impulso (LI). Para cada configuração foram determinados dez valores de rigidez (dez descargas).

A aplicação da distribuição normal leva sempre a resultados de suportabilidade mais altos do que a distribuição de Weibull. Os resultados de AC apresentaram desvio padrão entre os resultados maior do que os resultados de LI, levando a valores de suportabilidade consideravelmente mais baixos do que os valores médios para o ensaio AC.

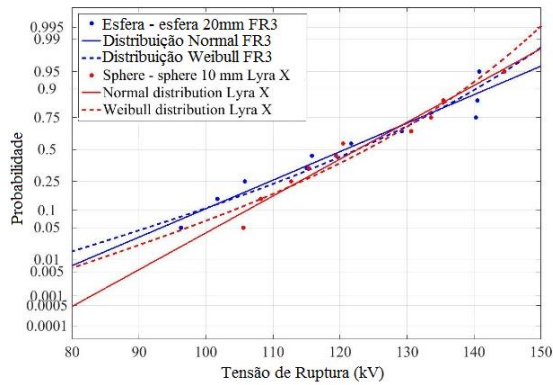


FIGURA 3 – Ensaio AC, esfera-esfera, gap 10 mm para óleo FR3 e Lyra. Dados para distribuição Weibull e Normal.

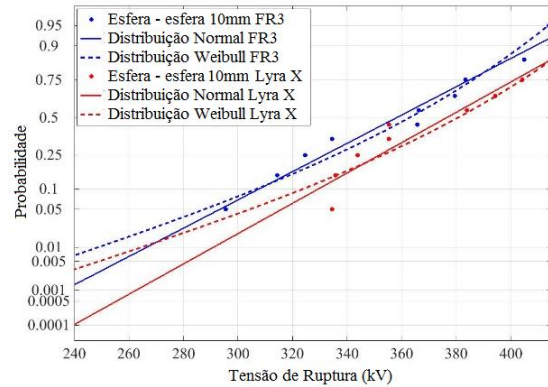


FIGURA 4 – Ensaio LI, esfera-esfera, gap 10 mm para óleo FR3 e Lyra. Dados para distribuição Weibull e Normal.

Em geral, a distribuição de Weibull se ajusta ligeiramente melhor do que a distribuição Normal para os dados AC medidos e a distribuição Normal se ajusta ligeiramente melhor com os valores de tensão de ruptura a impulso. Os valores de suportabilidade foram, portanto, definidos usando uma distribuição de Weibull 2% para o ensaio de tensão aplicada AC e distribuição normal 2% para os ensaios de LI.

4.1 Tensão Aplicada AC

A figura 5 apresenta os valores de ruptura médios AC para todas as configurações investigadas em OMI e OVI em função do nível de homogeneidade do campo “ η ”. As configurações de campo mais homogêneas resultaram nos maiores valores de tensão de ruptura para cada gap ensaiado. A redução do valor de tensão de ruptura em função do nível de inhomogeneidade ocorre para todos os eletrodos ensaiados, tanto em OMI quanto em OVI.

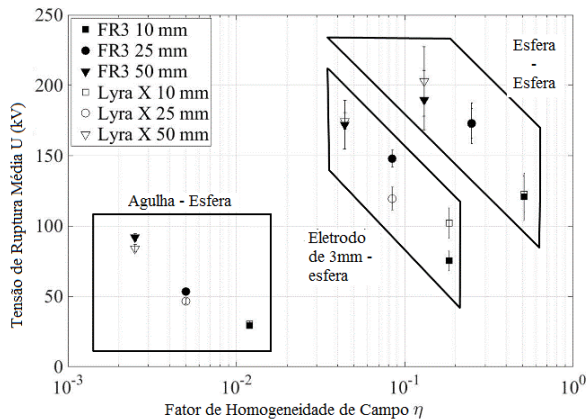


FIGURA 5 – Rigidez dielétrica média para tensão aplicada AC em OVI e OMI

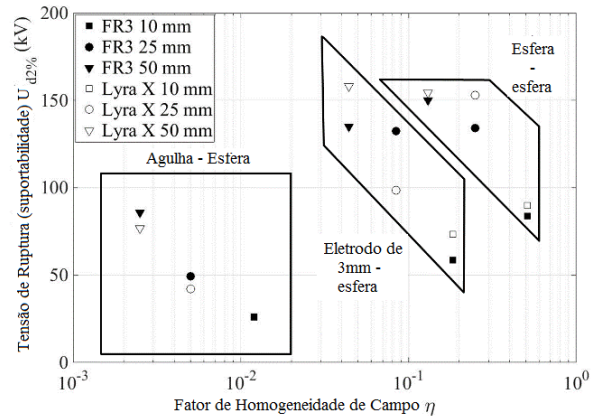


FIGURA 6 – Rigidez dielétrica em suportabilidade 2% para tensão aplicada AC em OVI e OMI

Os valores médios de tensão de ruptura para configurações de campo ligeiramente não homogêneas, como esfera-esfera são equivalente entre OMI e OVI. O desvio padrão de cada ensaio aumenta para os valores mais elevados de tensão de ruptura em ambos os líquidos, de maneira equivalente para ambos os líquidos, exceto para o eletrodo de 3mm e gap de 50 mm, onde o desvio padrão no OVI foi mais alto.

Os maiores desvios entre os resultados para os dois líquidos foram obtidos para o eletrodo de 3mm nos gaps de 10 mm e 25 mm. O OMI mostrou uma tensão de ruptura mais elevada para valores de inhomogeneidade de campo entre $0,1 < \eta < 0,2$ enquanto que o OVI mostrou tensão de ruptura superior para campos extremamente não homogêneos com $\eta < 0,1$ dada a quantidade limitada de pontos de medição. Não é possível definir um nível crítico de concentração de campo onde os resultados deixam de ser equivalentes, já que houve comportamentos inversamente proporcionais em alguns casos. Serão realizadas investigações adicionais, incluindo comparações entre tensão de ruptura e fatores p-q em vez de diretamente o Fator de Schwaiger “ η ”.

A comparação dos valores de suportabilidade 2% na Fig. 6 indica diferenças maiores entre OMI e OVI devido a influência do desvio padrão. Apesar de identificadas diferenças, não é possível estabelecer uma tendência ou regra, já que em alguns casos o resultado do OVI foi superior e em outros foi inferior ao do OMI. Para os eletrodos de agulha, onde era esperada uma redução mais significativa para o OVI, os ensaios resultaram em valores de suportabilidade no OVI superiores aos do OMI. Nenhuma conclusão geral pode ser extraída da comparação dos valores de desvio padrão entre os líquidos.

4.2 Impulso atmosférico LI

Na figura 7 podem ser comparados os valores de tensão de ruptura médios para todas as configurações investigadas para OVI e OMI, em função do nível de homogeneidade de campo. Diferentemente dos ensaios em AC, um desvio considerável da rigidez dielétrica média entre os líquidos isolantes pode ser identificado para configurações de campos muito concentrados (configurações de agulha-esfera). A rigidez dielétrica do OMI é quase duas vezes maior que a do OVI para os gaps de 25, 40 e 50 mm, e aproximadamente 50% maior para o gap de 10 mm.

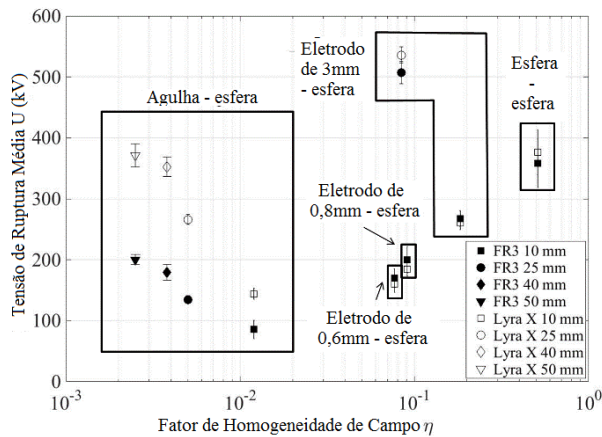


FIGURA 7 – Rigidez dielétrica média para impulso atmosférico em OVI e OMI

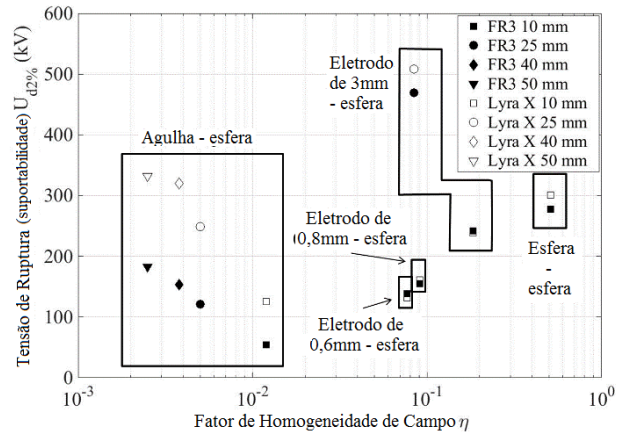


FIGURA 8 – Rigidez dielétrica em suportabilidade 2% para impulso atmosférico em OVI e OMI

A comparação dos diferentes eletrodos no gap de 10 mm pode ser representada aproximadamente por uma diminuição logarítmica, com a redução da tensão de ruptura em função da não homogeneidade do campo até $\eta = 0,0768$ para ambos os óleos. Com um η ligeiramente inferior, a tensão de ruptura do OMI interrompe a tendência de redução enquanto que no OVI a tendência se mantém com a crescente inhomogeneidade. As primeiras investigações apresentadas em [10] não revelaram diferença na tensão de ruptura para a não-homogeneidade relacionada às configurações de eletrodo de 3 mm, mas sim para configurações de agulha. Por isso, tomou-se a decisão de adicionar outras duas configurações intermediárias, com diâmetro de 0,6 mm e 0,8 mm.

Os resultados não mostram diferença na tensão de ruptura ou desvio padrão entre os dois líquidos para esses novos eletrodos no gap de 10 mm. Já nos ensaios com gap de 25 mm e 40 mm foi possível identificar a redução da tensão de ruptura com o aumento da concentração de campo, até um ponto no qual as diferenças não permitem mais considerar os resultados equivalentes. O intervalo de não-homogeneidade determinante para a não equivalência dos resultados entre o óleo mineral e o vegetal situa-se em fatores de Schwaiger entre $0,01 < \eta < 0,1$.

Na figura 8 são apresentados os resultados de suportabilidade 2% para os diferentes níveis de inhomogeneidade. Em geral, as tendências identificadas nos valores médios se confirmam nos valores de suportabilidade. O desvio padrão foi comparável para ambos os óleos em todas as configurações.

5.0 - DISCUSSÃO

As investigações iniciais deste projeto apresentadas em [10] permitiram identificar que o comportamento dielétrico de OVI poderia ser considerado equivalente ao do OMI até um nível de não homogeneidade representado por um eletrodo de 3 mm de diâmetro. Essa suposição não era válida para o eletrodo de agulha. Em função disso, a decisão foi refinar o intervalo entre os eletrodos de 3 mm e 0,12 mm, adicionando os diâmetros de 0,8 mm e 0,6 mm.

Os resultados desta segunda etapa de investigações mostraram que mesmo para um nível muito mais elevado de concentração de campo, tal como apresentado pelo eletrodo de 0,6 mm, o comportamento dielétrico é ainda equivalente. A divergência começa em níveis de concentração mais elevados do que esta, que já não são representativas de qualquer elemento de um transformador de potência.

Um ponto adicional a ser considerado é a aplicação do critério de projeto para transformadores de potência não limitado pela tensão de ruptura, mas sim pelo nível de ignição de descarga parcial (PDIV). Os requisitos de aprovação do transformador no ensaio de tensão induzida de longa duração com medição de descarga parcial (IVPD) como última revisão da [11] leva a utilização de critérios de projeto mantendo uma margem de segurança em relação ao nível de ignição de descargas parciais. A capacidade dielétrica superior do OVI em relação ao valor de ignição de descargas parciais resulta em maior margem de segurança. No entanto, o delta de tensão necessário para a transição de uma descarga parcial para uma descarga, para níveis de inhomogeneidade extremamente elevados, é menor para os óleos vegetais.

Ao avaliar os elementos de um transformador de potência de classe tensão alta ou extra-alta, pode-se concluir que, para o projeto dielétrico dos enrolamentos, núcleo e vigas, os critérios atualmente aplicados para transformadores em óleo mineral também são suficientes para os transformadores em óleo vegetal, já que são regiões de geometria bem controlada. Adicionalmente, a maior permissividade do OVI reduz o estresse no isolamento líquido, que é tipicamente o parâmetro crítico de projeto, bem como o valor mais elevado de tensão de ignição de descargas parciais aumentará a margem de segurança para o regiões onde pode haver concentração de tensão.

Para as regiões fora da parte ativa, onde costumam ser permitidas tolerâncias maiores de geometria e posicionamento, pode ser razoável considerar margens de segurança adicionais, que podem ser facilmente obtidas por adição de barreiras de isolamento sólido, por exemplo. Deste modo, as principais regiões a serem avaliadas mais em detalhe no projeto do transformador em OVI são as distâncias elétricas nas ligações internas, para as vigas e paredes laterais, as saídas dos enrolamentos e blindagens, eventualmente adicionando barreiras de isolamento sólido.

6.0 - CONCLUSÃO

Investigações mais aprofundadas do comportamento dielétrico dos óleos vegetais, sempre em comparação direta com o óleo mineral, são essenciais para aplicação em classes de tensão mais elevadas. Apesar da grande semelhança entre o óleo vegetal e o mineral em relação ao comportamento dielétrico, os líquidos são quimicamente diferentes, o que pode levar a resultados diferentes.

Os critérios de projeto de cada fabricante de transformadores são a base da sua diferenciação tecnológica. Diversos aspectos são considerados para a definição dos critérios, levando a diferentes soluções para uma mesma especificação técnica, com diferentes custos de materiais e de produção. A realização de investigações comparativas é essencial para permitir que cada fabricante mantenha suas práticas e filosofias de design.

A diferença identificada da tensão de ruptura entre o óleo mineral e o vegetal se limita a níveis de concentração de campo extremamente elevados, situados no fator de Schwaiger $0,01 < \eta < 0,1$. Essa informação é essencial para um projetista de transformadores, já que as tabelas normalmente disponíveis são baseadas em correlações entre o campo médio e máximo baseado nos fatores p-q. Tais tabelas foram desenvolvidas para óleo mineral e, com base neste estudo, podem ser aplicadas para éster natural na maior parte da sua gama.

No entanto, é essencial considerar as diferenças dos líquidos, especialmente a maior permissividade do éster natural, que afeta a distribuição do campo elétrico. Apesar dessas diferenças no comportamento dielétrico, não foram identificadas barreiras para a aplicação de óleos vegetais em quaisquer classes de tensão, AC ou CC.

7.0 - AGRADECIMENTO

Os autores gostariam de agradecer ao Professor Hossein Borsi, da Universidade de Hannover, pela frutífera discussão sobre o Fator de Schwaiger e sua aplicação.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) T. A. Prevost, "Dielectric Properties of Natural Esters and their Influence on Transformer Insulation System Design and Performance", Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2006 IEEE PES, Dalas, TX
- (2) T. A. Prevost, M. Francheck, K. Rapp, "Investigation of the dielectric design criteria for pressboard/natural ester interfacial stress", 75th Annual Intl. Doble Client Conf., April 6-11, 2008, Boston, USA
- (3) K. J. Rapp, J. Corkran, C. P. McShane, T. A. Prevost, "Lightning impulse testing of natural ester fluid gaps and insulation interfaces", IEEE Transaction Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 6, Dec. 2009
- (4) K. J. Rapp, C. P. McShane, J. Vandermaar, D. Vuković and S. Tenbohlen, "Long gap breakdown of natural ester fluid," IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application, Oct. 2010, New Orleans, USA.
- (5) K. J. Rapp, J. Vandermaar, M. A. Francheck, "Switching impulse of long oil gaps of natural ester fluid", Intl. Conf. on High Voltage Engineering and Application (ICHVEA), Sept. 17-20, 2012, Shanghai, China
- (6) E. Gockenbach, H. Borsi, B. Dolata, "Research project on the comparison of electric and dielectric properties of natural Ester fluid with a synthetic Ester and a Mineral based transformer oil: Report No. 2, Institute of Electric Power Systems, Division of High Voltage Engineering, Schering-Institute, University of Hanover, Germany, 2005
- (7) G. Pukel, "Elektrische Festigkeit von Isolieröl", Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2010
- (8) A. Schwaiger, "Elektrische Festigkeitslehre", 2nd Ed., Springer Berlin Heidelberg, 1925, pp. 450-451
- (9) R. Liu, C. Törnkvist, V. Chandramouli, O. Girlanda, L.A.A. Pettersson, "Ester Fluids as Alternative for Mineral Oil: The Differences in Streamer Velocity and LI Breakdown Voltage", 2009 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, Virginia, USA, October 18-21, 2009, pp. 543-548

- (10) S. Haegele, S. Tenbohlen, R. Fritsche, K. Rapp, A. Sbravati, "Characterization of inhomogeneous field breakdown in natural ester liquid compared to mineral oil," unpublished
- (11) IEC 60076-3, Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air.



Alan Sbravati é graduado pela Universidade de Campinas, Brasil, tem MBA em Gestão da FGV e Mestrado em Gerenciamento Project pela ILEDE / Pittsburg Business School. Ele começou sua carreira como projetista de transformadores de potência e na área de pesquisa e desenvolvimento da Siemens. Desde 2004 é membro ativo da ABNT, coordenador do CE 03.014.001 por vários anos. É membro do Cigré, coordenador e atuante em grupos de trabalho no Brasil e no exterior, no comitê técnico TC14 da IEC. É também membro de vários subcomitês da IEEE, onde atua ativamente. Na Cargill desde 2013, Alan cuida do suporte técnico para aplicação de líquidos dielétricos.