



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GTM/14

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**

**ESTRUTURA DE ISOLAÇÃO DE UM TRANSFORMADOR PARA LÍQUIDOS DIELÉTRICOS DE ALTA  
PERMISSIVIDADE**

**Alan Sbravati(\*)  
CARGILL - CIS**

**Kevin J. Rapp  
CARGILL - CIS**

**Phillipe Schmitt  
WEIDMANN AG**

**RESUMO**

Estruturas de isolamento baseadas em materiais celulósicos e óleo isolante são a solução padrão para transformadores. Para o projeto com óleo vegetal como meio isolante é essencial considerar as propriedades físico-químicas e dielétricas do líquido aplicado. Para o projeto de isolamento do transformador, a principal diferença para o óleo mineral é a permissividade, a constante dielétrica, que é cerca de 50% superior e altera a distribuição de campo elétrico entre isolamentos sólido e líquido. Considerando que a rigidez dielétrica do OVI e do OMI são equivalentes, o uso das propriedades corretas resultará em um projeto seguro e aprovado.

**PALAVRAS-CHAVE**

Óleo Vegetal; Éster Natural; Projeto de Dielétrico; Isolamento; Permissividade

## 1.0 - INTRODUÇÃO

As estruturas de isolamento baseadas em materiais celulósicos e óleo mineral têm sido aplicadas como solução padrão ao longo dos últimos cem anos, tanto para transformadores de distribuição quanto de potência. As tensões resultantes dentro do transformador são, tipicamente, suportadas por um arranjo sólido-líquido, projetado para dividir diferença de tensão total em degraus menores, criando volumes pequenos com capacidade dielétrica superior e, assim, alcançando soluções muito compactas. A diferença de potencial total é convertida em uma sequência de quedas de tensão alternadamente entre óleo e papel, de acordo com a geometria e com a permissividade dos materiais.

Arranjos e configurações padronizadas foram definidos conforme os critérios de cada fabricante de transformadores conforme os níveis de tensão, uma vez que existem soluções analíticas para a distribuição de campo elétrico podem ser extremamente complexas. Mesmo tendo disponíveis modernas ferramentas de cálculo numérico, como as que utilizam o método dos elementos finitos, a aplicação de soluções padronizadas continua sendo comum, já que o cálculo detalhado exige pessoal especializado e consome muito tempo.

Quando o líquido dielétrico é substituído, trocando o tradicional óleo mineral por um óleo vegetal (éster natural), a distribuição de solicitações no sistema isolante não é a mesma. A permissividade do óleo vegetal é cerca de 40% superior a do óleo mineral, enquanto que a permissividade dos isolantes sólidos a base de celulose, impregnados com óleo vegetal é somente ligeiramente superior. O resultado é uma nova distribuição de quedas de tensão em cada um dos materiais, que precisa ser levada em conta quando um transformador em óleo vegetal está sendo projetado.

Numa primeira análise, o efeito é positivo, já que o parâmetro mais crítico é, na maioria dos casos, o valor de estresse, de kV/mm, na isolação líquida e a maior permissividade irá deslocar parte desse estresse do líquido para a isolação sólida. Essa modificação da distribuição de campo elétrico pode permitir, em alguns casos, um aumento do valor médio de kV/mm no gap principal e, assim, uma solução mais compacta, com um melhor balanço entre a queda de tensão no isolamento sólido e no líquido.

Entretanto, a nova configuração do campo elétrico pode levar a novas regiões críticas, especialmente quando o nível de tensão é mais elevado (extra alta tensão, superior a 345kV). Tensões em arestas e ao longo da montagem dos enrolamentos, nas chamadas “cabeceiras” podem ter regiões com gradientes superficiais de tensão mais elevados. Proteções de canto adicionais podem ser necessárias, em regiões onde não seriam aplicadas nos transformadores em óleo mineral, já que o estresse no papel tenderá a ser mais elevado. À medida que o nível de tensão aumenta, a necessidade de um projeto dielétrico detalhado torna-se mais relevante. Um parâmetro essencial para a distribuição do campo elétrico e o projeto dielétrico é a constante dielétrica ou permissividade [1].

Projetistas com menor nível de conhecimento no projeto de isolação tendem a atribuir tais diferenças a uma menor “capacidade dielétrica”, como se a rigidez dielétrica fosse o único parâmetro relevante para o projeto. Uma grande quantidade de ensaios dielétricos, realizadas nos mais renomados institutos e universidades no mundo [1-8], de maneira comparativa entre o óleo mineral e o vegetal, mostra que, excluindo-se as altamente indesejáveis regiões de campo muito concentrado (cantos vivos que resultem em elevados gradientes de tensão, como nos ensaios “agulha contra placa”), a rigidez dielétrica dos dois líquidos são equivalentes. Ainda assim, isso não significa que alterações no projeto do isolamento não sejam necessárias. Esse artigo analisa algumas configurações frequentemente utilizadas, as possíveis otimizações e as áreas que requerem atenção especial para um projeto de isolamento composto de materiais celulósicos e óleo vegetal.

## 1.0 - CONCEITUAÇÃO TEÓRICA

Em situação de tensão aplicada (CA) e tensão de impulso, o estresse elétrico é distribuído inversamente proporcional à permissividade dos materiais isolantes líquidos e sólidos. Como a permissividade do OVI é maior que a do óleo mineral (OMI), e portanto mais próxima do valor do papel impregnado, o resultado são menores níveis de estresse no isolamento líquido, porém maiores nos materiais sólidos.

Na maioria dos casos, especialmente para classes de tensão até os 345kV, a intensidade de campo no líquido é a restrição principal para o isolamento principal (isolamento entre enrolamentos de baixa e alta tensão). A redução de tensão no líquido pode ser significativa, como ilustrado na Fig. 1.

O modelo simplificado consiste em dois intervalos de líquido e uma barreira de pressboard de alta densidade no meio, todos com 3 mm de espessura. A comparação da curva vermelha (OMI) com a curva verde (OVI) mostra a redução da intensidade de campo nos canais de óleo e o aumento no isolamento sólido.

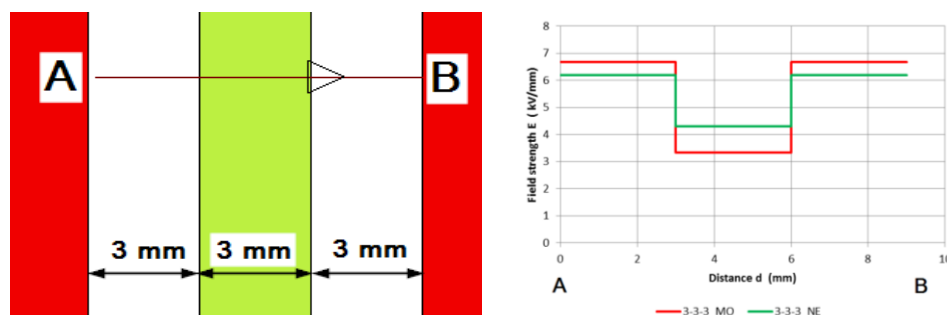


FIGURA 1 – Modelo de simulação com campo uniforme em gap total de 9 mm, formado por dois canais de óleo e um cilindro de pressboard de alta densidade, todos com 3 mm de espessura. No gráfico é mostrada a intensidade de campo para a linha A-B para uma tensão de 50 kV<sub>rms</sub>.

Uma vez que as propriedades dos materiais podem apresentar variações de acordo com o fabricante, os autores consideraram essencial definir claramente a marca dos materiais aplicados. Os líquidos dielétricos considerados foram: Óleo Mineral, com valor padrão de permissividade, e óleo vegetal isolante Envirotemp FR3™<sup>1</sup>, com valor de permissividade obtido a partir de medições. Para o isolamento sólido, foram utilizados três materiais diferentes: Papel Kraft, pressboard de baixa densidade (T III)<sup>2</sup> e pressboard de alta densidade (T IV)<sup>2</sup>

## 2.0 - PROJETO DIELÉTRICO

Conforme mencionado em [2], o projeto do sistema de isolamento deve levar em consideração, essencialmente, três aspectos principais:

- Estresse dielétrico máximo aceitável em todos os locais;
- Suporte mecânico para bobinas, saídas e derivações;
- Canais para a circulação do líquido isolante.

Em geral, a avaliação do campo elétrico requer a análise dos níveis de tensão no isolamento líquido e sólido, e ao longo das interfaces (*creepage*). O campo elétrico é definido pela tensão, geometria e permissividade dos materiais, resultando em níveis de tensão correspondentes nos materiais e níveis de tensão tangencial na superfície do isolamento sólido. Este trabalho concentra-se nas tensões nos dois materiais isolantes.

As geometrias simples, tais como cilindros concêntricos do gap principal (AT / BT) podem ser calculadas matematicamente. Porém, para construções ligeiramente mais complexas, uma solução analítica pode ser impossível, levando ao uso de cálculo numérico, tipicamente pelo Método dos Elementos Finitos. Para o presente estudo, os parâmetros utilizados para a simulação estão listados na Tabela I:

Tabela 1 – Parâmetros da Simulação: Valores de Permissividade

Permissividade Relativa		
Material	Impregnado com OMI	Impregnado com OVI
Óleo Mineral – OMI (valor típico)	2.2	-
Óleo Vegetal - OVI	-	3.2
Papel Kraft	3.2	3.4
Pressboard de Baixa Densidade	3.5	4.0
Pressboard de Alta Densidade	4.4	4.6

## 3.0 - COMPARAÇÃO DE PROJETOS PARA O GAP PRINCIPAL (AT/BT)

O chamado “gap principal”, que é a região cilíndrica entre o enrolamento de baixa tensão (BT) e o enrolamento de alta tensão (AT) é afetado pela diferença de permissividade de algumas maneiras diferentes. O modelo preparado para ilustrar isto é de um transformador tendo um enrolamento terciário entre a BT e o núcleo, a BT é simulada como um enrolamento de camada de bloco único e o enrolamento de AT é representado como uma construção de disco, com a discretização de cada disco. O modelo é apresentado na Fig. 2. As linhas de campo entre os enrolamentos de A a B são avaliadas nas figuras subsequentes.

<sup>1</sup> Envirotemp FR3 é marca registrada Cargill

<sup>2</sup> T III e T IV são marcas registradas WEIDMANN

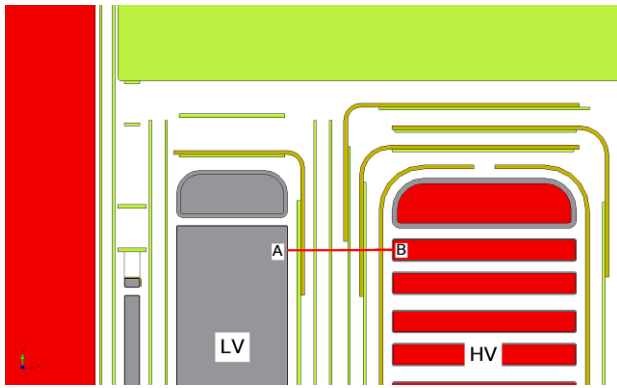


FIGURA 2 – Modelo de simulação para o gap principal.

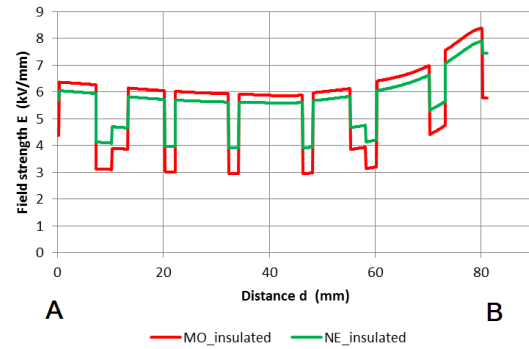


FIGURA 3 – Estresse de campo ao longo do trajeto de A até B da figura 2 para uma tensão 460 kV<sub>rms</sub>

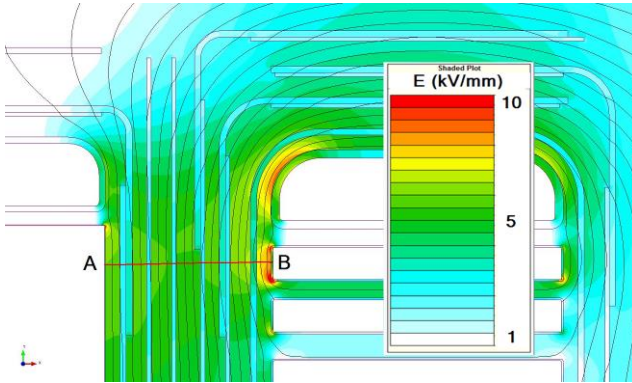


FIGURA 4 – Distribuição de campo no modelo "Gap Principal" usando óleo mineral (OMI) como líquido isolante.

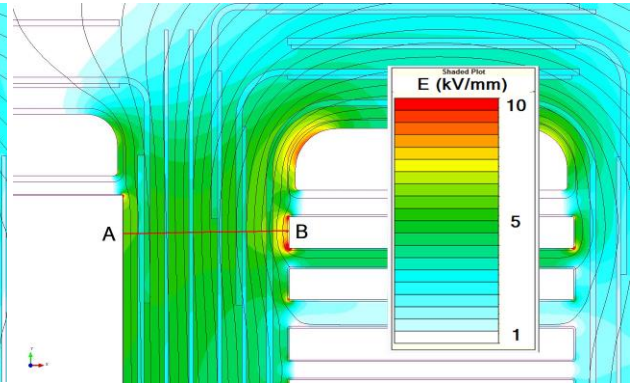


FIGURA 5 – Distribuição de campo no modelo "Gap Principal" usando óleo vegetal (OVI) como líquido isolante

A distribuição da intensidade de campo ao longo do percurso A-B é melhor discutida na Fig. 7. Ao apresentar os valores de estresse ao longo da linha em um gráfico, o mesmo comportamento mencionado na Fig. 1 está presente: uma redução da tensão no canal de óleo e um aumento no isolamento sólido.

A comparação do gráfico de campo requer atenção aos detalhes. Um tom verde ligeiramente mais claro ao longo do trajeto A-B na Fig. 5 em comparação com a Fig. 4 confirma a redução da intensidade de campo no canal de óleo. Contudo, o aspecto mais importante é o pequeno detalhe nas bordas do último disco de HV, no ponto "B". Uma vez que o modelo inclui o isolamento do papel em torno do condutor, a redução da tensão no líquido e o aumento no sólido podem ser claramente identificados. No modelo com OMI uma região maior com tom laranja pode ser identificada com variação de cores nas bordas, cobrindo uma área ligeiramente maior. Para o cálculo usando OVI o estresse no isolamento do papel condutor aumenta, contendo uma região mais concentrada em tom vermelho escuro e uma diminuição mais rápida para amarelo (maior gradiente). Este incremento do gradiente de campo é precisamente o ponto de atenção. Especialmente para classes de tensão mais altas, pode ser necessário o uso de "proteção canto" ou outras medidas no último disco, tais como o uso de um anel equipotencial. Este efeito detalhado pode ser claramente visto pela comparação das duas imagens na Fig. 9.

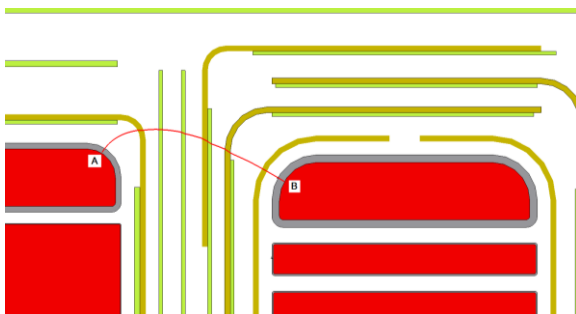


FIGURA 6 – Caminho definido para avaliação da intensidade de campo (kV/mm).

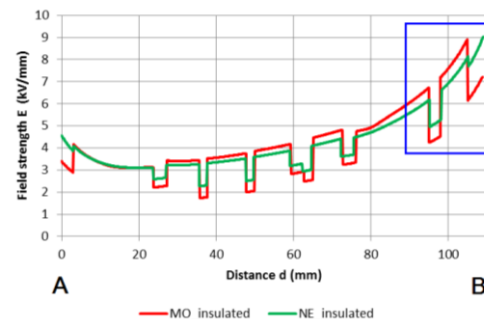


FIGURA 7 – Intensidade de campo ao longo de A-B para uma tensão de 460 kV<sub>rms</sub>.

#### 4.0 - COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS DE GAP PRINCIPAL

Usando o mesmo modelo de simulação apresentado na Fig. 2, foi definido outro caminho para a comparação da intensidade de campo dos anéis potenciais de LV para o HV, indicado na Fig. 6. A intensidade de campo ao longo deste caminho é apresentada na Fig. 7, onde a variação da intensidade de campo no ponto B resulta em quase a mesma tensão no líquido e no papel para o caso OVI. A região azul marcada no gráfico é detalhada na Fig. 8

Como a permissividade do OVI é muito próxima à do papel, o efeito de aumento do estresse no papel isolante do anel de potencial é pronunciado nesta região. Mão de obra altamente qualificada é um aspecto crítico para estas peças delicadas de isolamento, de maneira a garantir excelente acabamento.

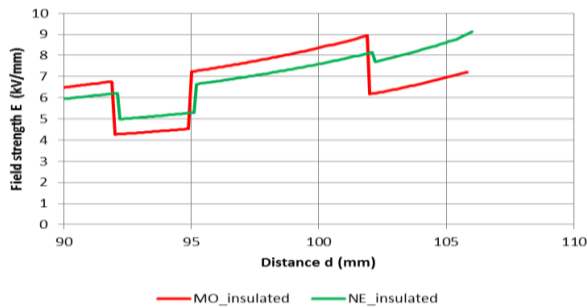


FIGURA 8 – Zoom da intensidade de campo na parte superior do enrolamento de AT

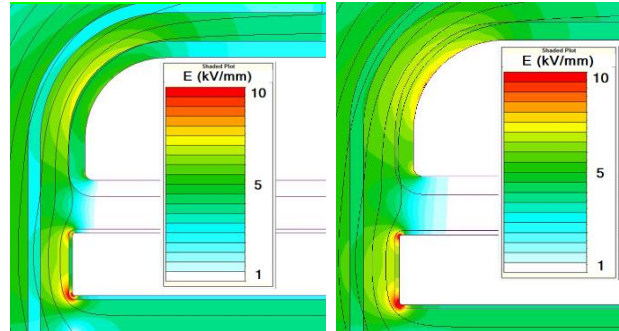


FIGURA 9 – Tensão de campo ao longo da linha de campo de A para B para uma tensão de 460 kVrms, à esquerda com OMI e à direita com OVI.

#### 5.0 - COMPARAÇÃO DO PROJETO DE LIGAÇÕES / CONEXÕES INTERNAS

A maior permissividade do OVI tem resultado mais frequentemente em pontos críticos nas ligações do que nos condutores dos enrolamentos. A principal razão é a utilização de tabelas padronizadas para a espessura de isolamento, estabelecidas com base na permissividade de OMI. Quando se utiliza OVI, a tensão nos isolamentos sólidos aumenta.

Para avaliar este comportamento, foi construído um modelo simples de um condutor paralelo a uma parede plana aterrada (ver Fig. 10). Na fig. 11 é apresentada a intensidade de campo ao longo da linha A-B, mostrando exatamente o efeito descrito. Para o cálculo do OMI, mostrado na curva vermelha, a tensão na superfície dentro do isolamento sólido é de cerca de 5,5 kV/mm, enquanto para o OVI é de cerca de 7,4 kV/mm.

Este aspecto pode ser crítico para os transformadores de distribuição, onde, geralmente, não é comum o uso de réguas de fixação para as ligações internas. Na maioria dos casos, um pequeno espaçamento em óleo entre os cabos já é suficiente para evitar qualquer problema. Para classes mais altas de tensão é prática padrão o cuidado com o arranjo do cabeamento interno. O projeto de isolamento deve levar em conta a maior permissividade do OVI. Na fig. 12, em função da escala de cor, fica mais evidente o efeito da maior permissividade do líquido para os condutores.

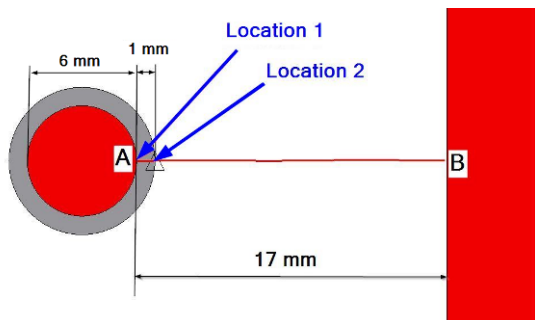


FIGURA 10 – Zoom da intensidade de campo na parte superior do enrolamento de AT

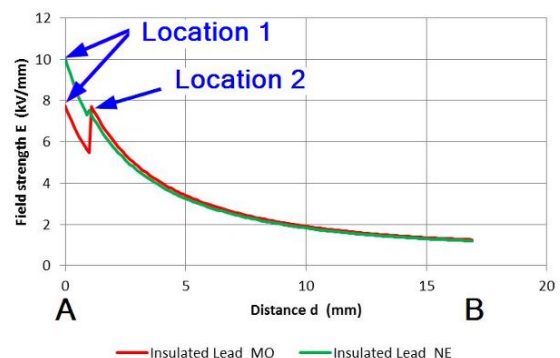


FIGURA 11 – Valores de intensidade de campo ao longo da linha A-B, para uma tensão de 460 kVrms

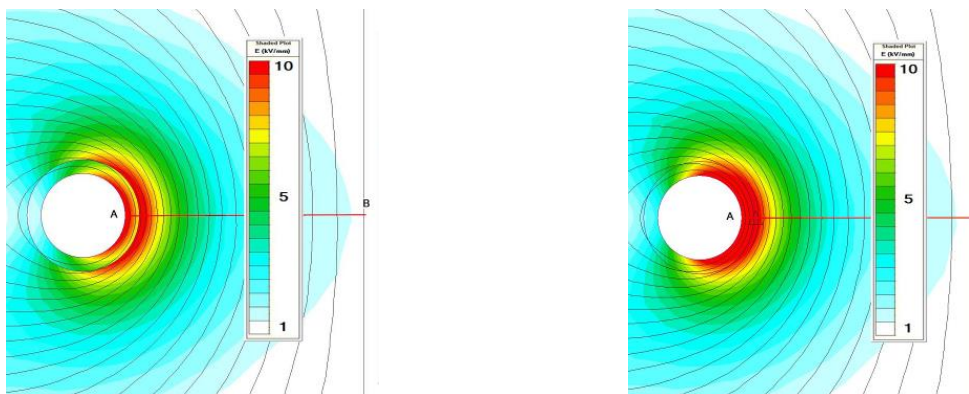


FIGURA 12 - Apresentação dos resultados para o caso do cálculo das ligações internas. Na figura à esquerda são os resultados do cálculo com ovi e, à direita, sem ovi.

## 6.0 - CONCLUSÕES

A opção por transformadores isolados com óleo vegetal pode ser vista como uma tendência crescente atualmente. Apesar da grande semelhança funcional com o óleo mineral, há diferenças essenciais a serem consideradas para um projeto de transformador bem-sucedido. Para o projeto da isolamento o principal parâmetro é o valor de permissividade. Os responsáveis pelo projeto de isolamento devem estar conscientes dessa diferença, usando valores apropriados para o cálculo de campo e verificando o estresse do papel e o estresse líquido nos cantos e bordas especificamente.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. Sbravati, J. Luksich, K. Rapp, R. Shinde, D. Bingenheimer, "Challenges for the application of natural ester fluids in extra high voltage transformers", CIGRE- AORC Technical Meeting 2016 and International Conference on "Global Trends in the Development of Power T&D Systems including Smart Grid, New Delhi, India.
- (2) 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, Dallas, TX
- (3) T. Prevost, M. Francheck, K. Rapp, "Investigations of the dielectric design criteria for pressboard/natural ester interfacial stress", 75th Int. Conf. Doble Clients, April 6-11, 2008, Paper IM-3, Boston USA.
- (4) K.J. Rapp, J. Corkran, C. P. McShane, T. A. Prevost, "Lightning Impulse Testing of Natural Ester Fluid Gaps and Insulation Interfaces", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, No. 6, Dec. 2009, pp. 1595-1603.
- (5) 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.
- (6) 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
- (7) 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 (Partial discharge behavior, permittivity and dissipation factor  $\tan \delta$ )", Institute of Electric Power Systems, Division of High Voltage Engineering, Schering-Institute, University of Hanover, Germany, Sept.-Nov. 2005
- (8) T. C. Wei, T. R. Blackburn, "A Report of the Partial Discharge Test Conducted on Envirotemp FR3Fluid for Cooper Power Industries", Engineering Bachelor work, South Wales University, Australia, June 2004

## 8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alan Sbravati é graduado pela Universidade de Campinas, Brasil, tem MBA em Gestão da FGV e Mestrado em Gerenciamento de Projetos 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.