

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Cleber Arantes Amorim Junior

**ADEQUAÇÃO DO PROJETO DE ISOLAMENTO  
DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA  
NA SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL  
PELO ÉSTER NATURAL**

Belo Horizonte

Julho/2019

Cleber Arantes Amorim Junior

**ADEQUAÇÃO DO PROJETO DE ISOLAMENTO  
DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA  
NA SUBSTITUIÇÃO DO ÓLEO MINERAL  
PELO ÉSTER NATURAL**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte

Julho/2019

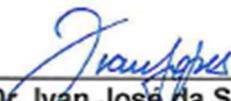
**"Adequação do Projeto de Isolamento de Transformadores de Potência Na Substituição do Óleo Mineral Pelo Éster Natural"**

**Cleber Arantes Amorim Junior**

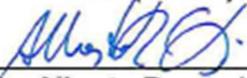
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 31 de julho de 2019.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes  
DEE (UFMG) - Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jaime Arturo Ramirez  
DEE (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alberto Resende De Conti  
DEE (UFMG)

*Ao Deus do Rei Davi*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo seu infinito amor e pela salvação em Jesus Cristo;

À minha mãe Teresinha Moreira, por uma vida de amor e dedicação à família;

Ao meu pai Cleber Amorim, pelas referências de honestidade e trabalho;

Aos exemplos de sabedoria e luta dos meus irmãos queridos Claudia e Clenio Amorim;

Às minhas avós, amigos e demais familiares que me incentivaram e oraram por mim;

À minha amada esposa, Andressa Castor, pelo suporte e apoio incondicional;

À UFMG, por me abrir as portas e por buscar excelência na educação;

Ao meu orientador Prof. Ivan José da Silva Lopes, por sua paciência e prontidão para ajudar;

A todos os professores do programa de pós-graduação e colegas, pelo rico aprendizado;

Ao Sr. Fernando Guañabens e companheiros da TSEA, por compartilhar conhecimento;

À TOSHIBA / TSEA ENERGIA pelo incentivo à educação e suporte tecnológico;

**MUITO OBRIGADO!**

*"Mas vocês não devem ser chamados mestres; um só é o Mestre de vocês, e todos vocês são irmãos." (Mateus 23:8)*

## RESUMO

A adoção do óleo mineral em transformadores de potência vem sendo cada vez mais questionada por restrições relacionadas à segurança e ao meio ambiente. É crescente a utilização do éster natural como líquido isolante alternativo. O éster natural, também chamado de óleo vegetal, é biodegradável, comestível, pode estender a vida útil do isolamento sólido e tem ponto de fulgor duas vezes mais alto que do óleo convencional. Contudo, há certa carência de informações que permitam revisar o projeto de isolamento dos transformadores de potência. Fabricantes de transformadores e usuários demandam uma comparação detalhada do desempenho dielétrico dos líquidos aplicáveis. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo investigar o processo de substituição do óleo mineral pelo éster natural em transformadores de potência. Para isto, inicialmente são avaliadas as alterações de comportamento dos materiais isolantes envolvidos. São comparados valores de tensões disruptivas, tolerâncias à presença de contaminantes e propagação de descargas em diferentes arranjos. Avaliados os comportamentos nos líquidos, sólidos e na interface entre estes meios, são identificados os parâmetros que merecem atenção na adequação do projeto de isolamento ao fluido alternativo. Em seguida, um projeto de transformador de potência é modelado e distribuições de campo elétrico são simuladas, considerando as variações das permissividades dos materiais. Alterações nos componentes são estudadas e, a partir de uma análise empírica, um projeto de isolamento economicamente competitivo é sugerido para aplicação com o fluido vegetal. Limites de tensões suportáveis para baixas probabilidades de falha são discutidos para aplicação em arranjos uniformes e divergentes. As margens de segurança do projeto modificado são avaliadas e, como resultado principal, as adequações recomendadas para o projeto de isolamento em éster natural são consideradas capazes de garantir um desempenho dielétrico comparável ao do líquido convencional.

**Palavras-chave:** Transformador de Potência, Éster Natural, Óleo Vegetal, Projeto de Isolamento, Campo Elétrico, Líquido Isolante.

## ABSTRACT

The use of mineral oil in power transformers has been increasingly questioned by restrictions related to safety and environment. The option for natural ester as an alternative insulating liquid is increasing. Natural ester, also called vegetable oil, is biodegradable, edible, can extend the life of the solid insulation and has a flash point twice higher than the conventional oil. However, there is some lack of information that allows to review the isolation design of power transformers. Manufacturers and users of transformers require a detailed comparison of the dielectric performance of applicable liquids. In this context, this work aims to investigate the process of substitution of mineral oil by natural ester in power transformers. For this, initially the changes of performance of the insulating materials involved are evaluated. Disruptive voltage values, sensitivity to the presence of contaminant and discharge propagation in different arrangements are compared. Evaluating the behavior in liquids, solids and the interface between these media, the parameters that need attention in the adequacy of the insulation design to the alternative fluid are identified. Next, a power transformer design is modeled, and electric field distributions are simulated, considering the permittiveness variations of the materials. Changes in the components are studied and, from an empirical analysis, an economically competitive insulation design is suggested for application with vegetable fluid. Withstand stress limits for low probabilities of failure are discussed for application in uniform and divergent arrangements. The safety margins of the modified project are evaluated and, as a main result, the recommended adequations for the natural ester insulation design are considered capable of ensuring a dielectric performance comparable to that of the conventional liquid.

**Keywords:** Power Transformer, Natural Ester, Vegetable Oil, Insulation Design, Electric Field, Insulating Liquid.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Estrutura do éster natural. Adaptada de [2].....	9
Figura 2.2. Óleos vegetais originados de sementes de plantas. Retirada de [18].....	10
Figura 2.3. Tensão e capacidade de transformadores de potência em EN. Adaptada de [20]..	12
Figura 2.4. Maior transformador instalado imerso em EN. Retirada de [20].....	12
Figura 3.1. Disrupção CA em líquido e papelão envelhecidos. Adaptada de [32].....	26
Figura 3.2. Tensão de disrupção em função da umidade relativa. Adaptada de [3].....	28
Figura 3.3. Umidade nos líquidos, antes e após ensaios. Adaptada de [3].....	29
Figura 3.4. Disrupção em função da contaminação com partículas. Adaptada de [4].	.....30
Figura 3.5. Disrupção de líquidos contaminados em função da umidade. Adaptada de [4].	... 31
Figura 3.6. Eletrodos de cobre avaliados para tensão de disrupção. Adaptada de [4].	.....32
Figura 3.7. Probabilidade de falha dos eletrodos. Adaptada de [4].....	33
Figura 3.8. Campo para início de descargas parciais. Adaptada de [3].....	35
Figura 3.9. Tensão para início de descargas parciais com degradação. Adaptada de [36].....	36
Figura 3.10. Tensão para 50% de disrupção em grandes canais. Adaptada de [11].....	37
Figura 3.11. Arranjos de diferentes configurações. Retirada de [17].....	38
Figura 3.12. Tensão de disrupção para diferentes arranjos. Adaptada de [17].....	38
Figura 3.13. Campo suportável por eletrodos em pequenos canais. Adaptada de [9].....	39
Figura 3.14. Velocidade de propagação de streamers. Adaptada de [10].	..... 40
Figura 3.15. Comprimento de streamers até sua parada. Adaptada de [41].....	41
Figura 3.16. Fotografias típicas de streamers negativos. Adaptada de [11].....	42

Figura 3.17. Probabilidade de interrupção para diferentes canais. Adaptada de [10].	42
Figura 3.18. Comprimento de streamers com e sem papelão em EN. Adaptada de [37].	43
Figura 3.19. Streamers com e sem papelão em EN para tensões CA. Adaptada de [13].	44
Figura 4.1. Foto do transformador isolado em EN. Cedida por TSEA Energia.	54
Figura 4.2. Componentes do projeto de isolamento. Cedida por TSEA Energia.	59
Figura 4.3. Pontos de análise do projeto de isolamento. Cedida por TSEA Energia.	60
Figura 4.4. Casos simulados para avaliar a variação de permissividades.	62
Figura 4.5. Comparativo de campo no canal (segmento A) para casos 0 e 1	63
Figura 4.6. Modificações individuais no projeto. Cedida por TSEA Energia.	65
Figura 4.7. Variações de campo nos segmentos dos projetos em OM e EN.	73
Figura 4.8. Variação de campo ao longo da capa de AT (segmento D).	73
Figura 5.1. Linhas equipotenciais no projeto de isolamento modelado.	76
Figura 5.2. Limites de campos suportáveis para impulso. Adaptada de [38].	77
Figura 5.3. Limites de tensões suportáveis para impulso. Adaptada de [53].	79
Figura 5.4. Linhas equipotenciais nas extremidades dos enrolamentos	81
Figura 5.5. Suportabilidades a escoamento. Adaptada de [8]	82
Figura 5.6. Distâncias alteradas no projeto de isolamento. Cedida por TSEA Energia.	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades de líquidos isolantes de transformadores. Adaptada de [2].	6
Tabela 2.2. Propriedades gerais de OM e EN. Adaptada de [2].	11
Tabela 2.3. Classes e formas de sobretensões. Retirada de [22].	14
Tabela 2.4. Ocorrência no sistema e faixa de frequência de transitórios. Adaptada de [23].	15
Tabela 2.5. Requisitos para os ensaios dielétricos de transformadores. Adaptada de [24].	16
Tabela 3.1. Tensões de ruptura CA e de início de descargas parciais. Adaptada de [16].	26
Tabela 3.2. Distribuição de rupturas em arranjo de escoamento. Adaptada de [42].	46
Tabela 3.3. Campos no arranjo de teste com escoamento. Adaptada de [39].	46
Tabela 4.1. Fatores DIL para comparação de esforços elétricos. Adaptada de [7][25].	55
Tabela 4.2. Permissividades relativas em função da temperatura. Adaptada de [8].	57
Tabela 4.3. Campos máximos substituindo os fluidos no projeto base.	62
Tabela 4.4. Modificações individuais a serem testadas no projeto com EN	64
Tabela 4.5. Campos máximos nas modificações dos eletrodos em EN.	66
Tabela 4.6. Campos máximos nas modificações dos isolamentos em EN.	68
Tabela 4.7. Modificações combinadas a serem testadas no projeto com EN	70
Tabela 4.8. Campos máximos nas modificações combinadas em EN.	70
Tabela 4.9. Variação dos campos máximos em EN com relação ao caso 0 (OM).	72
Tabela 5.1. Campos máximos para o equipamento fornecido e para o projeto escolhido.	85
Tabela 5.2. Redução de materiais no projeto em EN. Cedida por TSEA Energia.	86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CACD	Tensão induzida de curta duração
CALD	Tensão induzida de longa duração
CIGRE	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
DIL	<i>Design impulse level</i>
DP	Descargas parciais
E	Campo elétrico
EN	Éster natural
$\epsilon_r$	Permissividade relativa
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IA	Impulso atmosférico
IAC	Impulso atmosférico de onda cortada
IM	Impulso de manobra
N/A	Não aplicável
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OM	Óleo mineral

PCB	<i>PolyChlorinated Biphenyl</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SF <sub>6</sub>	Hexafluoreto de enxofre
TM	<i>Trade Mark</i>

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b><i>i</i></b>
<b>RESUMO</b>	<b><i>iii</i></b>
<b>ABSTRACT</b>	<b><i>iv</i></b>
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b>	<b><i>v</i></b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b><i>vii</i></b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b><i>viii</i></b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b><i>x</i></b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b><i>1</i></b>
1.1 Motivação e objetivos	<b><i>2</i></b>
1.2 Estrutura do trabalho	<b><i>4</i></b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b><i>5</i></b>
2.1 Líquidos isolantes aplicados a transformadores de potência	<b><i>5</i></b>
2.1.1 Óleo mineral	<b><i>7</i></b>
2.1.2 PCB e líquidos isolantes à base de silicone	<b><i>8</i></b>
2.1.3 Ésteres sintéticos	<b><i>8</i></b>
2.1.4 Ésteres naturais	<b><i>9</i></b>
2.2 Esforços elétricos aplicados a transformadores	<b><i>13</i></b>
2.2.1 Sobretensões	<b><i>13</i></b>
2.2.2 Ensaios padronizados para transformadores de potência	<b><i>15</i></b>
2.3 Disrupção em isolantes sólidos e líquidos	<b><i>17</i></b>
2.3.1 Disrupção nos sólidos	<b><i>17</i></b>
2.3.2 Disrupção nos líquidos	<b><i>20</i></b>
2.4 Ensaios não destrutivos em isolamentos	<b><i>22</i></b>
2.4.1 Propriedades dinâmicas dos dielétricos – efeitos da polarização	<b><i>22</i></b>
2.4.2 Medição de fator de perdas dielétricas e capacitância	<b><i>23</i></b>
2.4.3 Medição de descargas parciais	<b><i>23</i></b>
2.5 Considerações finais do capítulo	<b><i>24</i></b>
<b>3 PARÂMETROS DE IMPACTO NO PROJETO COM ÉSTER NATURAL</b>	<b><i>25</i></b>
3.1 Suportabilidade a tensões alternadas e parâmetros de influência	<b><i>25</i></b>

3.1.1	Suportabilidade de líquidos novos e termicamente envelhecidos _____	25
3.1.2	Contaminação com umidade _____	27
3.1.3	Contaminação com partículas _____	30
3.1.4	Efeito da área do eletrodo na tensão de ruptura _____	32
3.1.5	Considerações finais sobre suportabilidade CA _____	33
<b>3.2</b>	<b>Comparações de parâmetros na formação de descargas _____</b>	<b>34</b>
3.2.1	Descargas parciais _____	34
3.2.2	Suportabilidade a tensões impulsivas _____	36
3.2.3	Propagação de <i>streamer</i> _____	39
3.2.4	Interface fluido/papelão – descargas, escoamento e trilhamento _____	43
3.2.5	Considerações finais sobre parâmetros na formação de descargas _____	47
<b>3.3</b>	<b>Parâmetros não dielétricos de interesse ao projeto de isolamento _____</b>	<b>48</b>
3.3.1	Estabilidade a oxidação _____	48
3.3.2	Viscosidade, impregnação e exposição _____	49
3.3.3	Ponto de fluidez, compatibilidade dos materiais e geração de gases _____	50
3.3.4	Considerações sobre parâmetros não dielétricos e considerações finais _____	51
<b>4</b>	<b><i>CAMPO ELÉTRICO NO PROJETO – ESTUDO DE CASO</i> _____</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Estudo de caso e comparação de esforços elétricos _____</b>	<b>52</b>
4.1.1	Transformador objeto de estudo _____	52
4.1.2	Comparação de esforços elétricos com fator DIL _____	55
<b>4.2</b>	<b>Efeito da variação de permissividade dielétrica _____</b>	<b>56</b>
4.2.1	Permissividade relativa _____	56
4.2.2	Identificação dos componentes e pontos de análise do projeto _____	58
4.2.3	Casos 0 e 1 - modificações de campo definidas pelas permissividades _____	62
<b>4.3</b>	<b>Modificações no projeto de isolamento em EN _____</b>	<b>64</b>
4.3.1	Casos 2 a 6 - modificações dos raios dos eletrodos _____	66
4.3.2	Casos 7 a 11 - modificações dos isolamentos _____	68
4.3.3	Modificações combinadas e projeto proposto _____	70
<b>4.4</b>	<b>Considerações finais do capítulo _____</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b><i>LIMITES DE PROJETO EM ÉSTER NATURAL</i> _____</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>Limites ou tensões suportáveis de projeto _____</b>	<b>75</b>
5.1.1	Limite para condições de campo uniforme e arranjos homogêneos _____	76
5.1.2	Limite para condições de campo não uniforme e arranjos heterogêneos _____	79
5.1.3	Limite para descargas de escoamento _____	81
<b>5.2</b>	<b>Adequações do projeto de isolamento recomendadas para o EN _____</b>	<b>83</b>

5.2.1	Avaliação do projeto escolhido	84
<b>5.3</b>	<b>Redução de custo no projeto de isolamento adequado ao EN</b>	<b>86</b>
<b>5.4</b>	<b>Considerações finais do capítulo</b>	<b>87</b>
<b>6</b>	<b><i>CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE</i></b>	<b>88</b>
<b>6.1</b>	<b>Propostas de continuidade</b>	<b>90</b>
	<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O óleo mineral (OM) vem sendo utilizado como líquido isolante de transformadores há mais de um século. Apesar desta longa experiência, sua escolha é cada vez mais questionada por ser derivado do petróleo, tóxico, não biodegradável, e ter ponto de fulgor próximo das temperaturas de operação dos transformadores de potência. Os custos relacionados a explosões e incêndios de equipamentos com OM podem ser catastróficos do ponto de vista financeiro e gerar grande desgaste para os envolvidos. Além disso, há grande preocupação com os efeitos tóxicos de um vazamento não controlado. Este cenário de maiores restrições relacionadas a meio ambiente e segurança tem motivado pesquisas para encontrar fluidos isolantes alternativos ao OM [1]. O éster natural (EN), também chamado de óleo vegetal, é uma das opções consideradas para substituição do OM.

Ésteres naturais começaram a ser testados como refrigerantes dielétricos por volta de 1900 [2]. Sua utilização em transformadores de média tensão cresceu nas últimas décadas, mas seu uso em altas tensões tem esbarrado na experiência limitada de fabricantes. O EN tem propriedades interessantes: ponto de fulgor duas vezes maior que do líquido mineral, é biodegradável, comestível e muito mais higroscópico, propriedade que favorece a secagem do isolamento sólido e a extensão da vida útil do equipamento [3]. Desvantagens também acompanham o fluido de origem vegetal: ele pode ser facilmente oxidado, exigindo o uso de aditivos e restringindo os sistemas de respiro aplicáveis aos transformadores, sua viscosidade é bem maior que a do fluido mineral e seu ponto de fluidez dificulta sua utilização em ambientes frios. Além disso, algumas particularidades do líquido isolante alternativo podem demandar alterações no projeto de isolamento dos transformadores de potência. Negligenciar estas peculiaridades pode levar à falhas em ensaios ou durante a operação destes equipamentos [1].

As características dielétricas do OM já foram profundamente investigadas e consideradas no projeto de transformadores de potência [4]. Por sua vez, os fluidos de origem vegetal em transformadores de alta tensão são usados há menos de duas décadas e ainda podem ser considerados em fase de investigação para um equipamento com expectativa de vida de 40 anos [1]. A substituição do fluido mineral pelo vegetal em grandes transformadores de potência tem sido um tópico frequente de discussão nos últimos anos [4]. Apesar do EN já ser considerado uma alternativa viável ao OM [5], sua utilização precisa ser melhor traduzida em práticas de projeto. Quando especificado o uso do EN, alguns fabricantes ainda projetam

transformadores com regras destinadas ao OM, aplicando um maior fator de segurança. A título de exemplo, equipamentos de IA (abreviação normalizada para impulso atmosférico pleno, como detalhado na Seção 2.2.2) 550kV em EN são dieletricamente projetados como se ensaiados com IA de 650kV em OM. A aplicação de margens de segurança tem sido justificada pela pouca experiência individual de alguns fabricantes e pelas raras informações compartilhadas de cunho prático.

A substituição do líquido isolante nos transformadores não envolve apenas testar as características do fluido em si. Também é importante investigar a interação entre líquido e isolamento sólido. Propriedades importantes são descargas parciais, interrupção e descargas de escoamento ou superficiais [6]. Em geral, a rigidez dielétrica de um sistema isolante composto depende da tensão aplicada, área e forma dos eletrodos, tipo e grau de contaminação do fluido e temperatura. O projeto de isolamento do transformador deve considerar tais aspectos [7].

## **1.1 Motivação e objetivos**

O uso de EN como fluido isolante de grandes transformadores é relativamente novo [8]. O aumento da demanda de líquidos compatíveis com o meio ambiente traz o desafio de estender sua utilização às mais altas classes de tensão, onde os requisitos são mais severos. O primeiro transformador em EN de tensão 420kV foi produzido e instalado em 2014 [5], mas o número de equipamentos operando ainda é pouco expressivo quando se trata do universo de alta e extra alta tensão. Além disto, há fabricantes de transformadores de potência que ainda carecem de informações que permitam adaptar com segurança seus projetos, originalmente concebidos para OM, ao fluido de origem vegetal.

Um sistema isolante típico usado em transformadores imersos em líquido contém, além do fluido, materiais sólidos para isolamento da parte condutiva. Os materiais isolantes devem ter suportabilidade elétrica, mecânica e química, além de suportar o estresse térmico durante a vida útil prevista para o equipamento [9]. A distribuição de campo elétrico em torno dos enrolamentos de transformadores tem características não uniformes que precisam ser devidamente avaliadas. Para garantir um desempenho adequado durante os ensaios dielétricos e na operação dos equipamentos, são concebidos projetos de isolamento para transformadores. Estes projetos definem características e posicionamento de isolamentos compostos por cilindros

e anéis de material isolante, barreiras e reforços de diversos tipos e blindagens que auxiliam no controle de campo elétrico. O projeto de isolamento dos transformadores imersos em líquidos é concebido em função das características dielétricas e permissividades de seus materiais isolantes, basicamente celulose impregnada e fluido isolante [8].

Compreender a variação do comportamento dielétrico dos isolantes é fundamental para propor modificações no projeto de isolamento. A suportabilidade a tensões alternadas do EN seria menos impactada pela presença de partículas e umidade, mas mais sensível ao aumento da área do eletrodo [4]. Publicações [10][11] alertam para a variação de velocidade de propagação de *streamers* em EN. O comportamento de *streamers* rápidos poderia ser traduzido em menor resistência a tensões transitórias [3]. A possibilidade de ocorrer trilhamento em papelões impregnados com EN seria maior [12]. A inclusão de barreiras de papelão poderia promover descargas superficiais em EN [13]. Estes são alguns dos pontos a serem investigados neste trabalho. Variações de desempenho precisam ser traduzidas em práticas confiáveis de projeto. Avaliadas questões relacionadas às alterações de comportamento dos materiais, estudos de distribuição de campo elétrico precisam ser realizados, considerando as variações de permissividades, para que um projeto customizado para o EN possa ser apresentado.

Este trabalho tem como objetivo geral investigar o processo de adequação do projeto de isolamento de transformadores de potência, ao substituir o OM pelo EN. Os objetivos específicos do trabalho, considerando os aspectos já mencionados, são:

- Comparar as características dielétricas de fluidos mineral e vegetal em campos uniformes e não-uniformes avaliando os fenômenos de descarga envolvidos, considerando: as variações nas dimensões de canais de fluido, a presença de isolamento sólido, os tipos de eletrodos, a presença de contaminantes, a diferença de viscosidade e o envelhecimento;
- Analisar a distribuição do campo elétrico no projeto de isolamento de transformador de potência, considerando a variação das permissividades do EN e dos materiais por ele impregnados;
- Testar e avaliar modificações práticas no projeto dielétrico, através de simulações que permitam avaliar se distâncias aplicadas com o líquido tradicional podem ser adotadas no projeto de isolamento com o fluido de base vegetal;

- Verificar a necessidade de revisar limites de projeto para aplicação em EN que permitam uma adequação segura ao fluido alternativo, considerando os efeitos das variáveis analisadas.

Os principais requisitos que motivaram a escolha do tema desta dissertação foram a inovação, a aplicabilidade profissional e a relevância: a inovação trazida pelo dielétrico renovável chegando ao universo de altas tensões; a aplicabilidade profissional ao buscar subsidiar as alterações necessárias no projeto de isolamento de transformadores de potência; e a relevância no contexto da engenharia por tratar-se da substituição de um dielétrico usado por mais de cem anos, com venda anual superior a um milhão de toneladas [1].

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Este trabalho é composto por seis capítulos, incluindo este. No segundo capítulo, são descritas características dos fluidos isolantes e abordados conceitos e particularidades de esforços elétricos, ensaios dielétricos normalizados para transformadores de potência, fenômenos de descarga em sólidos e líquidos e ensaios não destrutivos.

O terceiro capítulo apresenta uma síntese de resultados de trabalhos que investigam parâmetros de impacto no projeto de isolamento de transformadores com EN. São destacadas as principais variações de comportamento dielétrico do EN com relação ao OM.

O quarto capítulo trata da distribuição de campo elétrico nos componentes do projeto de isolamento. É apresentado um estudo de caso com análise de simulações computacionais de um transformador de potência real, com IA de 650kV. Modificações são testadas e um projeto de isolamento mais competitivo é sugerido.

No quinto capítulo são discutidos os valores limites de campo elétrico aplicáveis, buscando validar o desenho proposto para aplicação em EN. Pontos genéricos para modificação de projetos de isolamento são sugeridos e a customização do projeto escolhido é contabilizada.

O sexto capítulo traz as conclusões e as propostas para continuidade deste trabalho.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo aborda os principais conceitos utilizados ao longo deste trabalho. No item 2.1, são apresentados os principais tipos de isolamentos líquidos aplicados a transformadores. Os esforços elétricos a que os equipamentos são submetidos são tratados no item 2.2, em conjunto com os ensaios dielétricos padronizados para transformadores de potência. O item 2.3 traz conceitos de fenômenos de descargas em meios líquidos e sólidos. Finalmente, os processos de polarização em dielétricos e o ensaio de descargas parciais são discutidos no item 2.4.

### **2.1 Líquidos isolantes aplicados a transformadores de potência**

Transformadores são componentes econômica e tecnicamente estratégicos para o transporte de energia no sistema elétrico de potência. Ao modificar os níveis de tensão e corrente alternadas por indução eletromagnética, os transformadores de potência interligam circuitos e sistemas. Além de ser o ativo de maior custo de aquisição em uma subestação, o transformador de potência normalmente não pode ser prontamente substituído, o que demanda um alto nível de confiabilidade do projeto. Cabe ressaltar que a retirada dos transformadores de serviço muitas vezes está associada a falhas na parte ativa (núcleo e enrolamentos), que envolvem maiores prazos e custos de reparo [14]. Portanto, uma substituição do líquido isolante de um equipamento vital para o sistema deve ser embasada em regras de projeto e fabricação altamente confiáveis.

O projeto de transformadores é concebido em função do meio isolante em que seus enrolamentos são imersos, que pode ser sólido (encapsulamento em resina ou verniz), gasoso (ar ou SF<sub>6</sub>) e líquido (óleos de base mineral, sintética ou vegetal). O isolamento líquido é o mais comum em transformadores de potência de alta tensão. Combinado com o material sólido (celulose na maior parte), o líquido é responsável pelo isolamento entre partes do equipamento com diferentes níveis de tensão e pelo transporte do calor gerado pela parte ativa para o sistema de resfriamento (radiadores ou trocadores de calor). Além destas funções principais, o líquido é responsável pela extinção de descargas, atua como meio de amortecimento acústico e fornece meios para avaliar as condições dos equipamentos, tanto durante seu regime normal de operação, como após a ocorrência de falhas [2].

Os principais tipos de fluidos isolantes aplicados a transformadores de potência são tratados a seguir. As principais propriedades destes, e de outros líquidos isolantes empregados em diferentes tipos de transformadores, são listadas na Tabela 2.1 [2].

Tabela 2.1. Propriedades de líquidos isolantes de transformadores. Adaptada de [2].

<b>Categoria</b>	<b>Tipo de líquido</b>	<b>Principais características</b>
Óleos minerais	Naftênico, parafínico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa resistência a oxidação</li> <li>• Bom índice de viscosidade</li> <li>• Baixo ponto de combustão</li> <li>• Baixa tolerância a umidade</li> <li>• Possível ataque de enxofre corrosivo</li> </ul>
Hidrocarbonetos de alto peso molecular	Parafínico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto ponto de fulgor</li> </ul>
Óleos vegetais ou ésteres naturais	Rícino, soja, algodão, milho, palma, girassol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixas perdas dielétricas (<math>f &gt; 1\text{kHz}</math>)</li> <li>• Prontamente biodegradável</li> <li>• Baixa estabilidade a oxidação</li> </ul>
Hidrocarbonetos halogenados	Ascarel (PCB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não inflamável</li> <li>• Termicamente estável</li> </ul>
	Policlorodifenil metano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não inflamável</li> </ul>
	Policloretos alcanos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradável</li> <li>• Termicamente estável</li> </ul>
Óleos siliconados	Polidimetil siloxano, polimetilfenil siloxano	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bom índice de viscosidade</li> <li>• Alto ponto de fulgor</li> <li>• Absorção de gás sob descarga parcial</li> <li>• Alta estabilidade a oxidação</li> <li>• Baixa biodegradabilidade</li> </ul>
Ésteres orgânicos ou sintéticos	Ésteres complexos, tetraester de pentaeritritol	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto ponto de fulgor</li> <li>• Alta tolerância à umidade</li> <li>• Prontamente biodegradável</li> <li>• Alta estabilidade a oxidação</li> </ul>
Outros líquidos	Nanofluidos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adaptabilidade</li> </ul>
	Líquidos misturados	

### 2.1.1 Óleo mineral

O líquido mais comumente encontrado em transformadores de potência de alta tensão é o OM. Esse isolante é originado da destilação do petróleo, correspondendo à fração obtida entre 300 e 400°C [15]. O histórico de utilização do óleo mineral em equipamentos elétricos é centenário, devido ao seu baixo custo, bom comportamento de envelhecimento, baixa viscosidade e atual disponibilidade. Contudo, a demanda crescente pode levar a sérias carências de produtos petrolíferos a partir de meados do século atual [2].

O OM é uma mistura de compostos em que a maioria das moléculas é constituída por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos). Os dois principais tipos de OM resultantes de diferentes processos de refino são o naftênico e o parafínico. Óleos parafínicos tem um ponto de fluidez relativamente alto, que podem requerer a adição de aditivos. Óleos naftênicos têm melhor viscosidade, longa expectativa de vida e são mais polares que os parafínicos [16]. O considerável avanço da tecnologia de refino do petróleo nas últimas décadas trouxe melhorias. Os óleos refinados são misturas muito complexas que podem consistir de mais de 3.000 hidrocarbonetos diferentes, sendo parte destes (5~20%) hidrocarbonetos aromáticos, que determinam a diferença na solubilidade da água nos distintos tipos de OM [2].

A presença de umidade, oxigênio e metais, associada à temperatura de operação dos transformadores, são os maiores responsáveis pelo envelhecimento de seus materiais isolantes. As propriedades isolantes do OM se deterioram e os subprodutos oriundos deste processo aceleram a degradação da celulose e promovem a formação de borra. A ação do calor degrada o OM por pirólise, gerando também compostos gasosos que variam com a temperatura [15].

Atualmente, óleos de origem mineral não têm sido amplamente aceitos. Impulsionados pelo desejo de um líquido isolante não inflamável e ambientalmente amigável para uso em equipamentos de potência, pesquisadores e engenheiros têm investigado alternativas ao OM. Avanços significativos foram alcançados durante as últimas décadas [2]. Líquidos isolantes à base de silicone e ésteres, de origem sintética e natural, merecem destaque.

### **2.1.2 PCB e líquidos isolantes à base de silicone**

Líquidos sintéticos são usados quando propriedades especiais são requeridas, principalmente segurança. Como o OM tem ponto de fulgor próximo ao das temperaturas limites previstas na operação de transformadores de potência, líquidos isolantes à base de bifenila policlorada (PCB), comumente conhecidos por Ascarel, foram introduzidos no início da década de 30 [2]. Quarenta anos mais tarde, por serem altamente tóxicos e não biodegradáveis, os PCBs começaram a ser substituídos por líquidos siliconados.

Resistentes ao fogo e de alta estabilidade, fluidos à base de silicone são comumente utilizados em transformadores de tração e transformadores compactos, onde as temperaturas de operação são mais altas. Isolamentos sólidos de alta temperatura são geralmente empregados em conjunto com fluidos siliconados. Esses fluidos também são conhecidos por terem excelente resistência à oxidação e por formarem quantidades reduzidas de subprodutos ou borra no processo de degradação. Contudo, sua resistência à biodegradação pode restringir a aplicação em áreas ambientalmente sensíveis e sua capacidade de transferência de calor pode ser reduzida, devido à sua maior viscosidade [16].

### **2.1.3 Ésteres sintéticos**

Ésteres constituem uma ampla classe de compostos sintetizados de ácidos orgânicos e álcoois. Eles não geram produtos tóxicos na presença de fogo, tem boa biodegradabilidade, são resistentes à oxidação e podem absorver mais umidade do que o OM [2]. Usualmente, os ácidos de sua composição são saturados, o que confere aos ésteres sintéticos uma estrutura química muito estável [16].

Ésteres sintéticos são usados principalmente em transformadores onde são requeridos proteção ambiental e segurança contra incêndios. Assim como os fluidos à base de silicone, seu uso é geralmente combinado com isolamentos sólidos de alta temperatura, como a aramida [16]. Nos últimos anos, a aplicação de ésteres sintéticos em transformadores de potência também tem sido motivada pela sua capacidade de absorver umidade da celulose, propriedade associada à extensão de vida útil dos equipamentos.

### 2.1.4 Ésteres naturais

O éster vem da ligação química formada pela reação de um álcool e um ácido graxo. A ligação éster ocorre em ésteres naturais e sintéticos, mas não em OM ou fluidos à base de silicone [16]. A estrutura dos EN, conhecidos como triglicerídeos, é baseada em uma cadeia de glicerol, à qual são ligados três grupos de ácidos graxos, que podem ser distintos, como mostra a Figura 2.1 [2]. Na figura, as letras O, C e R representam oxigênio, carbono e cadeias de carbono, respectivamente. Linhas simples representam ligações simples e linhas duplas representam ligações duplas.

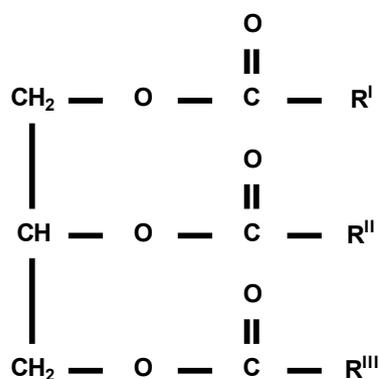


Figura 2.1. Estrutura do éster natural. Adaptada de [2].

Ésteres naturais são produzidos pelas plantas como parte de seu ciclo de crescimento. Originados de culturas consideradas renováveis, EN levam vantagem sobre os ésteres sintéticos por ter um balanço de carbono financeiramente positivo (créditos de carbono) [17]. Os EN são extraídos de grãos que podem ser originados de uma ampla variedade de óleos vegetais, como exemplificado na Figura 2.2 [18]. Óleos vegetais crus têm substâncias sólidas (como proteínas), fibras e líquidos (gorduras e óleos). As gorduras contêm um percentual relativamente alto de triglicerídeos saturados, que podem solidificar abaixo da temperatura ambiente (deixam de ser líquidos abaixo de 0°C ou menos, se forem de alta insaturação) [1]. Os óleos crus passam por distintas etapas de processamento e refino [15][18]. Os principais produtos de combustão dos EN são dióxido de carbono e água. Eles são regeneráveis, recicláveis e facilmente descartáveis.

Por muitos anos os EN foram considerados adequados apenas para o uso em capacitores. Suas boas propriedades de absorção de gás, graças à sua insaturação, são desejáveis em capacitores, cabos e transformadores de instrumentos [2]. O desenvolvimento dos EN foi

impulsionado por questões relacionadas ao meio ambiente. Nos anos 90, concessionárias de energia se interessaram por líquidos isolantes totalmente biodegradáveis, particularmente para uso em transformadores instalados em áreas costeiras, onde derramamentos de óleo poderiam contaminar a água [2]. A demanda ambiental levou empresas a desenvolver óleos vegetais como fluidos para transformadores, que passaram a ser comercializados em 1999 [16].



Figura 2.2. Óleos vegetais originados de sementes de plantas. Retirada de [18].

(a) coco, (b) soja, (c) palma. (d) rícino, (e) colza, (f) girassol

O alto ponto de combustão e sua boa biodegradabilidade podem ser consideradas as maiores vantagens dos EN. Mas entre suas desvantagens estão a fraca estabilidade à oxidação, o alto fator de dissipação, seu ponto de fluidez mais alto e maior viscosidade [2][16]. A baixa estabilidade à oxidação estaria associada às partes insaturadas da cadeia, propensas a oxidar. Muitos óleos vegetais atualmente disponíveis contêm aditivos capazes de reduzir o ponto de fluidez e aumentar a estabilidade à oxidação [2]. Propriedades relevantes de um OM e dois dos principais EN comerciais são contrastadas na Tabela 2.2 [2].

Com relação à normalização específica para os EN, avanços importantes foram registrados. A norma IEC 62770:2013 [19] descreve especificações e métodos de ensaios para EN novos, destinados a transformadores e equipamentos elétricos similares. No mercado norte-americano, dois documentos precederam a norma IEC de 2013: o guia IEEE C57.147-2008, que trata do manuseio e avaliação de EN, e a norma ASTM D6871-03 (2008), revisada posteriormente em 2017, que trata da especificação de EN para equipamentos elétricos.

Tabela 2.2. Propriedades gerais de OM e EN. Adaptada de [2].

Categoria	Óleo mineral	Éster natural	
	Fabricante	Cooper	ABB
Tipo	Nynas	FR3	BIOTEMP
Densidade a 20°C	10 GBN	0,92	0,91
Calor específico a 20°C (J/kg K)	0,88	1883	1943
Condutividade térmica a 20°C (W/m K)	1860	0,167	0,160
Viscosidade cinemática a 20°C (mm <sup>2</sup> /s)	0,126	78	97
Viscosidade cinemática a 100°C (mm <sup>2</sup> /s)	22	8	9
Ponto de fluidez (°C)	2,6	-21	-15~-20
Coeficiente de expansão (1/°C)	-50	0,00074	0,00068
Ponto de fulgor (°C)	0,00075	330	330
Ponto de combustão (°C)	148	360	360
Temperatura de autoignição (°C)	170	--	--
Classe de risco de incêndio (IEC 61100)	280	K2 (resistente ao fogo)	
Biodegradabilidade em 28 dias 301B (%)	O (propaga o fogo)	95~100	97~99

Do ponto de vista econômico, EN são mais baratos que líquidos à base de silicone e ésteres sintéticos, mas seu valor por litro chega a ser três a quatro vezes maior que do OM (informação cedida por TSEA Energia). Esta diferença de preço seria a principal causa para uma demanda ainda considerada baixa de EN, uma vez que o investimento não seria compensado por medidas de proteção de solo / água ou seguro contra incêndio. Por outro lado, o balanço de carbono favorável do EN é uma vantagem a ser considerada [17].

A utilização dos EN em transformadores cresceu consideravelmente nas últimas décadas, superando em 2014 o número de 600.000 unidades (somando-se equipamentos novos e reenchidos) operando pelo mundo, em sua grande maioria transformadores abaixo de 38kV, onde a aplicação do EN pode ser considerada relevante. A Figura 2.3 [20] mostra a estratificação das unidades transformadoras de potência com tensões a partir de 38kV e capacidade a partir de 10MVA. Este conjunto de transformadores de médio a grande porte representa menos de 1% do total de equipamentos operando com EN. É importante notar o registro de apenas uma unidade com tensão acima de 250kV e quatro unidades novas com potência acima de 100MVA, o que demonstra a necessidade de continuar investigando a aplicação do EN em grandes transformadores de alta tensão.

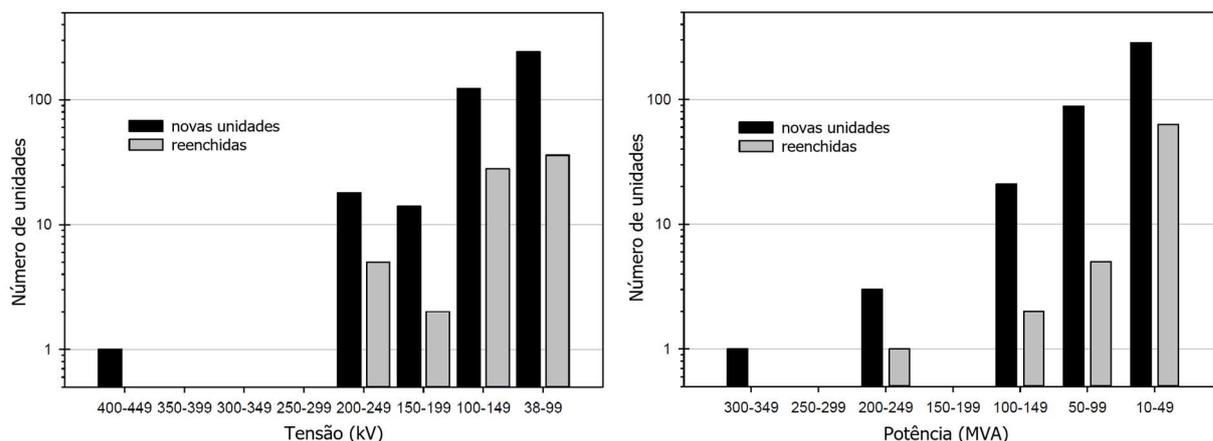


Figura 2.3. Tensão e capacidade de transformadores de potência em EN. Adaptada de [20].

O percentual significativo de equipamentos reenchidos (substituição de outros fluidos por EN) da Figura 2.3 [20] se deve à boa miscibilidade do EN, que pode ser misturado com OM e ésteres sintéticos. Na substituição ou mistura de OM e EN, o percentual residual de OM é determinante para que sejam mantidas as vantagens do EN, como a resistência ao fogo [16].

O maior equipamento imerso em EN, instalado na Alemanha em 2014, é mostrado na Figura 2.4 [20]. Trata-se de um transformador de 300MVA, 420kV, com 400 toneladas de massa total e 97 toneladas (~105.000 litros) de EN e tensões suportáveis são 1.425kV para IA e 1.050kV para IM (impulso de manobra). Outro trabalho [21] publicou em 2016 dados de um protótipo de saída de enrolamento que suportou IA de 1860kV, IM de 1560kV e CALD (induzida de longa duração) de 730kV por uma hora, com nível de descargas parciais de 5pC.



Figura 2.4. Maior transformador instalado imerso em EN. Retirada de [20].

## 2.2 Esforços elétricos aplicados a transformadores

Desde a especificação de um equipamento elétrico, até a investigação de uma possível falha que o retire de operação, é determinante conhecer sua interação com o sistema onde está inserido. Neste amplo cenário, faz-se necessário conhecer os possíveis esforços elétricos a que os transformadores imersos em líquido estão sujeitos no sistema elétrico de potência. O desempenho do sistema isolante frente a esses esforços é determinante na confiabilidade requerida do equipamento.

A influência mútua entre equipamentos e sistema elétrico tem sido objeto de pesquisa em todo o mundo. No caso de transformadores de alta tensão, o foco atual é o comportamento frente a transitórios de alta frequência [22]. Contudo, a investigação de um líquido isolante alternativo deve cobrir todas as formas de onda aplicáveis, durante os ensaios de fábrica e também durante a vida útil dos equipamentos. Neste contexto, torna-se pertinente uma revisão de conceitos relacionados a sobretensões e a ensaios dielétricos de transformadores de potência.

### 2.2.1 Sobretensões

Além do esforço elétrico causado pela tensão operativa, os equipamentos instalados em um sistema elétrico estão submetidos a sobretensões que podem ser divididas conforme sua forma (frequência), amortecimento e duração, do seguinte modo [22]:

- sobretensão temporária: normalmente de frequência fundamental e duração relativamente longa, podendo ser fracamente amortecida ou não amortecida. A frequência pode ser várias vezes menor ou maior do que a fundamental;
- sobretensão transitória: curta duração (alguns milissegundos ou menos), oscilatória ou não oscilatória, usualmente fortemente amortecida.

Quando sobretensões transitórias são seguidas por sobretensões temporárias, essas são consideradas eventos distintos. As sobretensões transitórias são usualmente unidirecionais e podem ser assim divididas [22]:

- sobretensão transitória de frente lenta: tempo até a crista entre  $20\mu\text{s}$  e  $5000\mu\text{s}$  e tempo de meia onda até  $20\text{ms}$ ;

- sobretensão transitória de frente rápida: tempo até a crista entre  $0,1\mu\text{s}$  e  $20\mu\text{s}$  e tempo de meia onda até  $300\mu\text{s}$ ;
- sobretensão transitória de frente muito rápida ou sobretensão de alta frequência: tempo até a crista inferior a  $0,1\mu\text{s}$  e duração total até  $3\text{ms}$ . As oscilações superpostas têm frequências entre  $30\text{kHz}$  e  $100\text{MHz}$ .

A dificuldade em definir limites de transição entre as classes de sobretensões deve ser levada em consideração, uma vez que determinados fenômenos podem gerar sobretensões que se enquadrariam em classes distintas. A Tabela 2.3 exemplifica as tentativas de dividir as sobretensões em classes [22]. No final da mesma tabela, as classes de sobretensões a que estão submetidos os transformadores de potência são relacionadas aos ensaios normalizados que buscam garantir a suportabilidade dielétrica destes equipamentos.

Tabela 2.3. Classes e formas de sobretensões. Retirada de [22].

Classe	Baixa frequência		Transitório		
	Contínua	Temporária	Frente lenta	Frente rápida	Frente muito rápida
Forma da tensão					
Faixas de formas de tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$5000\mu\text{s} \geq T_{cr} > 20\mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$20\mu\text{s} \geq T_1 > 0,1\mu\text{s}$ $T_2 \leq 300\mu\text{s}$	$100 \text{ ns} \geq T_f > 3 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_t \leq 3 \text{ ms}$
Forma normalizada da tensão	$f = 50 \text{ Hz ou } 60 \text{ Hz}$ $T_t^*$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_{cr} = 250\mu\text{s}$ $T_2 = 2500\mu\text{s}$	$T_1 = 1,2\mu\text{s}$ $T_2 = 50\mu\text{s}$	*
Ensaio normalizado de tensão suportável	*	Ensaio de frequência fundamental de curta duração	Ensaio de impulso de manobra	Ensaio de impulso atmosférico	*

\*) A ser especificado pela norma do respectivo equipamento.

As sobretensões transitórias de frente muito rápida, ou de alta frequência, geralmente têm amplitude inferior à tensão normalizada de impulso atmosférico e podem ser geradas durante chaveamento de seccionadoras, fechamento de disjuntores e curtos-circuitos monofásicos em linhas de transmissão, próximos à subestação [22]. As faixas de frequência de sobretensões transitórias podem ser associadas ao tipo de ocorrência que as origina no sistema de potência, como apresentado na Tabela 2.4 [23].

Tabela 2.4. Ocorrência no sistema e faixa de frequência de transitórios. Adaptada de [23].

Ocorrência no sistema de potência	Faixa de frequência da tensão transitória
Ferro ressonância	0.1Hz ~ 1kHz
Rejeição de carga	0.1Hz ~ 3kHz
Abertura de falta	50Hz ~ 3kHz
Chaveamento de linha	50Hz ~ 20kHz
Tensões transitórias de recuperação	50Hz ~ 100kHz
Sobretensões atmosféricas	10kHz ~ 3MHz
Manobra em chave seccionadora a gás	100kHz ~ 50MHz

### 2.2.2 Ensaios padronizados para transformadores de potência

Os ensaios dielétricos realizados nos equipamentos buscam garantir sua suportabilidade aos esforços elétricos a que estarão submetidos no sistema de potência. Os ensaios padronizados para os transformadores de potência são definidos pela norma ABNT NBR 5356-3:2007 [24]. Os ensaios de rotina, aplicáveis a todos os transformadores fabricados, variam com a tensão máxima do equipamento, como mostra a Tabela 2.5. As formas de onda aplicadas durante os ensaios normalizados e suas associações às sobretensões são as seguintes [22][24]:

- Ensaios de tensão aplicada a frequência industrial, tensão induzida de curta duração (CACD) e tensão induzida longa duração (CALD) – associados à suportabilidade a transitórios de frente lenta: aplicada tensão alternada senoidal, com frequência próxima à nominal, por um período que varia entre um minuto e uma hora, dependendo da tensão máxima do equipamento. A medição de descargas parciais durante o ensaio de tensão induzida de curta duração é obrigatória para transformadores com tensão máxima acima de 72,5kV;
- Ensaio de impulso de manobra (IM) – associado à suportabilidade a transitórios de frente lenta: aplicada onda de tensão impulsiva com tempo de frente entre 100 $\mu$ s e 250 $\mu$ s, tempo acima da tensão especificada superior a 200 $\mu$ s e tempo total (entre zero virtual e primeira passagem por zero) de pelo menos 500 $\mu$ s. Vale notar que a forma de onda difere da onda normalizada de 250 $\mu$ s x 2500 $\mu$ s, normalmente aplicada a circuitos magnéticos não saturáveis;

- Ensaio de impulso atmosférico (IA) - associado à suportabilidade a transitórios de frente rápida: aplicadas ondas de tensão impulsiva com tempo de frente de  $1,2\mu\text{s}$  e tempo de meia onda de  $50\mu\text{s}$ . No ensaio são aplicadas sequências de impulsos plenos e de onda cortada. No impulso atmosférico com onda cortada (IAC), a onda aplicada tem amplitude de 110% do valor pleno, com tempo de corte entre 2 e  $6\mu\text{s}$ . Em transformadores de potência imersos em líquido, os ensaios de impulso atmosférico e de manobra são normalizados com polaridade negativa, a fim de reduzir a possibilidade de descargas externas durante o teste.

Ainda não há padronização para realização de um ensaio para verificar a suportabilidade dos transformadores frente a sobretensões de alta frequência, apesar de ser importante para garantir a confiabilidade de equipamentos sujeitos a esta classe de transitórios [22].

Tabela 2.5. Requisitos para os ensaios dielétricos de transformadores. Adaptada de [24].

Tensão máxima do equipamento $U_m$ kV	Ensaio					
	Impulso atmosférico		Impulso de manobra (IM)	Tensão induzida de longa duração (CALD)	Tensão induzida de curta duração (CACD)	Tensão suportável à frequência industrial
	Onda plena (IA)	Onda cortada (IAC)				
$U_m \leq 72,5$	Tipo	Tipo	Não aplicável	Não aplicável	Rotina	Rotina
$72,5 < U_m \leq 170$	Tipo	Tipo	Não aplicável	Especial	Rotina	Rotina
$170 < U_m < 300$	Tipo	Tipo	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina
$U_m \geq 300$	Rotina	Rotina	Rotina (ver nota)	Rotina	Especial (ver nota)	Rotina

NOTA Se o ensaio de tensão induzida de curta duração for especificado, o ensaio de impulso de manobra não é necessário. Isto deve estar claramente definido nas especificações.

As tensões aplicadas nos ensaios citados na Tabela 2.5 têm amplitudes, durações e frequências distintas, dificultando uma comparação sobre a severidade imposta por cada teste. Para comparar os esforços elétricos impostos pelos valores especificados para ensaios e operação contínua, deve ser usado um fator que coloque todas as tensões numa mesma base. O fator DIL (*design impulse level*) [7][25] fornece relações que permitem calcular valores equivalentes ao ensaio de tensão suportável à frequência industrial. Logo, as distintas tensões de teste e operação podem ser comparadas. O fator DIL é usado na Seção 4.1.2 deste trabalho, a fim de adotar o esforço elétrico máximo nas simulações computacionais.

## **2.3 Disrupção em isolantes sólidos e líquidos**

Uma disrupção no isolamento ocorre devido ao estabelecimento de um canal de condução através do material. No caso de isolantes fluidos, este canal de condução normalmente se extingue após uma fração de segundo e o dielétrico volta a estar apto a desempenhar seu papel. Isto não significa que a composição química e a capacidade de isolar do fluido não tenham sido afetadas. Após cada evento de disrupção, o fluido torna-se mais condutivo, até que a perda de suas características isolantes determine a necessidade de sua substituição [26]. Por sua vez, isolamentos sólidos geralmente não podem ser substituídos sem demoradas e custosas intervenções [14] e sua interface com o líquido é considerada o elo fraco do sistema de isolamento composto. A presença dos isolamentos sólidos pode promover descargas superficiais, principalmente após a ocorrência de uma descarga inicial [27]. Logo, para se avaliar a substituição do isolante líquido em transformadores, é importante compreender a formação de descargas nos isolamentos sólidos, assim como no líquido e na interface entre esses materiais. O objetivo desta seção é apresentar uma breve revisão de conceitos relacionados à disrupção nestes meios e abordar alguns ensaios não destrutivos em materiais isolantes. Estes conceitos serão úteis no entendimento de temas discutidos no restante do texto.

### **2.3.1 Disrupção nos sólidos**

Isolamentos sólidos são parte importante do projeto dielétrico de transformadores de potência e estão sujeitos a esforços de natureza elétrica, mecânica, química e térmica. Eles dão suporte mecânico a partes condutoras e isolam partes com potenciais distintos. Os sólidos presentes nos enrolamentos dos transformadores são basicamente materiais à base de celulose. Estes isolantes possuem poros entre suas fibras que são preenchidos com o líquido em que estão imersos, alterando sua permissividade [9]. Apesar de sua presença ser indispensável, a inclusão de isolamentos sólidos está associada à promoção de descargas [27]. Logo, faz-se necessário conhecer os processos associados à disrupção e movimentação de cargas neste meio.

A condução elétrica em sólidos envolve, além de transporte eletrônico e iônico, correntes devido a processos de polarização, como o movimento lento de dipolos e polarização interfacial. A condução por elétrons livres e íons em sólidos é rara em baixos níveis de campo

elétrico e temperatura. Porém, próximo à disrupção, há um aumento exponencial de corrente (normalmente com campo não uniforme) devido à injeção de cargas vindas de um eletrodo e/ou da multiplicação de elétrons no interior do material. Os fatores que influenciam o crescimento exponencial da corrente são a injeção de portadores de carga a partir dos eletrodos, a multiplicação destes portadores no interior do sólido e as fontes adicionais de portadores (impurezas e defeitos na estrutura cristalina presentes em escala industrial). Em condições práticas, um mesmo sólido exibe uma larga faixa de suportabilidade, influenciada por parâmetros como temperatura, umidade, duração do teste, tipo de tensão aplicada (alternada, contínua ou impulsiva), pressão nos eletrodos, descargas no líquido envolvendo o sólido, impurezas e cavidades. Os processos de disrupção dos materiais sólidos podem durar segundos, horas ou mesmo anos, sendo comentados a seguir [28]:

a) Disrupção intrínseca: se o material é puro e homogêneo, sob condições controladas, a suportabilidade aumenta para curtos períodos de tempo (10ns a 1s). O limite de suportabilidade é chamado de suportabilidade elétrica intrínseca, a qual é uma propriedade do material associada à temperatura. Sendo uma disrupção eletrônica, sua medição dificilmente é conseguida em laboratório, envolvendo campos na casa de MV/cm. As impurezas presentes agem como armadilhas para os elétrons do material, que ganham energia suficiente para cruzar a banda de valência para a banda de condução, num processo que demanda muita energia.

b) Disrupção por *streamer*: em determinadas condições, elétrons atravessam de um eletrodo para outro ganhando energia entre as colisões. Se o caminho livre é suficiente para produzir um elétron adicional, haverá avalanche eletrônica como ocorre em gases, mas num processo muito mais lento. Se a avalanche atinge um tamanho crítico, haverá disrupção como na teoria do *streamer*. O leitor interessado pode se valer da referência [28] para investigar as teorias da avalanche eletrônica e *streamer*.

c) Disrupção eletromecânica: substâncias que deformam sem se quebrar (materiais facilmente deformáveis), quando submetidas à forças de compressão eletrostática, podem exceder seu limite de suportabilidade a compressão. A força de compressão vem da atração entre as superfícies carregadas, onde a tensão é aplicada. O material se deforma diminuindo a espessura no ponto em que o campo elétrico é elevado, levando à disrupção. Campos da ordem de MV/cm podem exercer pressão de vários kN/m<sup>2</sup>.

d) Disrupção por arborescência: em meios compostos por líquidos e sólidos, como o isolamento de transformadores, a tensão de disrupção vai ser mais influenciada pelo meio líquido (mais fraco) que pelo sólido. A disrupção em sólido não acontece em um canal único de descarga, mas assume arborescência devido às disrupções locais. Sendo a permissividade relativa ( $\epsilon$ ) do meio líquido inferior a do sólido, o campo elétrico no líquido vai ser maior que no sólido pela relação entre os meios:  $\epsilon_{\text{líquido}} E_{\text{líquido}} = \epsilon_{\text{sólido}} E_{\text{sólido}}$ . Quando a espessura do meio diminui (junção com meio sólido onde eletrodo tende a zero e o campo tende a infinito) o campo sobre ele aumenta e há disrupção na junção entre os meios. Altos valores de campo elétrico podem levar à disrupção local, resultando em muitos canais de descarga na superfície do sólido. A disrupção por arborescência ocorre basicamente em campos não uniformes.

e) Disrupção térmica: quando o isolamento é estressado, ele é aquecido devido à presença de correntes de condução e perdas dielétricas devido a polarização. A condutividade aumenta com a temperatura e a disrupção térmica ocorre quando a taxa de aquecimento excede a taxa de resfriamento (condição para instabilidade). As imperfeições interferem dando condutividade ao dielétrico, permitindo movimentação de cargas e aumento da temperatura. A suportabilidade à disrupção térmica é menor em campos alternados e diminui com o aumento da frequência da fonte. A disrupção térmica, à temperatura ambiente, ocorre em níveis de campo da ordem de MV/cm. Mas é importante lembrar que, mesmo em tensões normais de operação, os isolantes sólidos dos transformadores também são termicamente envelhecidos. Segundo o guia de carregamento de transformadores da IEC [29], comparado a uma expectativa de vida normal, a vida útil do papel Kraft (papel isolante aplicado a condutores de transformadores) pode cair pela metade se temperatura de operação é elevada  $6^{\circ}\text{C}$ , assim como pode dobrar se a temperatura cai  $6^{\circ}\text{C}$ .

f) Disrupção por erosão: materiais isolantes sólidos têm vazios ou cavidades no seu interior (ou entre eles e partes energizadas preenchidas com o meio líquido), de menor suportabilidade e menor permissividade. Isto leva a um campo elétrico mais alto nessas regiões. Cada vez que a tensão na cavidade atinge a tensão de disrupção, há uma descarga que pode se repetir num ciclo alternado (tensão zero na cavidade durante a disrupção e volta a crescer nos ciclos positivos e negativos). Quando há descarga na cavidade, por instantes as paredes da cavidade passam a ser eletrodos e há movimentos de elétrons e íons (bombardeamento do catodo) que podem aumentar a temperatura (instabilidade local). Canais e erosões são formados, levando à perda de material, redução de suportabilidade e disrupção por erosão.

g) Disrupção por trilhamento: trilhamento é a formação de caminhos condutores permanentes (usualmente carbono), através da superfície do isolante, que resultam na sua degradação. Esse processo de degradação ocorre quando há presença de substâncias orgânicas no isolante. A presença de impurezas e umidade contribui para este tipo de disrupção. A estrutura dos polímeros influencia o trilhamento, que pode ser reduzido com a adição de substâncias que inibem a carbonização.

### **2.3.2 Disrupção nos líquidos**

Óleos isolantes naturais (minerais ou vegetais) e sintéticos são usados em muitos equipamentos elétricos. O processo de entendimento da disrupção em líquidos está em estágio menos avançado que dos isolamentos sólidos. Uma das linhas de estudo existentes entende que a disrupção em um líquido homogêneo puro é similar a do gás, baseado em avalanche eletrônica e ionização de átomos por colisões de elétrons (ejetados do catodo). A presença de contaminantes tem grande influência na disrupção. As partículas em suspensão são polarizadas e direcionadas para regiões de estresse máximo. O acúmulo de partículas tende a formar uma ponte através de canais que levam à disrupção. Impurezas também podem ser bolhas e a disrupção em bolhas pode desencadear a disrupção no líquido. A disrupção nos líquidos pode ser dividida através dos seguintes mecanismos [28]:

a) Disrupção eletrônica (intrínseca): a emissão e o aumento de campo por mecanismos de emissão termiônica são considerados responsáveis pela corrente no catodo. O retorno de íons positivos e impurezas carregadas para o catodo podem aumentar o campo e a emissão local de elétrons. Esses elétrons injetados no líquido ganham energia do campo aplicado para ionizar moléculas em colisões e iniciar o processo de avalanche. A teoria eletrônica permite prever a suportabilidade do líquido, mas o processo é mais lento nesse meio. A disrupção eletrônica vale para líquidos purificados e os campos envolvidos são da ordem de MV/cm.

b) Disrupção a partir de partículas sólidas suspensas: partículas sólidas (impurezas) são polarizadas e se movem para a região de campo mais intenso. Se a permissividade da partícula é distinta do líquido, sua presença pode causar concentração de campo e atrair outras partículas, formando uma ponte através do canal. Quando um aumento do campo no líquido entre as

partículas atinge um valor crítico, ocorre a disrupção. A suportabilidade à disrupção depende do material, quantidade / tamanho das partículas e da viscosidade do líquido.

c) Disrupção a partir de bolhas: dentre os vários processos que levam à formação de bolhas nos líquidos, pode-se citar alterações de temperatura e pressão, bolhas de gás na superfície dos eletrodos, dissociação de produtos por colisão de elétrons e vaporização de líquido por descargas de corona. Quando o campo é suficiente para ionizar o gás, descargas ocorrem nas bolhas e podem levar à disrupção no líquido. O campo elétrico crítico para disrupção no líquido depende do tamanho inicial das bolhas, que é afetado pela pressão e temperatura externas.

d) Processo de eletrificação envolvendo eletro-convecção: em líquidos purificados sujeitos a altas tensões, a condução elétrica resulta principalmente de cargas carregadas injetadas no líquido, vindas dos eletrodos. A carga espacial resultante leva à instabilidade hidrodinâmica, produzindo corrente de convecção. Quando há uma significativa formação de cargas espaciais, é bastante provável que elas se movimentem. O aumento da tensão torna a convecção turbulenta e a condição de instabilidade está associada a uma tensão crítica. O transporte de carga é aumentado pelo movimento do líquido e a chave para atingir a instabilidade é a velocidade do fluxo local ser maior que a velocidade de derrapagem iônica. Este processo de eletro-convecção é presente no líquido do transformador.

e) Processo de eletrificação estática em transformadores de potência: a eletrificação estática em transformadores é um fenômeno interfacial que envolve fluido e isolamento sólido. Seu mecanismo envolve uma fonte de cargas e seu acúmulo em uma região. O movimento do líquido isolante está presente no processo de dissipação das perdas do transformador (convecção). O processo de refrigeração dos transformadores pode envolver circulação natural do fluido ou circulação forçada, promovida por bomba(s) de óleo. Quando o óleo do transformador é forçado nos radiadores e tanque, ele adquire uma carga eletrostática de igual número de íons positivos e negativos. Quando o fluido passa nos enrolamentos e no isolamento sólido, a isolação fica carregada negativamente e o líquido positivamente, com a separação de cargas ocorrendo na interface entre os meios isolantes. Transformadores de potência de grande porte são mais afetados pela grande quantidade de material isolante e necessidade de uma maior velocidade de circulação do líquido.

## **2.4 Ensaios não destrutivos em isolamentos**

Esta seção é dedicada a ensaios capazes de informar sobre a qualidade de sistemas isolantes de transformadores. Ao contrário de seções anteriores onde a disrupção era o foco, nesta seção os comportamentos dos materiais isolantes são examinados em níveis de estresse muito mais baixos, para evitar qualquer efeito destrutivo. Os ensaios usualmente relacionados a propriedades dielétricas são medições de resistência de isolamento ou resistividade, medição de capacitâncias e fator de perdas dielétricas. Outro ensaio não destrutivo a ser tratado nesta seção é a detecção de descargas parciais. O entendimento destes ensaios e uma revisão básica sobre polarização dielétrica serão úteis nas comparações de propriedades, tema do Capítulo 3.

### **2.4.1 Propriedades dinâmicas dos dielétricos – efeitos da polarização**

Testes envolvendo propriedades dinâmicas do dielétrico, normalmente usados para quantificar envelhecimento dos isolantes, não são abordados nesse trabalho. Contudo, é pertinente uma rápida discussão sobre os efeitos relacionados à polarização dielétrica. Quando um isolamento é submetido a um campo elétrico externo, muitos tipos de dipolos podem ser excitados. Sobre os processos de polarização e comportamento de dipolos, cabe ressaltar [28]:

- Dipolos permanentes do material podem alinhar-se na presença de campo;
- A polarização eletrônica é efetiva em cada átomo ou molécula e é bastante rápida;
- A polarização iônica ocorre em materiais que contêm dipolos permanentes que formam íons não existentes na ausência de campo ou em temperaturas de operação;
- Polarização dipolar é associada a moléculas com dipolos permanentes, governadas pela ação de energias térmicas, ocorrendo em frequências até GHz ou MHz;
- A polarização interfacial acontece em dielétricos compostos de mais de um isolante. A divergência entre permissividades e condutividades leva cargas a se moverem para a interface dos materiais. A polarização interfacial é lenta e ocorre em frequências industriais.
- Há também a polarização por portadores de cargas (íons) que saltam entre as bandas de condutividade, ocorrendo em materiais amorfos.

### **2.4.2 Medição de fator de perdas dielétricas e capacitância**

Um material dielétrico ou sistema isolante pode ser caracterizado pelo seu inerente fenômeno de polarização que está relacionado à sua capacitância  $C$  e seu poder de dissipar perdas que é quantificado pelo fator de perdas dielétricas, ou fator de dissipação, ou tangente  $\delta$ . Circuitos de teste simples permitem calcular parâmetros, a partir da medição de outras grandezas, de modo a qualificar o dielétrico sob teste [30]. O fator de perdas dielétricas (tangente  $\delta$ ) é a relação entre a corrente resistiva (nula para um isolante ideal) e a corrente capacitiva (associada à capacitância do dielétrico). Quanto menor esse parâmetro, melhor será o dielétrico.

Medições de propriedades dielétricas à frequência industrial são testes de rotina, mas técnicas de processamento e controle têm avançado. As medições de capacitância e perdas dielétricas são importantes, mas geralmente são feitas somente na frequência de operação, pois medições muito demoradas podem gerar altas perdas e disrupção térmica. A capacitância e a perda dielétrica são basicamente constantes com o aumento da tensão, e um aumento da tangente  $\delta$  (chamado de Joelho de ionização) é uma indicação preliminar da ocorrência de descargas parciais [28].

### **2.4.3 Medição de descargas parciais**

Descarga parcial é definida como uma descarga que supera, não completamente, o isolamento entre os eletrodos [30]. Essa descarga elétrica localizada pode ocorrer adjacente ao condutor ou distante dos eletrodos. Também pode ser considerada uma consequência de concentração de campo local no isolamento ou em sua superfície. Estas descargas geralmente aparecem com pulsos de duração muito menor que  $1\mu\text{s}$ .

Cabe lembrar que corona é uma forma de descarga parcial comum em meios gasosos, ocorrendo geralmente em torno dos condutores, quando a tensão excede um valor crítico. Por sua vez, descargas parciais ocorrem em meio sólido, líquido, gasoso ou na combinação destes. Descargas parciais podem ser produzidas em cavidades ou bolhas de dielétricos, na fronteira de diferentes materiais isolantes, como corona em dielétricos em campos não uniformes e por impacto contínuo de descargas em sólidos, formando arborescência. Cada evento de descarga

causa deterioração do isolante pelo impacto de elétrons de alta energia ou íons acelerados, causando transformações químicas. A ocorrência de descargas depende do tipo de tensão aplicada e do material. A detecção e medição de descargas parciais está baseada na troca de energia durante as descargas, que podem se manifestar como pulsos de corrente elétrica, perdas dielétricas (aumentando o fator de dissipação), radiação eletromagnética, ruído, aumento da pressão e reações químicas [28].

As perdas adicionais geradas por descargas parciais podem ser pequenas quando comparadas às geradas nos processos de polarização. A corrente de descarga parcial não pode ser medida diretamente e é um pulso muito rápido (da ordem de ns). Métodos visuais e acústicos são usados para detectar descargas parciais, mas o método mais usado nas medições é o elétrico, que visa separar os pulsos de corrente (ou de tensão) associados a esse tipo de descarga [24]. As medições de descargas parciais e os seus efeitos de deterioração vêm sendo muito estudados nas últimas décadas.

## **2.5 Considerações finais do capítulo**

Este capítulo apresentou as principais propriedades dos líquidos isolantes mais usados em transformadores de potência e os esforços elétricos a que estão submetidos. As sobretensões tratadas foram associadas aos ensaios dielétricos padronizados, cujas características mais relevantes foram comentadas. Foram abordados os principais processos que levam a ruptura nos sólidos e líquidos, principais componentes do projeto de isolamento sob estudo. Ao final, os principais ensaios não destrutivos aplicados a materiais e sistemas isolantes foram abordados.

Apresentados os conceitos úteis a compreensão deste trabalho, faz-se necessário analisar as consequências da substituição do OM pelo EN nos parâmetros que podem impactar o projeto de isolamento de transformadores de potência. As similaridades e divergências entre as principais características dos sistemas isolantes com os fluidos comparados, são o tema do Capítulo 3 a seguir.

### **3 PARÂMETROS DE IMPACTO NO PROJETO COM ÉSTER NATURAL**

Transformadores de potência têm sido projetados e fabricados em OM por mais de um século. A substituição do líquido isolante para equipamentos de alta tensão não é uma tarefa trivial. As adequações necessárias ao projeto de isolamento com um fluido alternativo devem ser fundamentadas na comparação de comportamentos, suportabilidades dielétricas e testes. As características consideradas impactantes para adequação do projeto de isolamento ao EN são discutidas neste capítulo. O item 3.1 trata da suportabilidade a tensões alternadas e comparação de parâmetros que a influenciam. Propriedades associadas à formação de descargas são comparadas no item 3.2. Por fim, outros parâmetros de impacto para o projeto em EN são abordadas no item 3.3.

#### **3.1 Suportabilidade a tensões alternadas e parâmetros de influência**

A medição da tensão alternada (CA) na qual ocorre a disrupção entre dois eletrodos, em determinadas condições de ensaio, é um teste importante e popular de líquidos isolantes, pois fornece uma indicação primária da sua qualidade [16]. Mas a análise deste parâmetro não pode ser restrita a líquidos novos ou purificados, nem avaliados sem variação da área dos eletrodos. A suportabilidade CA deve considerar também o envelhecimento e a presença de contaminantes encontrados nos transformadores de potência. Como os fluidos isolantes têm propriedades físico-químicas diferentes, envelhecimento, contaminações e áreas de eletrodo podem implicar variações distintas da suportabilidade. Tensões de disrupção CA são comparadas a seguir.

##### **3.1.1 Suportabilidade de líquidos novos e termicamente envelhecidos**

A tensão de ruptura CA do fluido isolante é um indicativo de sua capacidade de suportar estresse em campo elétrico quase uniforme (como parte da região entre enrolamentos e entre estes e tanque). A Tabela 3.1 [16] apresenta comparações da tensão de disrupção CA dos fluidos para testes normalizados. Consideradas as variações de métodos de ensaio, as tensões disruptivas dos dois fluidos novos podem ser consideradas equivalentes. Cabe ressaltar que as tensões disruptivas em EN superam as do OM, dependendo do arranjo de teste adotado.

Tabela 3.1. Tensões de ruptura CA e de início de descargas parciais. Adaptada de [16].

Tensão	Norma de ensaio	Óleo mineral	Éster natural
Disrupção CA	IEC 60156 com canal de 2.5mm	>75 kV	>75 kV
	ASTM 1816 com canal de 2.0mm	60 kV	76 kV
	ASTM D877	55 kV	43 kV
Início de Descargas Parciais	IEC 61294	38.2 kV	34.0 kV
	IEC 61294 (revisão sugerida)	23.2 kV	25.6 kV

Ensaio de tensão de ruptura CA não devem ser diretamente associados com a habilidade de um líquido suportar estresse dielétrico, devido a sua sensibilidade frente a contaminantes. É importante registrar que estes ensaios são realizados com pequenas amostras de líquido, em campo elétrico quase uniforme. Tensões de ruptura CA são mais usadas para considerar um líquido isolante apto ao uso, do que propriamente para avaliar suas características [16]. Valores de referência para tensões iniciais de aparecimento de descargas parciais podem ser considerados equivalentes nos dois fluidos, mas este tema é discutido na Seção 3.2.1.

Durante o processo de envelhecimento térmico acelerado dos fluidos, o EN apresenta maior tensão de ruptura CA que o OM, apesar dos aumentos significativos registrados no fator de potência e na acidez do EN degradado [31]. A suportabilidade CA também deve ser considerada para o isolamento sólido. A Figura 3.1 [32] mostra resultados de testes realizados com os líquidos e com papelão impregnado quando novo e durante processo de degradação térmica (envelhecimento acelerado).

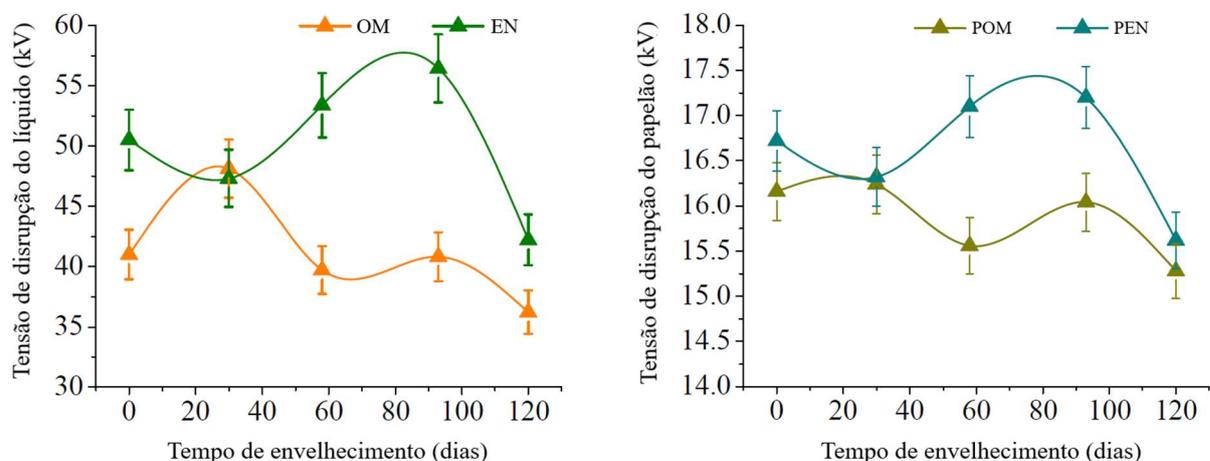


Figura 3.1. Disrupção CA em líquido e papelão envelhecidos. Adaptada de [32].

Tanto o EN líquido quanto o papelão impregnado com EN (PEN no gráfico a direita da Figura 3.1) apresentaram melhor desempenho com relação às tensões de ruptura CA que o OM líquido e o papelão impregnado com OM (POM no gráfico a direita).

Como as tensões suportadas pelo isolante dependem fortemente da presença de contaminantes (umidade, partículas sólidas e bolhas de gás) [4], a comparação da influência de contaminações nos líquidos merece ser detalhada.

### **3.1.2 Contaminação com umidade**

A presença de umidade nos isolamentos à base de celulose afeta o desempenho dielétrico do sistema isolante de transformadores de potência, diminuindo sua suportabilidade dielétrica e acelerando o processo de envelhecimento. A umidade pode ser introduzida no processo fabril ou por problemas de vedação dos equipamentos, sendo também produzida durante a degradação da celulose. A água pode estar presente nos fluidos isolantes na forma dissociada (água livre) ou associada (diluída), como encontrada em baixos níveis de umidade relativa. Fluidos polares tendem a formar pontes de hidrogênio com moléculas de água, de forma que a água pode se dissolver facilmente. Contudo, para transformadores de alta tensão em operação, as tensões de ruptura dos líquidos são normalmente elevadas devido à ausência de moléculas livres de água (dissociadas), que poderiam ser facilmente ionizadas por portadores de carga [4][16].

O limite de saturação com água do EN é de cinco a oito vezes maior que do OM [1]. Logo, o conteúdo de umidade absoluta medido no EN é geralmente maior que no OM. Entretanto, a umidade relativa de saturação do EN é tipicamente menor [4][33]. Para ambos os fluidos, a suportabilidade CA é quase constante até um determinado valor de umidade relativa (percentual do valor de saturação). Uma queda abrupta da tensão de ruptura CA em EN ocorre a um valor mais baixo de umidade relativa (~25%) do que acontece em OM (~45%), como mostra a Figura 3.2 [3]. Estes valores de umidade relativa correspondem a 24ppm para OM e 245ppm para EN. Como estes níveis de umidade estão muito acima dos normalmente encontrados em transformadores de potência, a queda drástica da tensão de ruptura mostrada na Figura 3.2 não significa problema para os equipamentos imersos em EN. Cabe registrar também que a solubilidade da água nos dois fluidos aumenta com a temperatura [34].

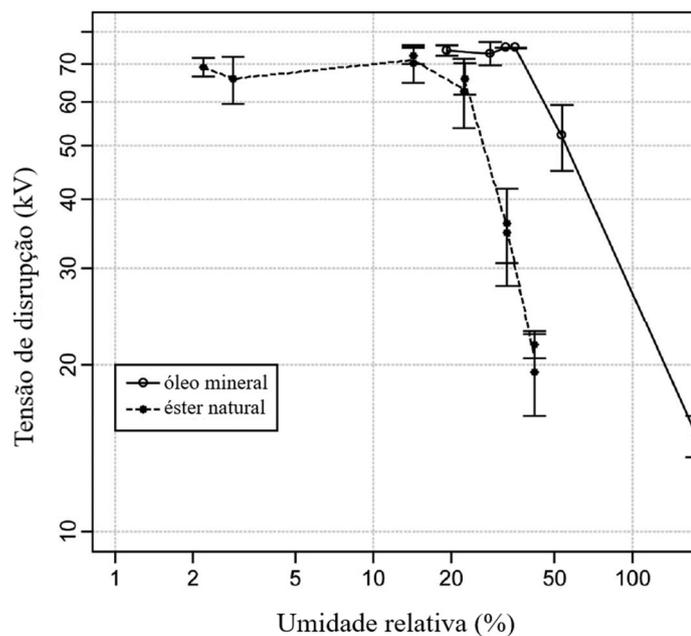


Figura 3.2. Tensão de ruptura em função da umidade relativa. Adaptada de [3].

Resultados apresentados em outro estudo [32] também mostram que, embora o EN tenha maior umidade absoluta e acidez ao longo do período de envelhecimento, sua menor umidade relativa ajuda a manter sua suportabilidade CA acima da suportabilidade do OM.

Na operação dos transformadores, a umidade presente na celulose pode migrar para o líquido. Esta migração depende dos coeficientes de difusão dos materiais envolvidos. No isolamento imerso em EN, a umidade tende a permanecer no fluido, enquanto em OM a umidade tende a permanecer no papelão [32]. Sendo altamente higroscópico, o coeficiente de difusão do EN (muito superior ao do OM) o permite extrair umidade da celulose [5]. Este efeito, que contribui para a secagem do papelão e evita altas densidades de corrente na sua superfície, foi confirmado experimentalmente [3], medindo-se o teor de umidade dos líquidos no início e no final de testes de medição de descargas parciais (ensaios sem a presença de celulose) e testes de descargas na superfície do isolamento (papelão), também chamadas de descargas escoamento. Nos dados apresentados na Figura 3.3 [3] pode ser visto que o teor de umidade dos dois fluidos não aumenta apreciavelmente após a realização dos testes onde não há a presença do papelão (o aumento observado na parte superior da figura é imputado à difusão da atmosfera para o líquido). No entanto, o aumento da umidade após os testes onde há presença de papelão é bastante significativo para o EN, como pode ser visto no gráfico da parte inferior da Figura 3.3. Isto é um indicativo que a extração de umidade promovida pelo fluido vegetal pode ajudar a garantir o aumento da vida útil da celulose.

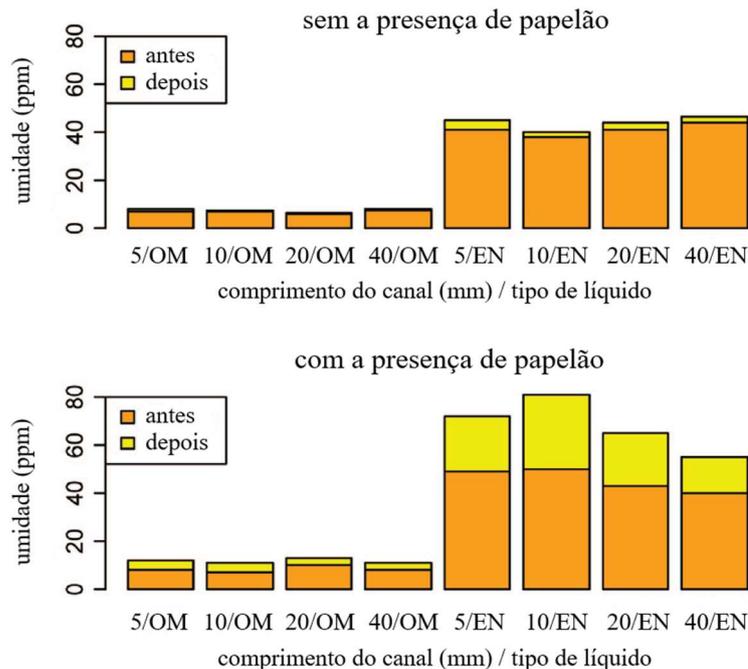


Figura 3.3. Umidade nos líquidos, antes e após ensaios. Adaptada de [3].

É preciso considerar também possíveis efeitos negativos do aumento da umidade no EN, devido ao processo de secagem do isolamento sólido. O EN pode se comportar como o elemento de sacrifício do sistema isolante composto. Uma ocorrência com um reator em derivação, de tensão máxima 145kV, que apresentou problema de vedação, é detalhada em um estudo de caso [20]. A deficiência de estanqueidade, que permitiu a exposição do reator a um ambiente úmido, o levou a operar como se fosse um equipamento de respiro livre por cerca de sete anos. Apresentadas as variações de parâmetros do EN, as conclusões consideradas mais relevantes foram [20]:

- O aumento do número de neutralização (reação química pela presença de umidade), é muito mais rápido do que o efeito da oxidação na viscosidade do fluido;
- A estabilidade da viscosidade seria uma indicação que o inibidor de oxidação do fluido não foi completamente consumido;
- Não houve perda significativa de desempenho dielétrico do fluido, com a tensão a disrupção mantida acima dos limites normalizados, mesmo com a umidade ultrapassando 180ppm.

A manutenção da suportabilidade CA com o alto valor de umidade absoluta presente no reator, ilustra a boa tolerância do EN à presença de água.

### 3.1.3 Contaminação com partículas

Além da presença de umidade, fluidos de transformadores de potência são geralmente contaminados por partículas de celulose e partículas metálicas durante o processo de fabricação. Estudos apontam que o EN é menos sensível que o OM, tanto na presença de partículas de celulose, como de partículas metálicas [4][35]. Campos médios de disrupção para canais de líquidos contaminados por partículas de celulose são mostrados na Figura 3.4a [4]. As áreas sombreadas do claro ao escuro representam o aumento dos níveis de contaminação. Além de OM e EN, a figura inclui dados de éster sintético, o qual não é foco deste trabalho. Para uma contagem de 20.000 partículas de celulose, a tensão de disrupção do OM cai para 50% do seu valor purificado. Neste nível de contaminação a suportabilidade do OM é 20% inferior à do EN. O aumento do número de partículas reduz as tensões disruptivas devido à promoção do efeito de iniciação de *streamers* nos líquidos, mas a redução da suportabilidade é mais pronunciada no OM que nos ésteres, incluindo o de origem vegetal [35].

A Figura 3.4b mostra os campos médios de disrupção dos fluidos contaminados por partículas de cobre, além da celulose. A tensão de ruptura do OM foi mais afetada com o aumento do conteúdo de partículas do que a do EN. Apesar de partículas metálicas existirem em pequena quantidade nos transformadores de potência em operação, elas podem reduzir as tensões de disrupção muito mais significativamente. Quando contaminados com 3.000 partículas de cobre, a tensão de ruptura cai para 40% e 73% dos valores purificados de OM e EN, respectivamente [4].

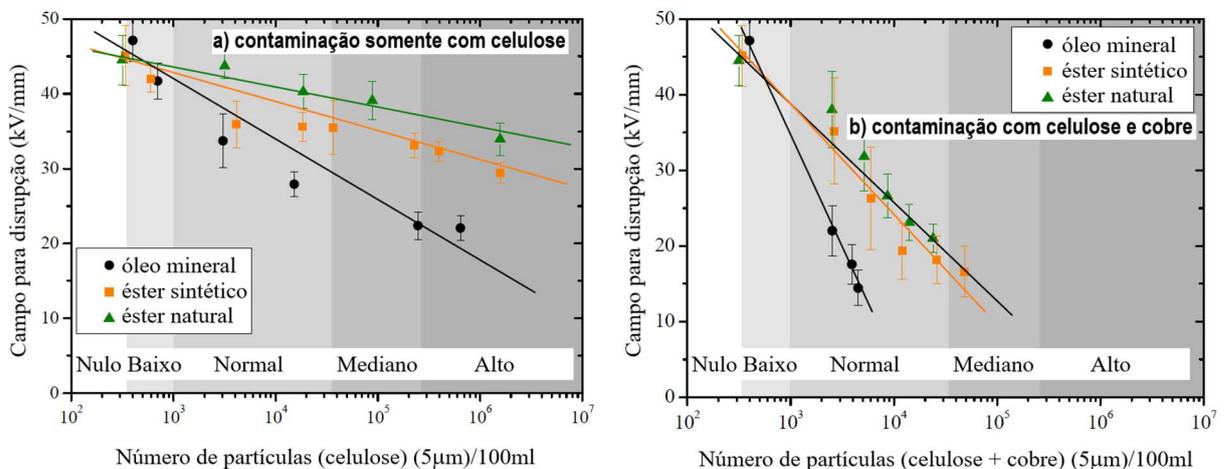


Figura 3.4. Disrupção em função da contaminação com partículas. Adaptada de [4].

A diferença no efeito da contaminação por partículas entre os líquidos isolantes pode ser atribuída às suas viscosidades. Partículas carregadas podem se mover mais rapidamente em OM, afetando mais a suportabilidade dielétrica do fluido convencional que do EN, de maior viscosidade cinemática.

Também é avaliada a variação da tensão de ruptura CA para líquidos contaminados com umidade, juntamente com partículas de celulose. A Figura 3.5 [4] mostra a variação da suportabilidade CA em função da umidade, para um conteúdo de 25.000 partículas de celulose. Novamente a figura inclui dados de éster sintético, além de OM e EN. Se comparado o gráfico da Figura 3.5 com o gráfico da Figura 3.2 (contaminação com umidade), e também com o gráfico da Figura 3.4a (contaminação com partículas de celulose), pode ser visto que a umidade afeta as tensões de ruptura de forma mais significativa que as partículas. Nesta combinação de contaminantes, a tensão de ruptura do OM diminui de maneira expressiva, mesmo para pequenas variações de umidade relativa. A suportabilidade do EN é considerada semelhante a do líquido purificado até 15% de umidade relativa. Isto se deve a maior parte da água em OM ser absorvida por partículas higroscópicas (parte celulose da contaminação), que podem funcionar como portadores de carga. Como o EN é muito mais higroscópico, uma maior quantidade de água pode ser absorvida pelo líquido, reduzindo o número de portadores de carga (partículas de celulose que absorveriam umidade) [4].

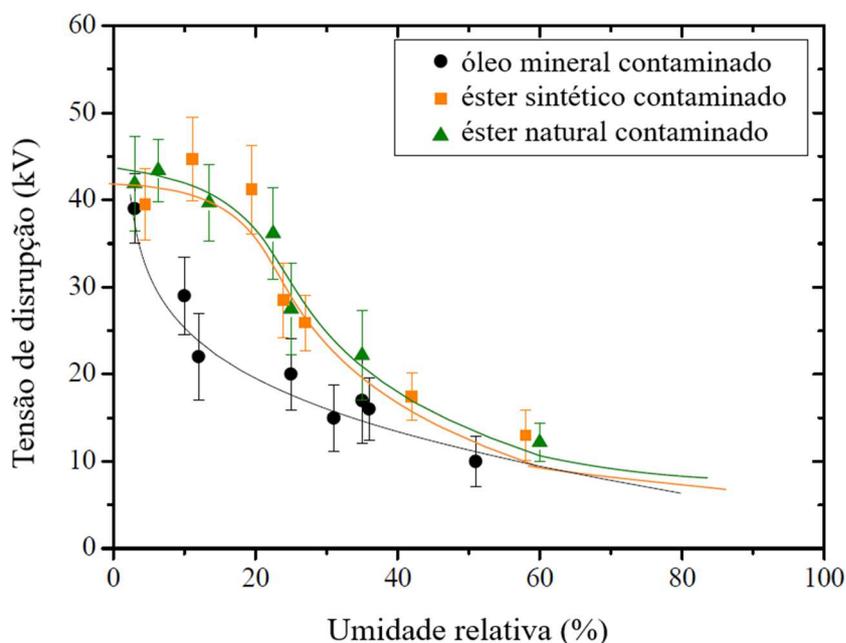


Figura 3.5. Disrupção de líquidos contaminados em função da umidade. Adaptada de [4].

### 3.1.4 Efeito da área do eletrodo na tensão de disrupção

Além da presença de contaminantes, a área do eletrodo é um fator de impacto relevante na tensão de disrupção. A suportabilidade dos fluidos diminui com o aumento da área do eletrodo e a relação entre área e tensão de disrupção pode ser afetada pelo líquido isolante [4]. O efeito da área dos eletrodos é considerado no projeto de isolamento. A tensão de disrupção do fluido é geralmente estimada por extrapolação, a partir de testes em escala reduzida. A Figura 3.6 [4] mostra sete tipos de eletrodos utilizados para testes comparativos de disrupção envolvendo OM e EN. A lista é composta por um eletrodo esférico (número 1 na figura), um eletrodo semiesférico (número 2 na figura) e cinco eletrodos planos com cantos arredondados (números 3 a 7). Todos os eletrodos são de cobre e suas superfícies são polidas. Os diâmetros dos eletrodos e suas áreas estressadas são listados na tabela à direita na Figura 3.6.

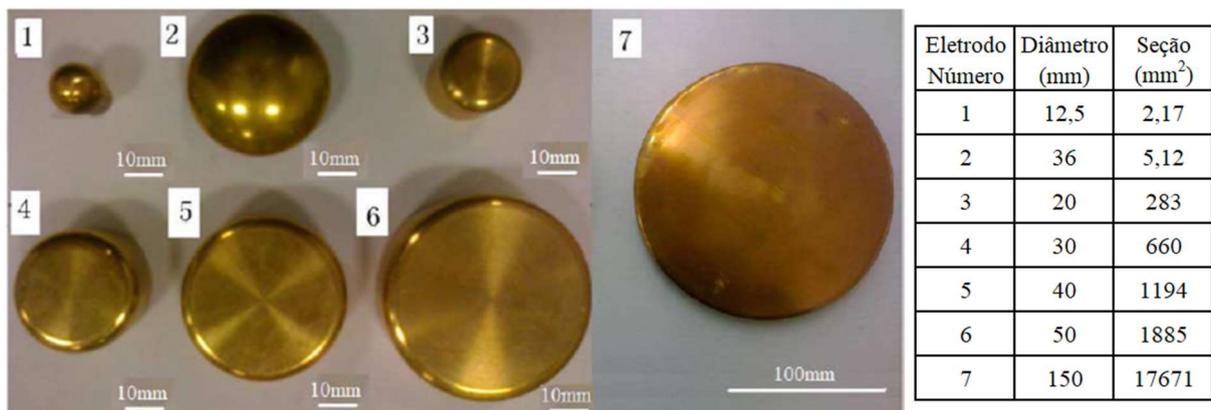


Figura 3.6. Eletrodos de cobre avaliados para tensão de disrupção. Adaptada de [4].

A Figura 3.7 [4] mostra a distribuição das probabilidades de disrupção para os eletrodos avaliados (OM nos gráficos à esquerda e EN à direita). O EN mostrou ser mais sensível ao aumento da área do eletrodo que o OM. Isto pode ser visto pelas menores tensões disruptivas e pelo maior distanciamento entre as curvas, desde o eletrodo de menor diâmetro e área (número 1 a direita dos gráficos) até o maior eletrodo (número 7 a esquerda dos gráficos).

A título de exemplo, campos que representam uma probabilidade de falha de 1% foram comparados considerando um eletrodo de área efetiva igual a 1m<sup>2</sup>, contaminação com 25.000 partículas de celulose e 5% de umidade relativa. Nesta condição, os valores encontrados para o EN foram consideravelmente superiores ao do OM, mostrando que a menor sensibilidade aos contaminantes compensa facilmente a maior sensibilidade do EN à área do eletrodo [4].

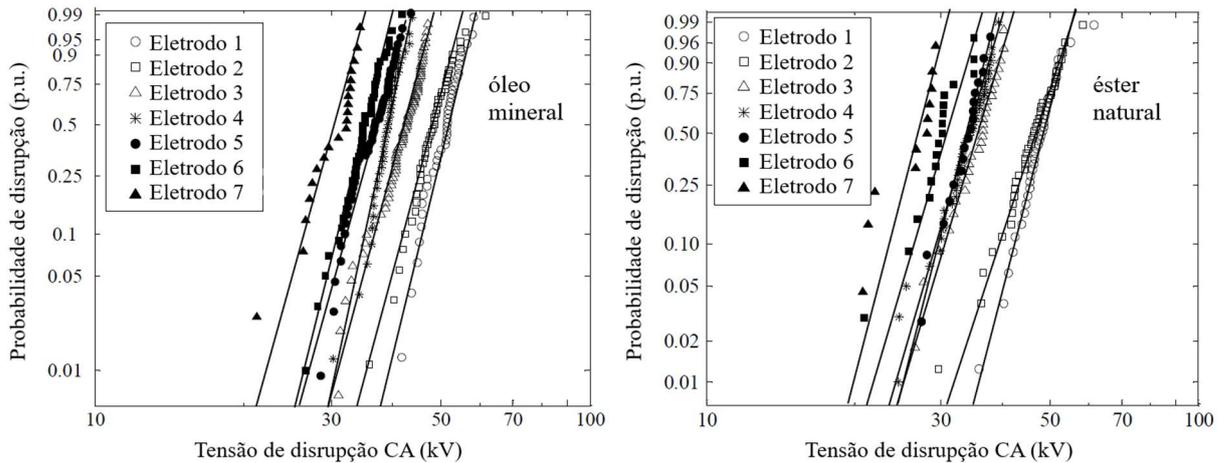


Figura 3.7. Probabilidade de falha dos eletrodos. Adaptada de [4].

### 3.1.5 Considerações finais sobre suportabilidade CA

Comparações de suportabilidades à tensão CA entre OM e EN foram apresentadas. Tanto para os fluidos como para os papelões impregnados, sejam novos ou termicamente envelhecidos, as tensões de ruptura CA do EN são próximas ou superiores às do OM. Apesar do maior conteúdo de umidade absoluta encontrado no EN, seu limite de saturação com água é muito superior e sua suportabilidade CA não é afetada em níveis práticos de umidade relativa. A distribuição da umidade entre fluido e celulose é diferente em EN, levando a umidade a migrar para o líquido, o que pode estender a expectativa de vida da celulose.

Em comparações de suportabilidade na presença de partículas metálicas e de celulose, o desempenho do EN é superior ao do OM, especialmente quando combinadas contaminações de partículas e umidade. Somente no que diz respeito à sensibilidade com relação ao aumento da área do eletrodo, o EN tem resultados piores que os do OM. Este ponto pode ser considerado menos impactante no desempenho do EN no projeto do transformador, se também contabilizada a menor sensibilidade do fluido vegetal aos contaminantes.

Sendo as tensões de ruptura CA do EN consideradas equivalentes ou superiores às do OM, cabe comparar o desempenho dos fluidos nos processos de formação de descargas, incluindo a suportabilidade às tensões impulsivas.

## 3.2 Comparações de parâmetros na formação de descargas

A formação de descargas nos meios sólido e líquido foi abordada na Seção 2.3, ficando pendente uma comparação detalhada destes processos em OM e EN. As medições de tensão de disrupção CA, discutidas na Seção 3.1, são geralmente adotadas para pequenos canais de fluido e estão associadas a análises qualitativas do meio isolante para campos quase uniformes. Quando canais de maiores dimensões são avaliados, medições de descargas parciais (DP) são normalmente utilizadas e as respostas dos fluidos comparados pode divergir. Como visto na Seção 2.2, além dos esforços associados às tensões alternadas, transformadores de potência são submetidos a tensões impulsivas durante os ensaios de fábrica, bem como no sistema elétrico. Logo, é necessário conhecer as respostas dos fluidos aos diferentes tipos de tensões aplicáveis. Também demandam avaliação os processos de pré-descarga, caracterizados pela formação de pequenos canais de ionização, chamados de *streamers*. A descarga superficial na interface entre os meios líquido e sólido, chamada de descarga de escoamento, é outro importante item a ser analisado. Todos estes parâmetros, associados a formação de descargas, são comparados a seguir para os fluidos de interesse.

### 3.2.1 Descargas parciais

O conceito de DP, os fenômenos que as produzem e suas formas de detecção foram abordados na Seção 2.4.3. DP são comumente geradas por concentrações de campo elétrico no isolante (podendo começar dentro de vazios ou fissuras do sólido) ou em sua superfície. Valores iniciais de aparecimento de DP sob tensões CA ou impulsivas são relevantes no projeto do sistema isolante [3]. Resultados equivalentes em diferentes ensaios (para o método normalizado e para uma revisão normativa sugerida) para tensões iniciais de aparecimento de DP foram apresentados para OM e EN na Tabela 3.1 [16].

Pode ser dito que os principais tipos de DP nos transformadores são descargas de corona (que podem estar associadas à presença de partículas condutoras no líquido) e descargas superficiais na interface entre fluido e isolamento sólido. Em medições de DP realizadas [3], degraus de tensão controlados foram adotados e observados períodos para descanso e recombinação dos íons restantes. As medições de corona em óleo ocorreram para comprimentos

do canal de 5, 10, 20 e 40mm, com eletrodos ponta-plano imersos nos fluidos. Descargas de escoamento (através da superfície de isolamentos sólidos) foram verificadas para os mesmos canais, usando papelão prensado entre os eletrodos, com a ponta do eletrodo formando um ângulo de 30° com a superfície do papelão. Em descargas de corona, o comportamento dos fluidos é comparável (na faixa de canais testada), com um desempenho ligeiramente melhor do EN, como mostram as linhas sólidas dos gráficos da Figura 3.8 [3]. Em descargas de escoamento (linhas tracejadas nos mesmos gráficos), o EN só apresentou um melhor desempenho para o menor canal dentre os avaliados (5mm).

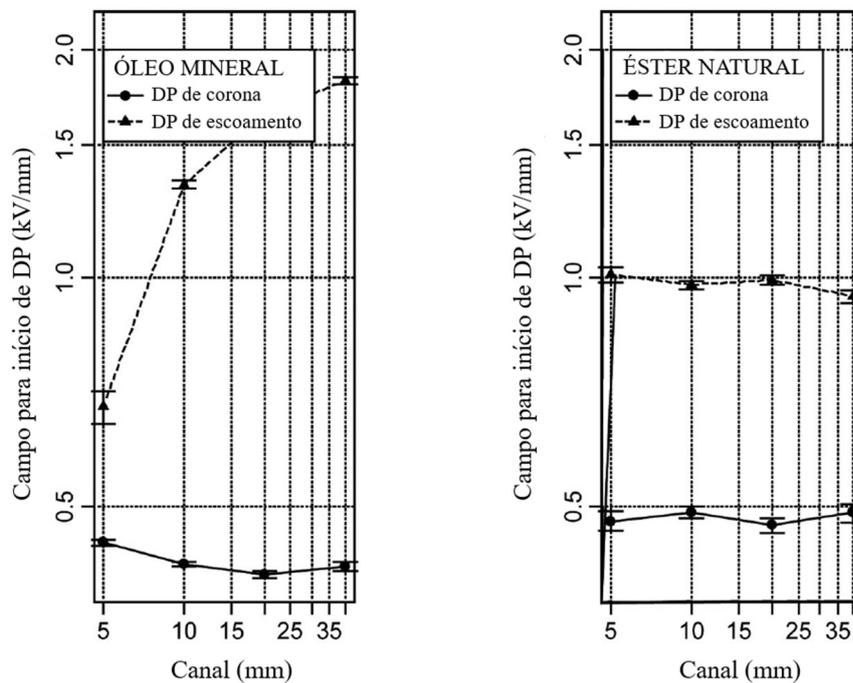


Figura 3.8. Campo para início de descargas parciais. Adaptada de [3].

A DP tem um papel importante na degradação dos líquidos, podendo levar à disrupção por desenvolvimento de *streamer* e à formação de resíduos nos dielétricos. Assim como ocorre com o OM, a tensão inicial para aparecimento de DP em EN é reduzida com o envelhecimento térmico. A Figura 3.9 [36] mostra esta queda para canais de 5mm de um OM e dois tipos de EN, originados de plantas diferentes. As medições foram realizadas com eletrodos ponta-plano, com e sem a presença de cobre. Os líquidos foram aceleradamente envelhecidos por 45 dias, a uma temperatura de 150°C. Como mostra a figura, dependendo do tipo de vegetal base, o desempenho do EN pode variar mais com o envelhecimento térmico, mas não se torna inferior ao do OM. Contudo, é registrado um aumento de pulsos de descargas de baixa magnitude no EN à base de milho, quando envelhecido [36].

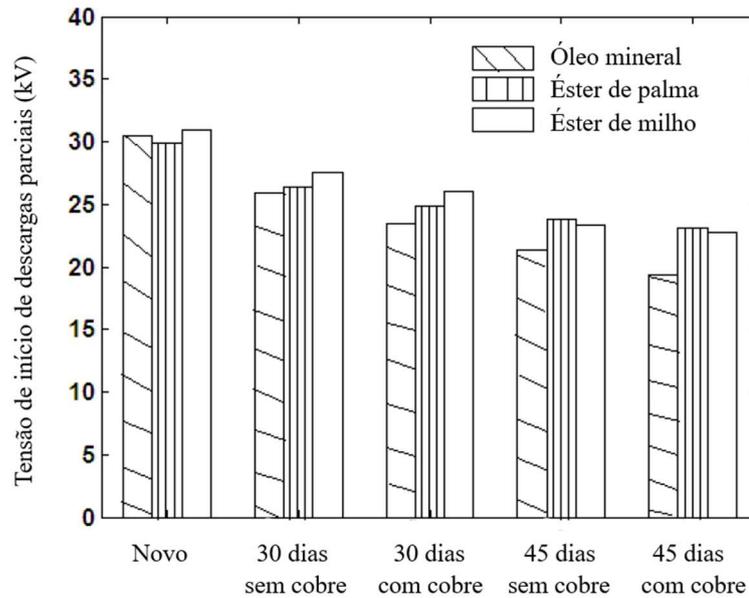


Figura 3.9. Tensão para início de descargas parciais com degradação. Adaptada de [36].

### 3.2.2 Suportabilidade a tensões impulsivas

A suportabilidade dos fluidos a tensões impulsivas é determinante em projetos de isolamento. Testes [11] em canais de fluido entre 25 e 100mm mostram que, em configuração ponta-plano com polaridade positiva, as tensões impulsivas (1.2/50 $\mu$ s) de ruptura do EN são inferiores às do OM para canais acima de 25mm, como mostra o gráfico à esquerda da Figura 3.10 [11]. Para canais de fluido entre 15 e 75mm, com o mesmo arranjo de eletrodo, porém com polaridade negativa (gráfico à direita da Figura 3.10), o OM apresenta melhor desempenho que os ésteres em toda a faixa de canais analisada (os gráficos também apresentam dados para o éster sintético, que não é avaliado neste trabalho). A diferença entre as suportabilidades de OM e EN, frente às ondas impulsivas, se torna mais crítica com o aumento do comprimento do canal, especialmente para polaridade positiva [37]. Esta menor suportabilidade às tensões impulsivas do EN deve ser considerada no projeto de isolamento de transformadores de potência, reduzindo os níveis de campo elétrico. É também importante notar que, para uma mesma dimensão de canal, tensões de ruptura com polaridade negativa são maiores que as de polaridade positiva para todos os fluidos. Esta diferença de comportamento entre as polaridades é atribuída a velocidade dos *streamers*, que em polaridade positiva transitam do modo de propagação lento para o rápido em tensões mais baixas que em polaridade negativa [11]. A propagação dos *streamers* é discutida na Seção 3.2.3.

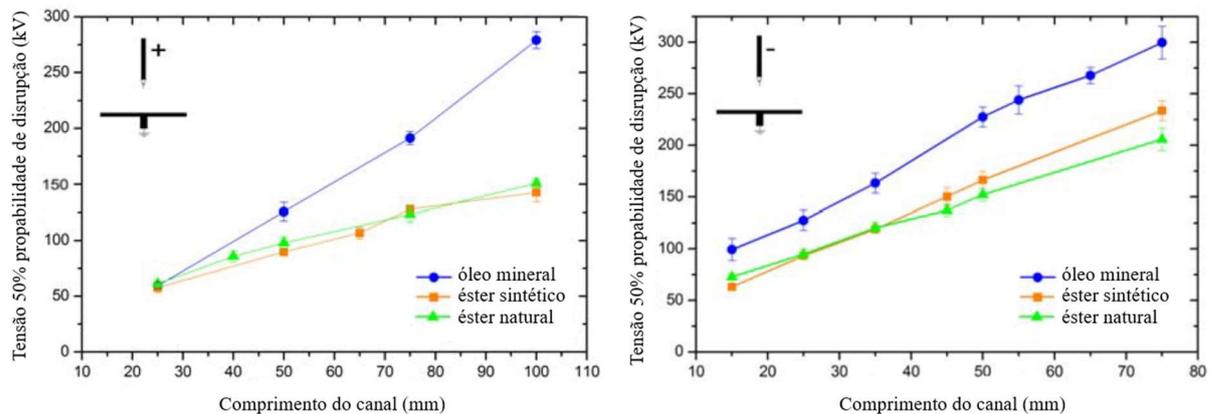


Figura 3.10. Tensão para 50% de ruptura em grandes canais. Adaptada de [11].

Outro estudo [38] compara EN e OM usando um número significativo de impulsos atmosféricos e de manobra em campos quase uniformes. Em um canal de 3,8 mm esfera-esfera os resultados são comparáveis para as duas polaridades, sendo o desempenho de EN 15% pior para impulsos atmosféricos e 8% pior para impulsos de manobra. Apesar de considerar comparáveis as suportabilidades às tensões impulsivas (IA e IM) dos fluidos em campo quase uniforme, o estudo recomenda a adequação do projeto de isolamento, de modo a evitar o aparecimento de *streamers* em EN. A divisão de grandes canais também é recomendada, devido ao desempenho inferior de EN em campos não uniformes [38].

Outro trabalho apresenta resultados de ensaios em diferentes arranjos, variando a polaridade da tensão impulsiva [39]. Apesar do EN apresentar desempenho aquém do OM, os autores consideram o desempenho do líquido alternativo comparável ao do tradicional para as duas polaridades. Divergências apresentadas em outros trabalhos são consideradas associadas à necessidade de se fazer vácuo no caso do EN, após exposição das amostras ao ar. A remoção de partículas e gases dissolvidos é considerada importante para manter a equivalência entre suportabilidades à tensão impulsiva [39]. Suportabilidades comparáveis a impulso atmosférico nos dois fluidos também são a conclusão de outro estudo [3], que realizou testes com os dois fluidos tratados. Contudo, as comparações de tensões disruptivas sob impulso atmosférico foram realizadas somente para pequenos canais (até 5mm), em campo quase uniforme.

Além do tamanho dos canais, o mecanismo de ruptura está intimamente relacionado com a homogeneidade do arranjo de teste adotado. Um trabalho verificou a suportabilidade às tensões impulsivas para as geometrias de eletrodos apresentadas na Figura 3.11 [17]. As dimensões dos raios e diâmetros estão em mm.

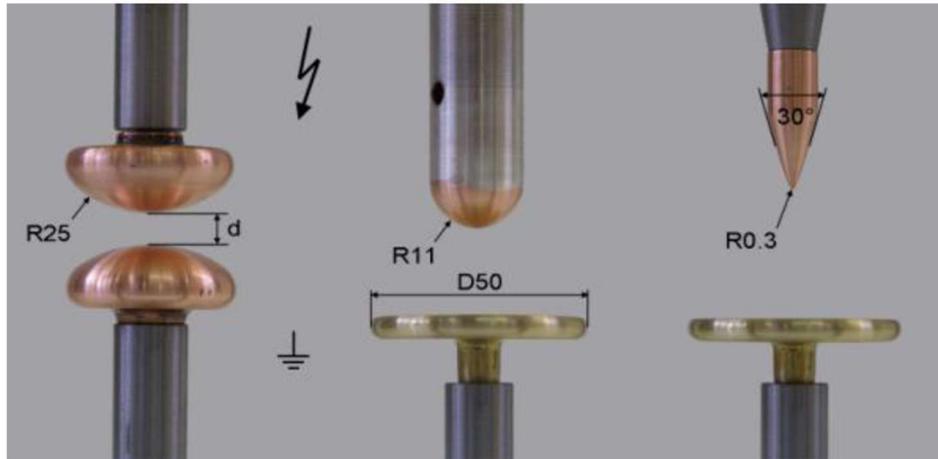


Figura 3.11. Arranjos de diferentes configurações. Retirada de [17].

Os gráficos da Figura 3.12 [17] apresentam as tensões médias de disrupção dos eletrodos da Figura 3.11 (da esquerda para a direita nas duas figuras), em função dos canais de líquido. As médias são obtidas para 20 disrupções por passo de tensão impulsiva, de polaridade negativa. Dados do éster sintético não são comentados nesta dissertação. Os resultados mostraram que a diferença entre EN e OM depende do grau de uniformidade dos arranjos (formato dos eletrodos e comprimento do canal). Logo, no projeto de isolamento de transformadores em EN, especial atenção deve ser dada a arranjos heterogêneos, como ocorre nas cabeças dos enrolamentos. As disrupções para impulsos de polaridade positiva apresentaram comportamentos menos divergentes entre os fluidos neste trabalho [17].

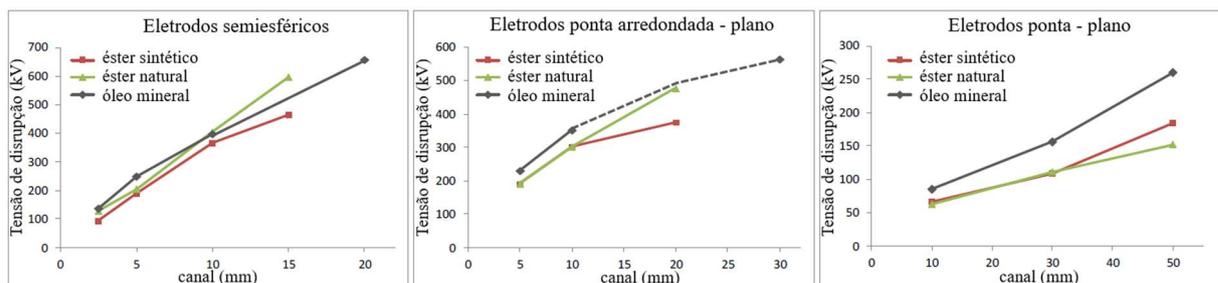


Figura 3.12. Tensão de disrupção para diferentes arranjos. Adaptada de [17].

Outro trabalho [9] também verifica a influência de campos não uniformes na suportabilidade a tensões impulsivas, mas em pequenos canais. A Figura 3.13 [9] mostra variações do campo elétrico suportável em canais de 0,5 a 2,5mm dos dois fluidos, para arranjos de teste com eletrodos ponta-plano e eletrodos semiesféricos. Apesar da diferença entre os resultados se tornar visível no arranjo heterogêneo (ponta-plano), em canais muito pequenos não há variações significativas de desempenho entre os fluidos isolantes comparados.

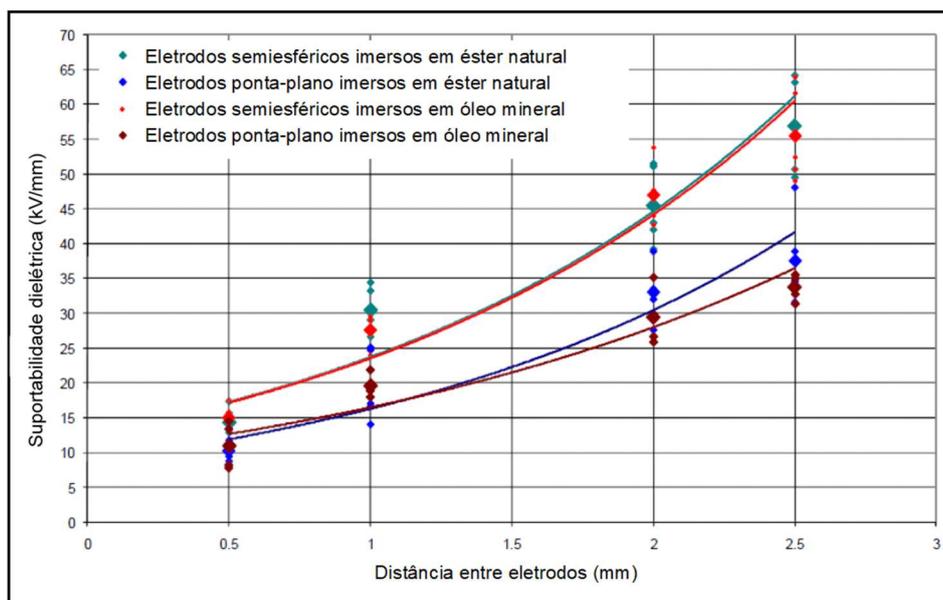


Figura 3.13. Campo suportável por eletrodos em pequenos canais. Adaptada de [9].

Em campos quase uniformes (como em arranjos com pequenos canais esfera-esfera), a disrupção é considerada dominada pela iniciação (tensões iniciais de aparecimento) do *streamer*. Para arranjos com elevado fator de heterogeneidade (como ponta longa – plano), a disrupção é considerada dominada pela propagação (tensões de aceleração) de *streamer* [38]. Logo, uma discussão sobre a propagação de *streamers* é necessária neste ponto.

### 3.2.3 Propagação de *streamer*

Um evento de disrupção em líquidos normalmente envolve processos de iniciação e propagação de *streamer* [38]. Para eliminar a possibilidade de falha ou ocorrência de descargas parciais acima de limites admissíveis, o projeto de isolamento deve considerar este fenômeno pré-descarga. As descargas chamadas de *streamers* são descritas por seus principais parâmetros: tensão inicial de aparecimento, comprimento até sua parada, tensão de aceleração ou transição e velocidade média [17]. A propagação de *streamer* varia com a geometria do eletrodo, amplitude e polaridade da onda de tensão aplicada.

Diferenças importantes entre os fluidos podem ser encontradas na tensão de aceleração, quando a propagação do *streamer* muda do modo lento (velocidades próximas a 1km/s) para o modo rápido (velocidades até 200km/s) [10][11]. Testes em canais de 20 a 200mm, avaliaram a transição de *streamers* lentos para rápidos. A polaridade é decisiva na velocidade de

propagação. A Figura 3.14 [10] mostra a variação da velocidade dos *streamers* de EN e OM para polaridades positiva (à esquerda) e negativa (à direita), em função da tensão impulsiva aplicada em um canal de 100mm com arranjo ponta-plano. Observa-se que a propagação de *streamers* rápidos ocorre em tensões bem menores no EN que em OM, especialmente em polaridade positiva. Este é um ponto crítico para o projeto de isolamento de transformadores.

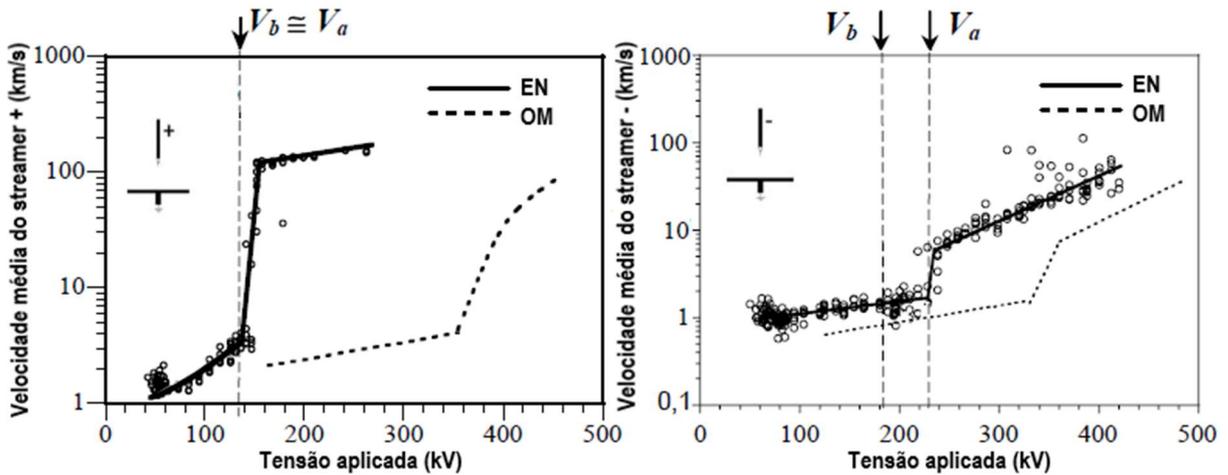


Figura 3.14. Velocidade de propagação de *streamers*. Adaptada de [10].

A tensão de aceleração dos *streamers* ( $V_a$ ) e a tensão que representa 50% de probabilidade de disrupção ( $V_b$ ) são identificadas nos gráficos da Figura 3.14 para o EN. Quando atingida a tensão de aceleração  $V_a$  para os *streamers* positivos, as velocidades finais registradas chegam a 200km/s em EN, estando as tensões  $V_a$  e  $V_b$  bastante próximas. Para os *streamers* negativos, novamente o desempenho do EN é inferior ao do OM, mas o aumento da velocidade de propagação com a tensão é menor que na polaridade positiva para os dois fluidos. A tensão que implica 50% de probabilidade de disrupção ( $V_b$ ) é claramente inferior à tensão de aceleração ( $V_a$ ) em polaridade negativa [10]. Outro trabalho que trata o parâmetro velocidade de propagação considera que os *streamers* em EN são 2.6 vezes mais rápidos que em OM para polaridade positiva e 1.6 vezes mais rápidos em EN para polaridade negativa [11]. O mesmo trabalho considera que o aumento dos canais de fluido implica aumento da velocidade dos *streamers* que levam a disrupção. Em EN, 50mm é a dimensão considerada como canal de transição (50% das disrupções são induzidas por *streamers* rápidos). Para canais de até 100mm (maior dentre os avaliados) em OM não houve registro de *streamers* positivos rápidos neste estudo. Esta grande variação de desempenho não ocorre em polaridade negativa, quando os canais considerados de transição são de 50mm para EN e 55mm para OM [11].

A tensão inicial para o aparecimento de *streamers* foi considerada comparável nos dois fluidos isolantes pelo mesmo trabalho [11]. Contudo, uma vez iniciada a propagação, os *streamers* em EN tem maior comprimento e mais braços que em OM. Um outro trabalho que avaliou tensões iniciais para aparecimento de *streamers* em tensões impulsivas também considerou similares os valores encontrados para EN e OM [40].

Além da velocidade de propagação e tensão de início, o comprimento do *streamer* até sua parada também é um parâmetro importante, pois determina a possibilidade de conectar canais de fluido (eletrodos) e levar à disrupção [17]. O estudo que avaliou impulsos atmosféricos em canais de 15 a 100mm registra um maior aumento de comprimento do *streamer* em EN para as duas polaridades, mas considera significativa a diferença contra o EN em polaridade negativa [11]. Outro trabalho [41] já apresenta diferenças expressivas de comprimento nas duas polaridades. A Figura 3.15 [41] mostra a variação entre os comprimentos de *streamers* em polaridades positiva (à esquerda) e negativa (à direita), em função da tensão impulsiva, para dois tipos de EN e para OM em canais de 100mm. A diferença entre os comprimentos dos *streamers*, para um mesmo valor de tensão, se torna mais crítica com o aumento dos canais de fluido [41].

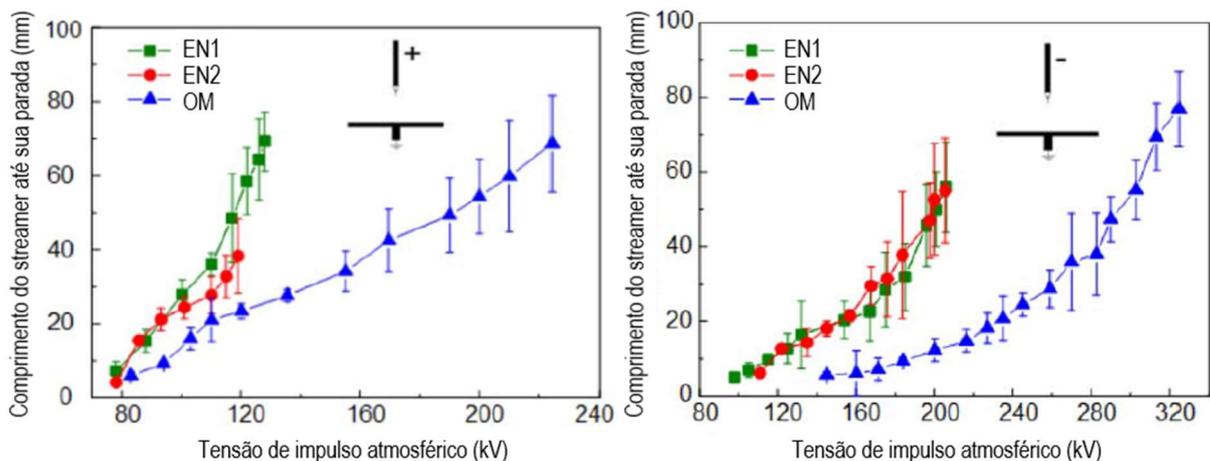


Figura 3.15. Comprimento de *streamers* até sua parada. Adaptada de [41].

Além de velocidade e comprimento distintos, a mudança do líquido isolante leva a variações no formato dos *streamers*. A Figura 3.16 [11] apresenta, para canais de fluido de 50mm, *streamers* de polaridade negativa com dimensões similares até sua parada: 24,55mm para o OM à esquerda e 25,54mm para o EN à direita. Além da diferença de tensão que leva a comprimentos equivalentes nos dois fluídos (210kV para o OM e 130kV para o EN), as formas dos *streamers* são diferentes. Em OM os *streamers* tipicamente têm um ou dois braços

principais, com muitas ramificações pequenas. Já em EN, os *streamers* tipicamente têm mais braços principais que no OM, propagando-se em mais de um direção [11].

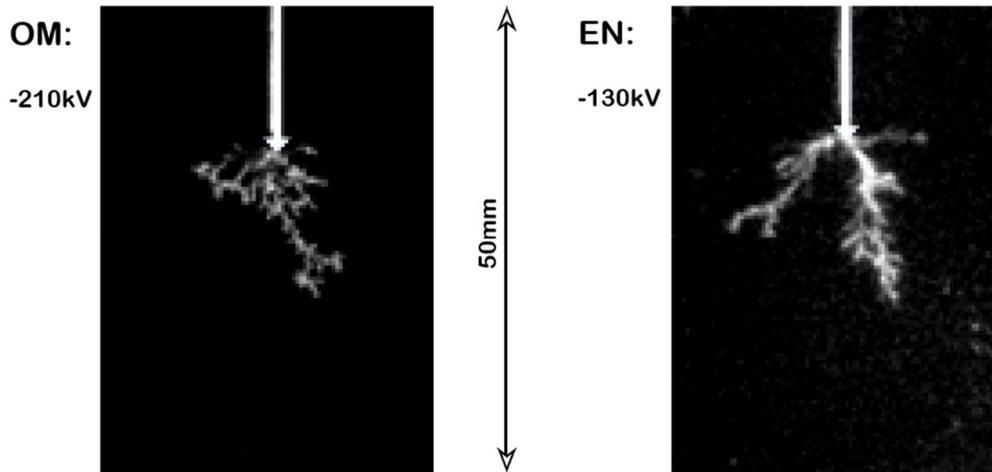


Figura 3.16. Fotografias típicas de *streamers* negativos. Adaptada de [11].

A possibilidade de um *streamer* se desenvolver, levando a disrupção, também é avaliada. Os gráficos da Figura 3.17 [10] mostram a variação da probabilidade de disrupção em função da tensão impulsiva aplicada nas duas polaridades, para diferentes comprimentos de canais em EN e OM. Não são mostradas variações de valores entre EN e OM em canais de 20mm. Mas à medida que os canais aumentam, as tensões que representam uma mesma probabilidade de disrupção são inferiores em EN para as duas polaridades. Uma grande discrepância entre os valores de EN e OM é mostrada em canais de 200mm para *streamers* positivos [10].

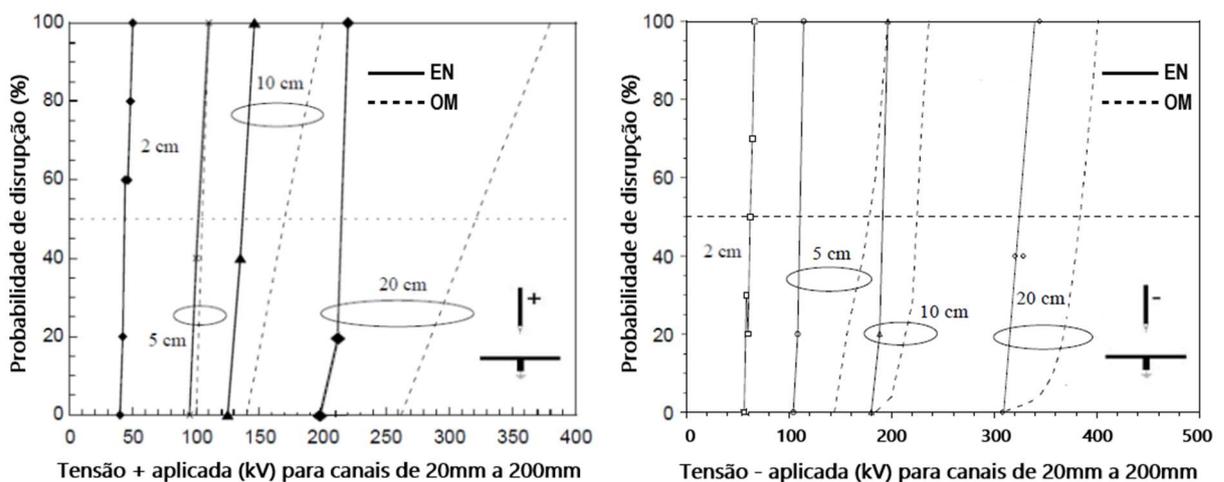


Figura 3.17. Probabilidade de disrupção para diferentes canais. Adaptada de [10].

Além de comparar a propagação de descargas em canais de fluidos, é necessário avaliar o comportamento na interface líquido/papelão, de modo a considerar as descargas superficiais.

### 3.2.4 Interface fluido/papelão – descargas, escoamento e trilhamento

Em transformadores de potência imersos em líquido isolante é costumeiro usar papelão para dividir canais de fluido em canais menores, aumentando assim o campo elétrico médio suportado pelo projeto de isolamento [8]. Entretanto, a interface entre fluido e papelão pode ser considerada o elo fraco do sistema de isolamento composto. Ao invés de se propagar nos canais de líquido, as descargas podem se propagar mais facilmente escoando sobre a superfície do isolamento sólido, levando a danos irreversíveis [13]. Logo, no projeto de isolamento, a distribuição do campo elétrico ao longo da superfície dos isolamentos sólidos e a formação de descargas de escoamento são pontos importantes a serem avaliados.

As variações sobre formação e propagação de *streamers* discutidas na Seção 3.2.3 não consideram a presença de papelão nos arranjos de teste. Ensaio com canais de até 75mm foram realizados a fim de verificar a influência da adição de uma folha de papelão posicionada paralelamente ao eletrodo energizado (ponta do arranjo ponta-plano), como mostra o desenho esquemático da Figura 3.18a [37]. O gráfico da Figura 3.18b mostra que o efeito da polaridade no comprimento do *streamer* até sua parada pode ser considerado independente da presença do papelão em EN, para tensões de impulso atmosférico. A propagação de *streamers* em tensões mais baixas para polaridade positiva já havia sido identificada nos testes sem a presença do papelão [41]. Além do comprimento do *streamer*, a presença do papelão também não traz variações significativas para a velocidade média de propagação dos *streamers* em EN, bem como para a tensão que representa 50% de probabilidade de disrupção [37].

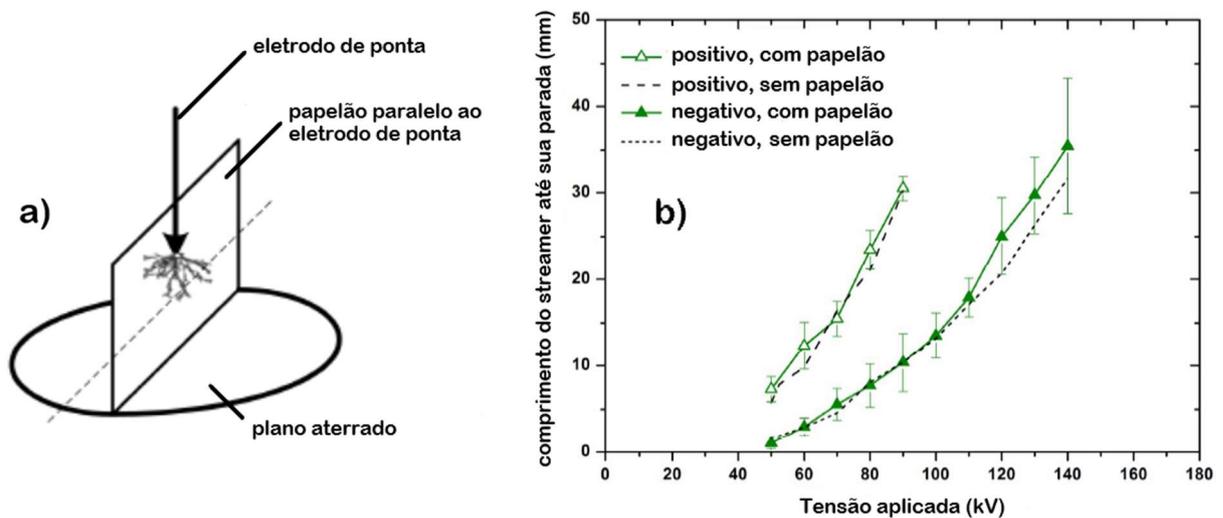


Figura 3.18. Comprimento de *streamers* com e sem papelão em EN. Adaptada de [37].

Resultados distintos dos encontrados para tensões impulsivas foram apresentados em outro trabalho que também avaliou a influência da presença do papelão no comprimento dos *streamers* em EN, porém para tensões alternadas em arranjo não uniforme. A Figura 3.19 [13] mostra as seguintes imagens, da esquerda para a direita:

- a) *streamers* positivos no canal de EN sem papelão;
- b) *streamers* positivos no canal de EN com papelão paralelo à ponta do eletrodo;
- c) *streamers* negativos no canal de EN sem papelão;
- d) *streamers* negativos no canal de EN com papelão paralelo à ponta do eletrodo.

Os triângulos adicionados às fotografias indicam a ponta do canal de *streamer* considerado mais longo. Para os ciclos com polaridade positiva, o maior comprimento de *streamer* registrado foi de 26mm no canal sem papelão e 38mm no arranjo com papelão. Já para polaridade negativa, o maior comprimento registrado foi de apenas 6mm no canal sem papelão e 28mm com o papelão promovendo o escoamento [13].

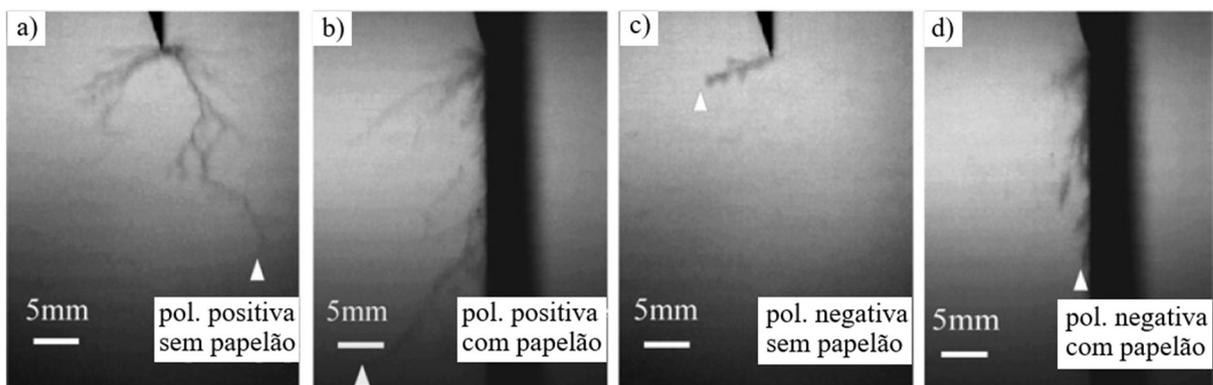


Figura 3.19. *Streamers* com e sem papelão em EN para tensões CA. Adaptada de [13].

A tensão aplicada foi de 46kV em todos os casos com EN. Numa comparação com OM, foi aplicada uma tensão de 50kV, e o maior comprimento de *streamer* positivo registrado foi de 26mm, independente da presença do papelão. Para ciclos de polaridade negativa, com a mesma tensão de 50kV em OM, não foram registrados *streamers*, o que comprova a variação de desempenho contra o EN. É observado que a inclusão do papelão tende a promover descargas de escoamento mais em EN que em OM, principalmente em polaridade negativa [13]. Considera-se que a menor viscosidade do OM em relação ao EN facilitaria a dispersão de bolhas no líquido convencional, enquanto no líquido alternativo seria mais provável a residência de bolhas na superfície do isolamento sólido, o que facilitaria a propagação de descargas superficiais, também chamadas de descargas de escoamento.

Descargas de escoamento tendem a causar danos no isolamento sólido chamados de trilhamento, divididos em dois tipos. Um é causado por estresse CA e pode implicar em dano de longo prazo à superfície do papelão, através de erosão cumulativa. Outro tipo é causado por descarga instantânea, na qual as fibras da superfície do papelão são queimadas por arcos de alta corrente. Em trilhamento de longo prazo, marcas brancas em forma de galhos de árvores tendem a aparecer na superfície do papelão, e posteriormente formarem marcas carbonizadas. Já as descargas instantâneas geralmente podem ser observadas em transformadores que falham em ensaios de impulso atmosférico. Testes com tensões CA, avaliando trilhamento na superfície de papelão em arranjo divergente, apresentam maior amplitude e maior taxa de repetição de DP em EN [12]. O processo de evolução e o padrão das descargas são similares nos fluidos, mas só ocorre no OM com umidade acima do comumente encontrada nos equipamentos em operação. Marcas brancas podem ser iniciadas em tensões relativamente baixas em papelões secos impregnados com EN, o que não ocorre com OM. Com o aumento da umidade, tais marcas se estendem mais rápido e com braços mais longos em EN. Além disto, marcas brancas transitam mais facilmente para marcas carbonizadas nos papelões com EN. Esta queda de desempenho é atribuída a maior intensidade das descargas, maior geração de gás e maior viscosidade do EN, que pode reter mais facilmente as bolhas de gás na textura da celulose [12].

Outro trabalho avaliou escoamento para tensões CA aplicadas (um minuto) com campo levemente divergente. Os isolamentos foram secos e a tensão foi elevada em degraus de 10kV. A média das tensões disruptivas nos ensaios com EN é 77,7% da mesma média em OM. As disrupções que ocorreram nos testes foram divididas em três tipos principais [42]:

- Tipo 1) escoamento através da superfície do isolamento sólido, deixando marcas de descarga nas amostras (papelão);
- Tipo 2) disrupção através do canal de fluido, sem deixar marcas nas amostras;
- Tipo 3) disrupção por descarga instantânea, deixando marcas nas amostras.

Os percentuais de disrupção são apresentados na Tabela 3.2 [42]. Com pior desempenho, a tensão média que ocorre disrupções do tipo 1 (escoamento) em EN equivale a 91% do OM. Nas disrupções do tipo 2 (no fluido) e tipo 3 (instantânea), as médias das tensões disruptivas em EN são, respectivamente, 73% e 87% das médias em OM. Registra-se que as descargas de escoamento instantâneas deixam múltiplas marcas paralelas no papelão, dificultando a identificação de seu início e final, como ocorre nas descargas de escoamento do tipo 1 [42].

Tabela 3.2. Distribuição de disrupções em arranjo de escoamento. Adaptada de [42].

Tipo de fluido isolante / Disrupção	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Óleo mineral	62,50%	6,25%	31,25%
Éster natural	58,33%	13,89%	27,78%

Apesar de representarem um percentual reduzido do total de descargas, o número de disrupções através do líquido dobra ao substituir o fluido convencional pelo alternativo. Este comportamento de redução das descargas por escoamento e aumento das descargas através do fluido ao adotar o EN em arranjos de teste com papelão também é registrado em outros estudos [17][39].

Outro trabalho aplicou ondas de impulso atmosférico ao comparar o desempenho dos fluidos em diferentes montagens [39]. Em um arranjo de campo não-uniforme usado para avaliação de escoamento, os eletrodos foram distanciados de 12mm por espaçadores de papelão. Os campos médios que representam 50% de probabilidade de disrupção nos ensaios são comparados na Tabela 3.3 [39] para OM e EN, nas duas polaridades. Não houve variações consideráveis entre os campos registrados e a polaridade da tensão aplicada teve pouca influência nos resultados dos testes.

Tabela 3.3. Campos no arranjo de teste com escoamento. Adaptada de [39].

Polaridade	Positiva		Negativa	
	OM	EN	OM	EN
Fluido isolante				
Campo médio para 50% de probabilidade de disrupção (kV/mm)	22,1	22,8	22,9	22,2

Um dos motivos alegados no trabalho [39] para obter resultados comparáveis em descargas de escoamento nos dois fluidos é o tratamento das amostras. Com maiores viscosidade e saturação com umidade, EN demanda temperaturas mais altas e maior tempo de impregnação em seu tratamento.

Além da celulose, o mesmo trabalho [39] buscou avaliar descargas de escoamento em outro sólido imerso nos dois fluidos. Testes foram realizados com parte de um comutador de tensões, onde seus contatos são fixados a uma régua de fenolite. Os resultados em OM e EN também foram considerados equivalentes para o escoamento em fenolite.

### 3.2.5 Considerações finais sobre parâmetros na formação de descargas

Esta Seção 3.2 apresenta comparações em processos de formação de descargas nos fluidos de interesse. As tensões iniciais para aparecimento de DP no meio líquido (descargas de corona) foram superiores em EN, especialmente para fluidos termicamente degradados. Para descargas na interface entre os meios sólido e líquido (descargas de escoamento), as tensões para aparecimento de DP no EN foram inferiores às do OM para canais acima de 5mm.

A suportabilidade à tensões impulsivas do EN só é equivalente à do OM em pequenos canais de fluido tratados, em configurações de campo quase uniforme. O desempenho do EN cai em relação ao OM para canais acima de 25mm em polaridade positiva e canais ainda menores em polaridade negativa. A diferença entre as suportabilidades dos fluidos aumenta com o aumento dos canais de líquido e também com a heterogeneidade dos eletrodos. Campos não uniformes e grandes canais devem ser alvos de atenção no projeto de isolamento com EN.

Foi visto que a tensão de aceleração, na qual a velocidade de propagação dos *streamers* aumenta até 200 vezes, é inferior em EN, principalmente em polaridade positiva. A diferença entre as velocidades de propagação nos dois fluidos aumenta com o crescimento do canal. As tensões iniciais de aparecimento de *streamers* são similares nos dois líquidos, mas quando iniciados, *streamers* se propagam mais rapidamente, são mais longos e possuem mais braços em EN. A possibilidade destes canais de descarga levarem à disrupção é maior em EN, especialmente em grandes canais com tensões de polaridade positiva.

A adição de papelão em testes com tensão impulsiva pouco afeta o maior comprimento dos *streamers* em EN. Mas em tensão alternada, o papelão facilita a propagação de descargas superficiais mais em EN que em OM, especialmente nos ciclos negativos. Na formação de trilhamento no papelão, as DP têm maiores amplitudes e frequências em EN. Marcas brancas podem ocorrer em papelões secos imersos em EN, o que não acontece em OM. Em papelões úmidos, as marcas são maiores e crescem mais rapidamente em EN. Em testes onde os fluidos são tratados, as variações de desempenho entre os fluidos são minimizadas, contudo, a formação de descargas na interface entre papelão e EN demandam atenção em arranjos heterogêneos.

Considerados os parâmetros dielétricos de impacto, outros parâmetros de interesse na adequação do projeto de isolamento ao EN são comentados na seção seguinte.

### **3.3 Parâmetros não dielétricos de interesse ao projeto de isolamento**

Além da comparação de parâmetros que estão associados às suportabilidades frente a diferentes esforços elétricos, um processo de substituição do fluido isolante deve considerar a variação de outros comportamentos que podem impactar no projeto de isolamento. Como o EN tem características físico-químicas diferentes do OM, outros parâmetros de interesse são abordados em seguida.

#### **3.3.1 Estabilidade a oxidação**

A expectativa de vida especificada para transformadores de potência conectados ao SIN é de 35 anos. Uma nota técnica do ONS [43] estabelece padrões de carregamento, procedimento de ensaio para elevação de temperatura em regime de sobrecarga e parâmetros para cálculo de vida útil. Os ciclos de carregamento preveem 90% da vida operando a plena carga (potência 1,0pu) e 10% em regime de sobrecarga, com patamar de 1,2pu por 4 horas, seguido de 1,4pu por 30 minutos. Portanto, os transformadores de alta tensão devem empregar líquidos com estabilidade térmica de longo prazo, sob severas condições de carregamento. Apesar do líquido isolante de equipamentos elétricos ser monitorado e suscetível a tratamentos ou mesmo substituição, é desejável que sua expectativa de vida seja compatível com a do transformador. Neste cenário, a deterioração do fluido por oxidação deve ser devidamente considerada.

O processo que rege a oxidação dos hidrocarbonetos do OM é o mecanismo de peroxidação, levando à formação de hidroperóxidos e de subprodutos de oxidação (produtos intermediários) como álcoois, aldeídos e cetonas, que por sua vez geram ésteres e ácidos carboxílicos, agressores para a celulose por sua natureza polar e ácida. Ao final do processo oxidativo do OM, ocorrem reações de polimerização, formando compostos de massa molar elevada que se depositam na forma de borra. Esta borra, insolúvel e de característica ácida, deposita-se sobre os enrolamentos, atacando quimicamente a celulose [15].

O processo de oxidação tem características distintas em EN. Como visto na Seção 2.1.4, o éster vem da ligação química formada pela reação de um álcool e um ácido graxo. Ácidos graxos podem se apresentar na forma saturada (onde os carbonos apresentam ligações simples) ou insaturada (com uma ou mais ligações duplas de carbono). Um maior número de ligações

duplas confere ao EN uma pior estabilidade à oxidação. Ácidos graxos com três ligações duplas (poli saturados) são mais susceptíveis à oxidação que ácidos com uma ligação dupla (mono saturados). Óleos vegetais saturados tem melhor estabilidade à oxidação, mas ponto de fluidez muito mais alto. Logo, a estabilidade à oxidação de um EN comercial depende de sua composição, associada à planta da qual é originado [16].

O processo de oxidação é irreversível e a exposição contínua ao oxigênio pode aumentar drasticamente a viscosidade do EN, em processos de polimerização que produzem subprodutos indesejados (como ácidos e borra) e afetam o desempenho do sistema isolante [44][21]. A presença de cobre nos transformadores aumenta a tendência à oxidação, que é acompanhada de aumento na acidez e nas perdas dielétricas [1][17]. Logo, é necessário limitar a exposição do EN ao ar ambiente. A variação do carregamento na operação dos transformadores implica em variação do volume de líquido, num processo chamado de respiro, que pode incluir entrada e saída de ar. Para equipamentos de respiro livre, o oxigênio vem basicamente do ar externo. Logo, recomenda-se restringir as formas de respiro de transformadores imersos em EN, considerando o uso de tanques selados com meios para expansão térmica do fluido ou uso de conservadores com bolsas de borracha [3][9]. Com o intuito de melhorar a estabilidade do EN, podem ser adicionados aditivos antioxidantes [3][36][45], os quais são consumidos ao longo do tempo de operação [46].

### **3.3.2 Viscosidade, impregnação e exposição**

A viscosidade cinemática do EN é cerca de três a quatro vezes maior que a do OM em temperaturas típicas de operação dos transformadores [16][6]. Envelhecimento térmico e oxidação podem aumentar significativamente a viscosidade do EN e afetar sua circulação nos transformadores de potência [36]. Além da parte de refrigeração do equipamento, a viscosidade influencia a operação de acessórios mecânicos importantes, como comutadores de tensão e bombas de óleo, temas que não são foco deste trabalho. A viscosidade também interfere na impregnação e secagem de componentes do projeto de isolamento, demandando alterações no processo de fabricação dos equipamentos.

Isolamento sólido como papel, papelão e madeira precisam ser adequadamente secos e impregnados para ter as propriedades dielétricas esperadas. Três variáveis afetam a

impregnação: pressão, tempo e viscosidade do fluido. A maior viscosidade de EN demanda maior tempo de impregnação dos materiais e quase o dobro do tempo de repouso do equipamento antes da realização de ensaios dielétricos [5]. A impregnação de papelão prensado com EN pode levar 40 horas a 60°C. Logo, é recomendável o aumento da temperatura no processo de secagem [21][13][47] e no processo de enchimento do equipamento [5], desde que observados os limites para o consumo de aditivos presentes no EN. A viscosidade do fluido alternativo também afeta o desenho de grandes peças de madeira ou papelão, onde é recomendável a inclusão de furos que promovam a secagem e acelerem a impregnação [17][47].

O tempo de exposição do EN a oxigênio e umidade também deve ser estritamente controlado, uma vez que filmes finos tendem a polimerizar muito mais rápido que grandes quantidades de fluido [47]. O extenso processo de preparação de uma saída que suportou a aplicação de IA de 1860kV inclui secagem em estufa por 14 dias a 110°C. Os procedimentos descritos no estudo [21] podem ser usados como uma referência sobre os cuidados necessários nos processos de secagem, impregnação e exposição do EN, quando aplicado a altas tensões.

### **3.3.3 Ponto de fluidez, compatibilidade dos materiais e geração de gases**

Quanto menor a temperatura dos fluidos, maior a diferença entre as viscosidades de OM e EN tratada na seção anterior. Contudo, em temperaturas muito baixas, é necessário considerar o ponto de fluidez, temperatura na qual o líquido deixa de fluir. Alguns dos EN mais comercializados têm ponto de fluidez na faixa de -15°C a -21°C, distante dos -50°C do OM [16]. Apesar de um ponto de fluidez mais próximo da temperatura mínima de operação demandar procedimentos especiais de energização dos transformadores [48], possíveis alterações de suportabilidades dielétricas por mudança de estado do EN são lembradas, mas não discutidas neste trabalho.

A compatibilidade de materiais é um tema importante para o projeto de transformadores de potência. Os materiais isolantes normalmente utilizados com o OM são compatíveis com o EN [16]. A incompatibilidade de outros materiais (como tintas, juntas de vedação e bolsas de borracha) [9][6][49], que não são componentes do projeto de isolamento, não é tratada neste trabalho, mas deve ser levada em consideração no projeto global de substituição do líquido isolante.

A tendência dos fluidos à gaseificação pode interferir no projeto de isolamento, já que a presença de gases pode alterar a suportabilidade do sistema isolante. A capacidade de gerar e absorver gases, assim como a interpretação dos volumes gerados, demanda uma análise diferenciada para EN, não incluída neste trabalho, mas detalhada em um guia específico [50]. Outros trabalhos contribuem para a análise de gases gerados sob esforços térmicos e elétricos, incluindo a geração associada aos níveis de DP mais altos em EN [15][51]. A análise *on-line* de gases é recomendada para grandes transformadores de potência imersos em EN [17].

### **3.3.4 Considerações sobre parâmetros não dielétricos e considerações finais**

Esta Seção 3.3 apresenta considerações sobre parâmetros não dielétricos que, indiretamente, têm impactos sobre o projeto de isolamento. O primeiro ponto avaliado foi a estabilidade no processo de oxidação do EN, que difere do OM. A exposição ao oxigênio pode aumentar bastante a viscosidade do EN e produzir subprodutos que atacam a isolação. Logo, o tipo de respiro deve restringir o contato do EN com o oxigênio na operação dos transformadores.

Devido à sua viscosidade muito superior à do OM, isolamentos imersos em EN demandam alterações no processo de secagem e impregnação dos materiais adotados no projeto, que também pode requerer alterações no desenho de grandes peças isolantes. O tempo de exposição de EN ao ar ambiente também deve ser reduzido e controlado no processo de fabricação de transformadores, especialmente em altas tensões.

Temperaturas ambientes negativas requerem cuidados especiais na aplicação do EN. Todos os materiais do projeto de isolamento são compatíveis com o EN, mas atenção deve ser dada à geração de gases sob estresses elétricos e térmicos, divergente em EN. A análise de gases precisa considerar parâmetros particulares, com normalização própria, e a inclusão de analisadores de gases *on-line* em grandes equipamentos isolados com EN deve ser considerada.

Por fim, este capítulo apresentou comparações de comportamentos nos dois fluidos, através da revisão de parâmetros que podem afetar o processo de adequação do projeto de isolamento ao EN. Como as suportabilidades e as permissividades dos fluidos variam, é necessária a avaliação da distribuição de campo elétrico entre isolamentos sólidos e líquidos. Este é o objetivo principal do estudo de caso apresentado no capítulo seguinte.

## **4 CAMPO ELÉTRICO NO PROJETO – ESTUDO DE CASO**

Concluídas as comparações dos comportamentos de interesse para o projeto dielétrico, um estudo de caso é apresentado neste Capítulo 4. A substituição do OM pelo EN em um projeto de isolamento é estudada através de simulações de campo elétrico. No item 4.1 é apresentado o transformador objeto de estudo e definido o esforço elétrico mais crítico a ser simulado. No item 4.2 são avaliadas as implicações das diferenças de permissividades dos fluidos no projeto de isolamento e seus componentes são identificados. Uma vez que *streamers* rápidos se propagam em campos mais baixos em arranjos divergentes no EN, modificações são testadas no item 4.3, buscando reduzir os estresses máximos em pontos críticos do projeto. Ao final, um projeto de isolamento é proposto para o equipamento estudado, imerso em EN.

### **4.1 Estudo de caso e comparação de esforços elétricos**

Uma vez reconhecidos os parâmetros críticos para o desempenho do fluido alternativo, a substituição dos fluidos precisa considerar adequações práticas no projeto de isolamento. Neste processo, projetos já validados com OM precisam ser adaptados ao EN. Como pode ser visto na Figura 2.3 da Seção 2.1.4, a aplicação de equipamentos imersos em EN está transitando do universo da distribuição para níveis de tensão e potências adotados na transmissão. Neste contexto, foi escolhido para análise um transformador com potência de 40MVA e tensão máxima 145kV. Além de poder operar continuamente na tensão máxima, este equipamento é submetido a testes normalizados, que podem representar níveis distintos de esforços elétricos, devendo o mais crítico ser simulado. A seguir são apresentados o projeto escolhido para estudo e a comparação dos esforços impostos por ensaios e tensões operativas.

#### **4.1.1 Transformador objeto de estudo**

Para análise do projeto de isolamento, foram escolhidos três transformadores idênticos imersos em EN, fornecidos pela TOSHIBA no ano de 2014 para as instalações do Parque Olímpico do Estado do Rio de Janeiro. Estes equipamentos de tensão máxima 145kV, tem IA especificado de 650kV. É importante informar que neste projeto foi usada uma prática aplicada

por fabricantes com posturas conservadoras ou experiência restrita com o EN: a “construção um nível acima”. Esta forma de *derating*, significa adotar um projeto que suporta IA de 750kV em OM, para transformadores em EN com IA de 650kV. A intenção, ao um adotar um projeto com suportabilidade mais alta que a exigida para o equipamento, seria compensar o pior desempenho do EN frente às tensões impulsivas. Apesar de imprimir confiabilidade, superdimensionar projetos com EN leva a onerar o equipamento e à consequente perda de competitividade do fluido alternativo.

Realizar simulações para evitar o superdimensionamento seria uma etapa possível do projeto, porém não realizada para os equipamentos fornecidos. O conjunto de casos que serão analisados objetiva evitar o *derating* e o consequente aumento de custo na substituição dos fluidos. Deste modo, as distâncias que no projeto real foram majoradas (aplicáveis em OM para IA de 750kV) serão substituídas por distâncias comumente aplicadas para IA de 650kV em OM. O objetivo principal das simulações é não encarecer o projeto na adequação ao EN, mantendo as mesmas distâncias entre enrolamentos e entre estes e partes metálicas, já praticadas em OM. Para tanto, faz-se necessário identificar o que deve ser alterado no projeto, de modo a manter as margens de segurança aplicadas com OM. Excetuando-se as correções das dimensões previamente dilatadas, os demais arranjos e dimensões dos casos simulados são as dos três equipamentos fornecidos. A pedido do fabricante, as dimensões do projeto de isolamento modelado são omitidas. Algumas características relevantes destes transformadores são:

- Potência nominal / número de fases: 40MVA / 3;
- Frequência nominal / número de colunas do núcleo: 60Hz / 3;
- Tensão nominal dos enrolamentos de alta / baixa tensão: 138kV / 13,8kV;
- Material condutor dos enrolamentos: cobre;
- Material isolante dos enrolamentos: papel termoestabilizado classe E (120°C);
- Limite de elevação de temperatura dos enrolamentos / fluido isolante: 85°C / 90°C;
- Limite de perdas em vazio, base tensão nominal: 20kW;
- Limite de perdas em carga a 75°C, base tensão e potência nominais: 200kW;
- Impedância de curto-circuito a 75°C, base tensão e potência nominais: 25%;
- Ligação dos enrolamentos de alta / baixa tensão: triângulo / estrela aterrada;

- Nível de ruído: 64dB;
- Massa da parte ativa (enrolamentos e núcleo): 29.000 kg;
- Massa / volume do líquido isolante (EN): 26.000 kg / 28.300 litros;
- Massa total do transformador: 80.000 kg.

A Figura 4.1 (propriedade de TOSHIBA/TSEA Energia) mostra uma vista externa do equipamento fornecido, imerso em EN.



Figura 4.1. Foto do transformador isolado em EN. Cedida por TSEA Energia.

Escolhido o equipamento, é preciso definir onde as simulações de campo são necessárias. Como visto no capítulo anterior, o pior desempenho do EN ocorre em avaliações de geometrias heterogêneas, com campos não uniformes. No projeto de isolamento, estes arranjos estão presentes nas cabeças (extremidades) dos enrolamentos dos transformadores. Logo, o extremo do canal entre os enrolamentos de alta e baixa tensão, parte do projeto com maior grau de heterogeneidade, deve ser simulado. Além de ser dielectricamente um ponto crítico do projeto, a dimensão do canal define o diâmetro do enrolamento externo e o volume de material nele empregado, além das dimensões dos materiais que o circundam. Ou seja, a extensão do canal está fortemente associada ao custo do equipamento. Além do modelo, é preciso avaliar qual das condições de teste ou operativas implica maior esforço elétrico, para que sua tensão seja aplicada nas simulações.

#### 4.1.2 Comparação de esforços elétricos com fator DIL

Conforme tratado na Seção 2.2.2, os ensaios padronizados a serem realizados nos transformadores de potência para o mercado brasileiro são definidos pela norma ABNT NBR 5356-3:2007 [24] e resumidos na Tabela 2.5. Sendo 145kV a tensão máxima do transformador analisado, os ensaios dielétricos de rotina (realizados em todas as unidades) são: induzida de curta duração e tensão suportável a frequência industrial. O ensaio de tipo (realizado na unidade protótipo) é o impulso atmosférico de ondas plena e cortada. Para o equipamento objeto de análise, cujas características foram descritas na seção anterior, os valores das tensões suportáveis normalizadas são [24]:

- Tensão de impulso atmosférico de onda plena de AT / BT: 650 / 110 kV;
- Tensão de impulso atmosférico de onda cortada de AT / BT: 715 / 121kV;
- Tensão induzida de curta duração (U1) de AT / BT: 275 / 27,5kV;
- Tensão aplicada a frequência industrial de AT / BT: 275 / 34 kV.

Sendo o objeto de análise das simulações computacionais as cabeças e o canal entre enrolamentos, é preciso definir que tensão deve ser adotada, considerando os esforços elétricos de tensões de teste e operativas. Como essas tensões têm amplitudes e durações distintas, é necessário avaliá-las empregando o fator DIL (*design impulse level*), introduzido na Seção 2.2.2. O fator DIL é muito útil ao projeto de isolamento, pois fornece relações que permitem comparar os valores das distintas tensões de teste e da máxima tensão de serviço. A Tabela 4.1 [7][25] traz os fatores DIL para as tensões de interesse e os valores equivalentes a comparar, calculados pela relação das tensões e fatores para o transformador simulado.

Tabela 4.1. Fatores DIL para comparação de esforços elétricos. Adaptada de [7][25].

Ensaio / condição operativa	Fator DIL	Equivalente (kV)
Impulso atmosférico de onda cortada / plena	2,75 / 2,50	$715 / 2,75 = 260$ $650 / 2,50 = 260$
Impulso de manobra	1,90	N/A [24]
Tensão aplicada / induzida de curta duração (1 minuto)	1,00	$275 / 1,00 = 275$
Tensão induzida de longa duração (1 hora)	0,80	N/A [24]
Tensão máxima de operação em regime contínuo	0,57	$145 / 0,57 = 254$

Comparando os valores equivalentes apresentados na Tabela 4.1, a tensão que representa o máximo esforço dielétrico para o projeto de isolamento é aquela resultante de testes de tensão aplicada / curta duração [24]. Logo, para os arranjos a serem estudados, a exemplo do que ocorre no ensaio mais crítico, uma tensão de 275kV deve ser atribuída aos terminais de linha do enrolamento de AT, enquanto são aterrados os terminais do enrolamento de BT e as partes metálicas (núcleo e tanque). Definidos o arranjo e a tensão de simulação, cabe avaliar a variação das permissividades dos materiais na substituição do fluido isolante.

## **4.2 Efeito da variação de permissividade dielétrica**

Na adequação do projeto dielétrico ao EN, faz-se necessário realizar simulações da distribuição de campo elétrico em torno dos enrolamentos dos transformadores de potência. Como o pior desempenho do EN se torna relevante em campos não uniformes, as extremidades no canal entre os enrolamentos foram definidas como foco das simulações computacionais. Estas são conduzidas com o valor do ensaio que representa a condição de maior esforço elétrico para o equipamento sob estudo. Assim como as origens e as características físico-químicas dos fluidos comparados são diferentes, as variações nas permissividades e seus efeitos no projeto precisam ser considerados.

### **4.2.1 Permissividade relativa**

Para garantir um desempenho adequado durante a realização dos ensaios de fábrica e ao longo da vida útil do transformador, o desenvolvimento de um projeto dielétrico deve ser concebido em função das características dielétricas de seus componentes, basicamente fluido e celulose impregnada. No projeto de isolamento, o campo elétrico é distribuído entre fluido e isolamentos sólidos de acordo com as permissividades destes componentes. Para uma melhor comparação das permissividades dielétricas dos materiais é usada a permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ) que estabelece a relação entre as permissividades do material isolante e do vácuo. A Tabela 4.2 [8] permite comparações das permissividades relativas em diferentes temperaturas para os fluidos e isolamentos sólidos à base de celulose, de baixa e alta densidade, impregnados com EN e OM.

Tabela 4.2. Permissividades relativas em função da temperatura. Adaptada de [8].

Material	OM	EN	LDP+OM	LDP+EN	HDP+OM	HDP+EN
$\epsilon_r$ a 25°C	2,4	3,3	3,9	4,4	4,5	4,6
$\epsilon_r$ isolamento sólido / $\epsilon_r$ fluido a 25°C			1,625	1,333	1,875	1,394
$\epsilon_r$ a 90°C	2,4	3,0	3,9	4,4	4,7	4,8
$\epsilon_r$ isolamento sólido / $\epsilon_r$ fluido a 90°C			1,625	1,467	1,958	1,600
$\epsilon_r$ a 130°C	2,2	2,9	4,1	4,5	4,9	5,2
$\epsilon_r$ isolam. sólido / $\epsilon_r$ fluido a 130°C			1,864	1,552	2,227	1,793

LDP+OM: *low density pressboard* ou isolamento de baixa densidade impregnado com OM

LDP+EN: *low density pressboard* ou isolamento de baixa densidade impregnado com EN

HDP+OM: *high density pressboard* ou isolamento de alta densidade impregnado com OM

HDP+EN: *high density pressboard* ou isolamento de alta densidade impregnado com EN

É importante lembrar que a distribuição de campo elétrico entre os materiais de um sistema isolante composto é inversamente proporcional às suas permissividades relativas [8]. Logo, como os sólidos do projeto sob estudo tem permissividades superiores às dos líquidos, os campos na celulose impregnada serão inferiores aos dos fluidos. Portanto, os estresses mais altos serão encontrados nos fluidos, independente se OM ou EN. Contudo, a diferença entre os campos em sólidos e líquidos depende da relação de permissividades dos materiais impregnados em relação ao fluido. A Tabela 4.2 traz as relações entre as permissividades relativas de isolamentos sólidos e fluidos. Como estas relações são inferiores em EN, uma menor diferença de campo elétrico entre estes materiais deve ser observada no projeto com fluido alternativo.

As simulações apresentadas neste trabalho são realizadas com as permissividades relativas dos materiais a 90°C, considerada a temperatura normal de operação dos equipamentos [8]. Também é importante considerar possíveis variações da distribuição de campo elétrico ao longo da vida útil do equipamento, mas as permissividades de EN e OM podem ser consideradas estáveis durante o processo de envelhecimento [31].

Além de variar com a temperatura, as permissividades também variam com a densidade dos isolamentos à base de celulose, como mostrado na Tabela 4.2. O projeto de isolamento simulado é detalhado a seguir, para que seus componentes possam ser identificados, assim como os pontos considerados críticos, onde o campo elétrico deve ser monitorado.

#### 4.2.2 Identificação dos componentes e pontos de análise do projeto

As diferenças entre permissividades de EN e OM determinam variações de campo nos isolamentos sólidos impregnados e líquidos dos transformadores. Logo, cada componente das simulações deve ter sua permissividade dielétrica corretamente atribuída. No projeto estudado, são considerados isolantes à base de celulose de baixa densidade os papéis e papelões moldados, usados nos encapamentos dos condutores, nos isolamentos moldados com raios e nos reforços isolantes de canto. São considerados isolantes à base de celulose de alta densidade os papelões em chapa, usados na fabricação de cilindros, arruelas, interiores de blindagens e anéis de prensagem. Estes isolamentos são identificados na Figura 4.2 (propriedade da TSEA Energia).

A Figura 4.2 representa uma vista em corte do par de enrolamentos concêntricos do transformador estudado (retângulo tracejado na parte superior da figura). A fronteira ou limite à esquerda da figura (parte mais interna do equipamento) é a superfície externa da coluna do núcleo. O enrolamento de BT é posicionado sobre o núcleo e separado radialmente do enrolamento de AT por canais de fluido e cilindros isolantes. À direita da figura, após o enrolamento externo (AT), a parede do tanque define a fronteira radial de simulação. Sendo simétricas as partes superior e inferior do projeto, a parte inferior da figura deixa de ser objeto de análise. Logo, os detalhes das extremidades dos enrolamentos são omitidos na parte de baixo, onde é reduzida a distância até o limite definido pela superfície do jugo (pacote de chapas na horizontal) do núcleo. Na parte superior da figura, acima do anel isolante usado para prensagem do conjunto, a superfície externa do jugo do núcleo define a última fronteira da simulação.

As seções dos enrolamentos são representadas verticalmente na Figura 4.2. No ensaio de tensão aplicada [24], não há diferença de tensão entre os condutores de um mesmo enrolamento, uma vez que todos os terminais da BT são aterrados e todos os terminais da AT são energizados. Logo, as seções dos enrolamentos são representadas como um único condutor isolado por canais de fluido. Esta simplificação não influencia a análise de campo elétrico entre os enrolamentos ou acima deles. Como as simulações objetivam controlar valores máximos de campo em pontos críticos das cabeças ou extremidades superiores dos enrolamentos, um número reduzido de seções pode ser considerado nas comparações. São desenhadas 4 seções em escala para cada enrolamento (BT e AT), e uma última seção inferior é representada com dimensão vertical estendida, de modo que a distribuição de campo elétrico na parte inferior não cause variação de campo na região de interesse. Acima das seções de BT e AT são mostradas

blindagens eletrostáticas que podem ser usadas para controle de campo elétrico no projeto. Estas possuem uma parte metálica com o mesmo potencial dos condutores de seus enrolamentos, mas com um raio maior, possibilitando a atenuação do campo nas cabeças dos enrolamentos.

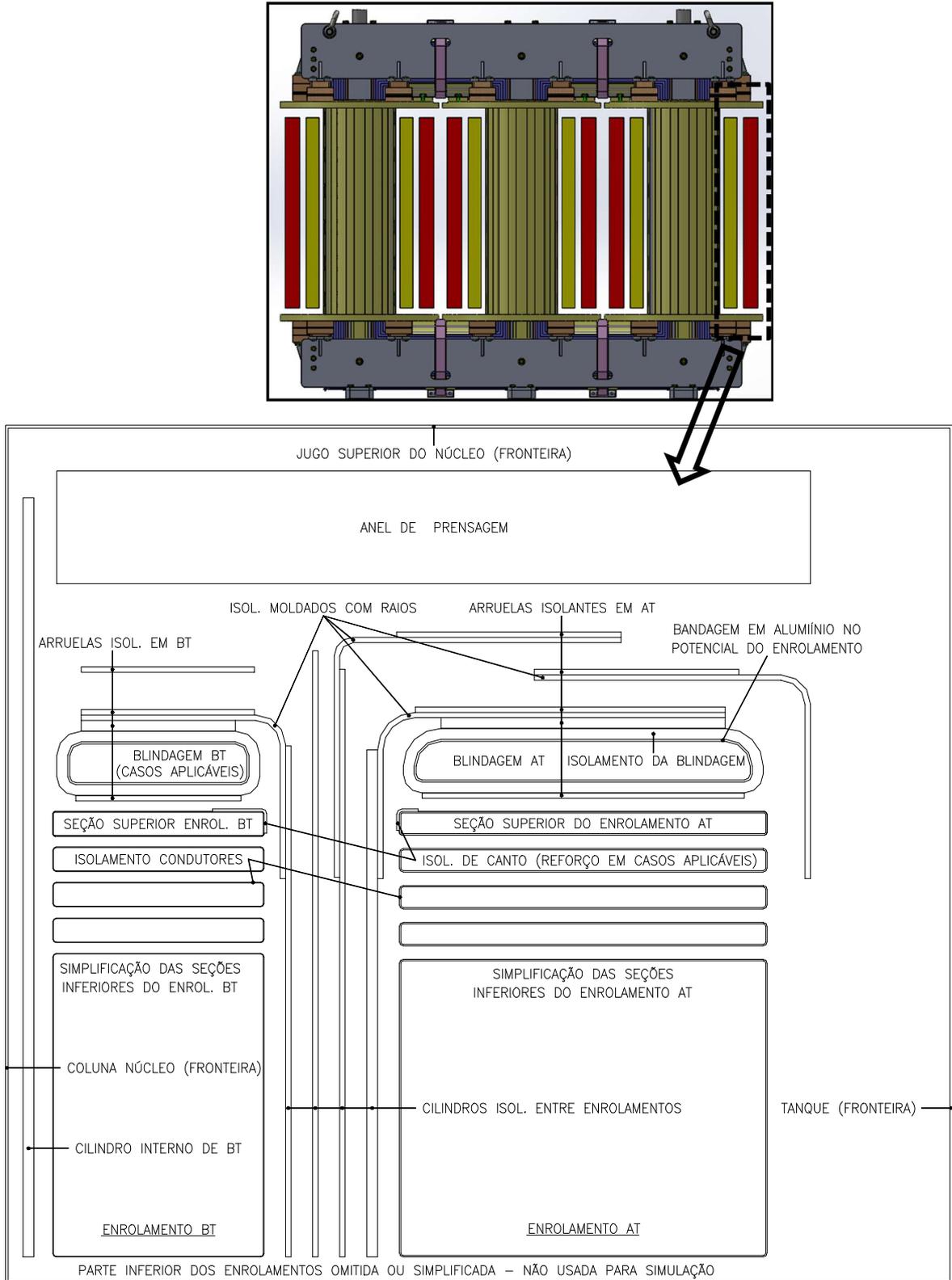


Figura 4.2. Componentes do projeto de isolamento. Cedida por TSEA Energia.

Além do enrolamento de BT e da parte condutora de sua blindagem (quando aplicável), as fronteiras que representam as superfícies do núcleo e a parede do tanque são aterradas (potencial zero) nas simulações, a exemplo do que ocorre no ensaio reproduzido. Como visto na Seção 4.1.2, uma tensão de 275kV é aplicada ao enrolamento de AT, assim como à parte condutora de sua blindagem eletrostática.

Tendo em mente que o foco das simulações a serem realizadas são as partes do projeto com características heterogêneas e comportamento de campo não-uniforme, ou seja, as extremidades dos enrolamentos, é importante definir os pontos considerados objetos de análise nesta região. Além do canal entre os enrolamentos e dos eletrodos energizados e aterrados (condutores e blindagens de AT e BT), a análise deve abranger os isolamentos sujeitos aos níveis mais altos de campo, para que sejam consideradas as variações de desempenho na interface sólido-líquido, discutidas na Seção 3.2.4. Os pontos do projeto definidos para o controle de campo são identificados na Figura 4.3 (propriedade da TSEA Energia).

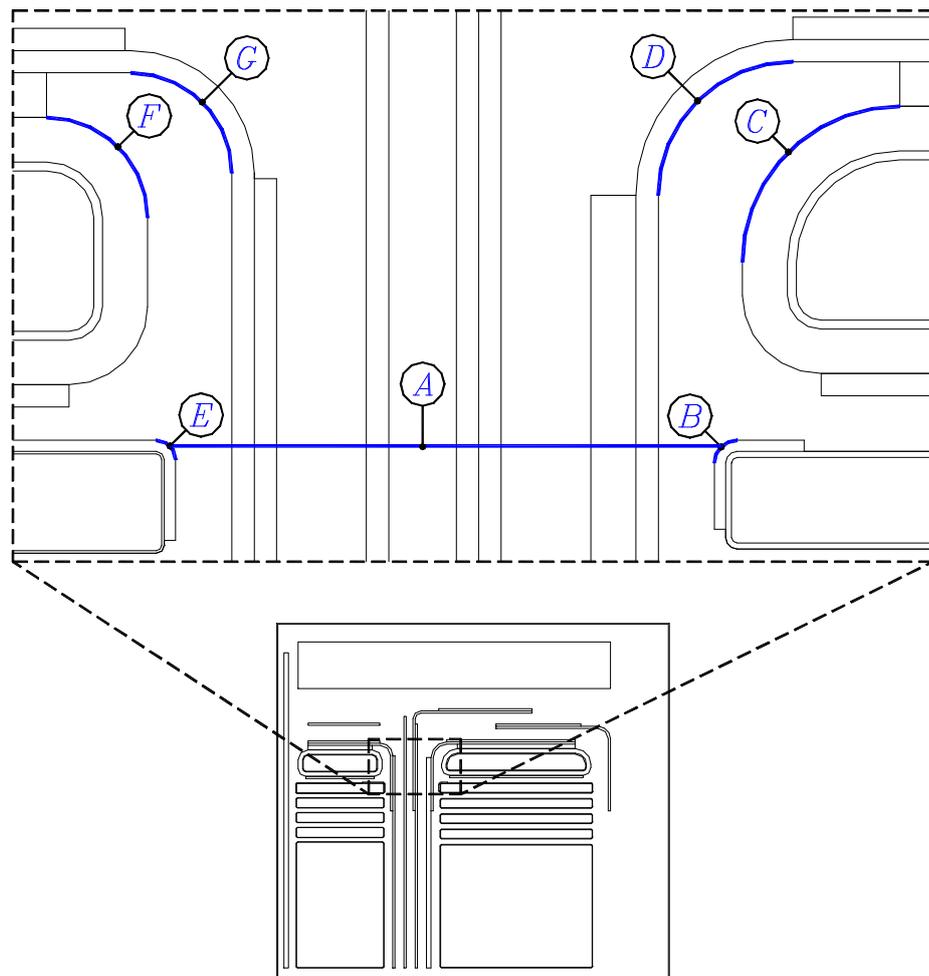


Figura 4.3. Pontos de análise do projeto de isolamento. Cedida por TSEA Energia.

Portanto, as simulações devem permitir a compilação dos valores de campo ao longo das linhas mais grossas identificadas na Figura 4.3 pelas letras *A* até *G*, a saber:

*A*) Campo elétrico máximo no canal entre os enrolamentos. A análise é considerada ao longo da linha horizontal que vai da quina do isolamento do condutor de BT (centro do segmento *E* na figura) até a quina isolada do condutor de AT (centro do segmento *B* na figura);

*B*) Campo elétrico máximo ao longo da superfície do raio do isolamento do condutor do enrolamento de AT (ou no reforço do isolamento, quando aplicável), na interface com o fluido;

*C*) Campo elétrico máximo ao longo da superfície do raio do isolamento da blindagem eletrostática do enrolamento de AT, na interface com o fluido;

*D*) Campo elétrico máximo ao longo da superfície do raio do isolamento moldado (capa) acima da blindagem de AT, na interface com o fluido, do lado mais próximo do enrolamento;

*E*) Campo elétrico máximo ao longo da superfície do raio do isolamento do condutor do enrolamento de BT (ou no reforço do isolamento, quando aplicável), na interface com o fluido;

*F*) Campo elétrico máximo ao longo da superfície do raio do isolamento da blindagem do enrolamento de BT (nos casos em que a blindagem é aplicada), na interface com o fluido;

*G*) Campo elétrico máximo ao longo da superfície do raio do isolamento moldado (capa) acima da blindagem de BT, na interface com o fluido, do lado mais próximo do enrolamento.

A ferramenta adotada para analisar o campo elétrico neste estudo de caso é o pacote computacional ELECTRO 2D/RS. Este programa canadense pago é voltado para aplicações de engenharia que demandam análise de campo elétrico por método dos elementos finitos. Possui modos de análise estática (adotado nas simulações), fasorial e transitória. Mais informações sobre o programa e exemplos de aplicações podem ser encontrados em seu endereço eletrônico [52]. O uso de um programa tridimensional seria mais preciso que a análise bidimensional adotada, mas segundo a experiência (análise empírica) da TSEA Energia pode-se considerar que os erros embutidos na análise eletrostática realizada são aceitáveis, diante da simetria do modelo (arranjo é mantido ao ser rotacionado).

Como visto na Seção 4.2.1, uma menor diferença de campo entre fluidos e materiais impregnados é esperada para EN, em função das menores relações de permissividades anteriormente discutidas. Este efeito deve ser quantificado a seguir, através de simulações de campo elétrico.

### 4.2.3 Casos 0 e 1 - modificações de campo definidas pelas permissividades

As simulações computacionais permitem quantificar o campo elétrico nos pontos onde a suportabilidade da isolamento deve ser avaliada. A diferença entre permissividades do EN e OM determina as variações de campos nos isolamentos sólidos impregnados e líquidos. Para avaliar a modificação de campo devido à diferença de permissividades, dois casos são inicialmente simulados. O caso base, identificado como 0 (zero), é o projeto de isolamento de referência adotado para o OM. No caso identificado com o número 1, o mesmo projeto do caso base é usado, substituindo-se o OM pelo EN. A Figura 4.4 mostra os desenhos de entrada do programa de simulação, à esquerda para o caso 0 (em OM) e à direita para o caso 1 (em EN).

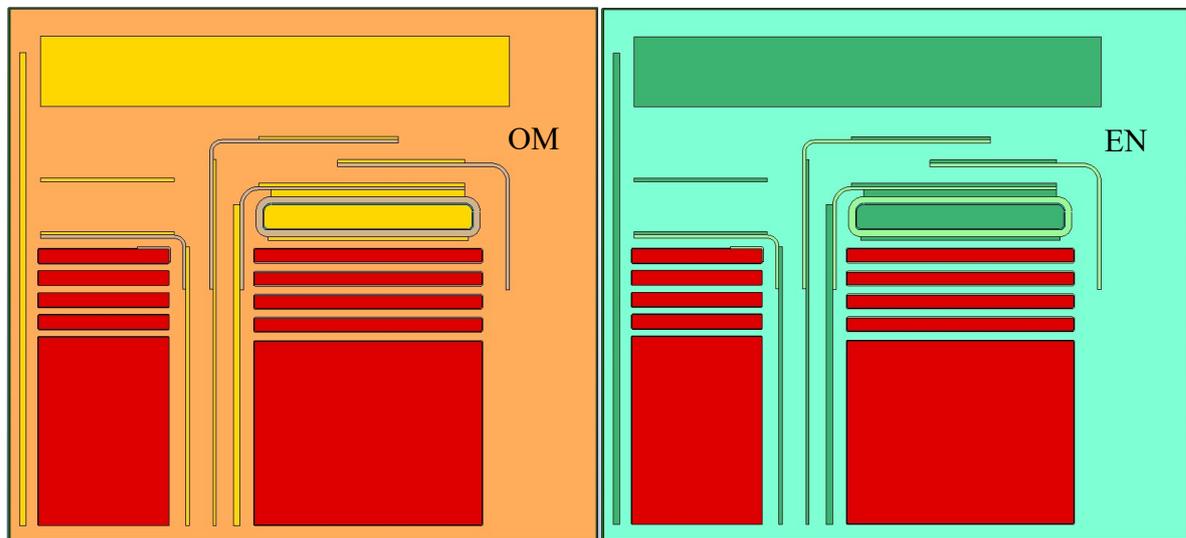


Figura 4.4. Casos simulados para avaliar a variação de permissividades.

Realizadas as simulações dos casos iniciais, onde o fluido é substituído sem se alterar o projeto de isolamento, os valores máximos de campo elétrico nos segmentos analisados (identificados na Seção 4.2.2) são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Campos máximos substituindo os fluidos no projeto base.

Ponto	A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)
	Canal	Fio AT	Bld. AT	Capa AT	Fio BT	Bld. BT	Capa BT
Caso	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm
0 (OM)	10,75	11,18	7,42	4,82	10,84	N/A	5,63
1 (EN)	10,34	10,74	7,23	4,76	10,44	N/A	5,54

Como visto na Tabela 4.3, a alteração das permissividades dos dielétricos com a substituição do OM pelo EN reduziu o campo nos segmentos de análise. Isto é explicado pela menor diferença entre as permissividades do EN líquido e isolamentos por ele impregnados, apresentadas na Tabela 4.2. A menor diferença entre as permissividades de sólidos e EN, quando comparados a OM, leva a uma variação benéfica da distribuição de campo elétrico, com seu valor máximo sendo reduzido 3,9% no projeto com EN. Os valores de campo elétrico dos pontos *B* a *G*, apresentados na Tabela 4.3, são os máximos nas interfaces, onde são computados os campos em cada lado do segmento (faces do mesmo segmento do lado do isolamento líquido e do sólido). Como o maior valor de campo ocorre no lado da interface onde há líquido, todos os valores máximos compilados são reduzidos ao substituir o OM pelo EN.

A Figura 4.5 apresenta a variação de campo ao longo do canal entre enrolamentos, substituindo-se o fluido (comparativo entre casos 0 e 1). O extremo esquerdo do gráfico é o extremo esquerdo do segmento *A* (Figura 4.3) no lado de BT, com o extremo direito do segmento *A* e do gráfico no lado de AT. As variações abruptas de campo ocorrem nas mudanças de meio, devido à presença de cilindros e isolamentos moldados ao longo do canal (dimensão no eixo horizontal do gráfico). O aumento de campo nos isolamentos sólidos e a redução nos canais de fluido pode então ser identificada para o projeto do caso 1. Esta menor diferença de campo entre os meios com EN concorda com resultados anteriormente apresentados [3][5][32]. As dimensões do projeto (como o eixo “x” da figura) são omitidas a pedido da TSEA Energia.

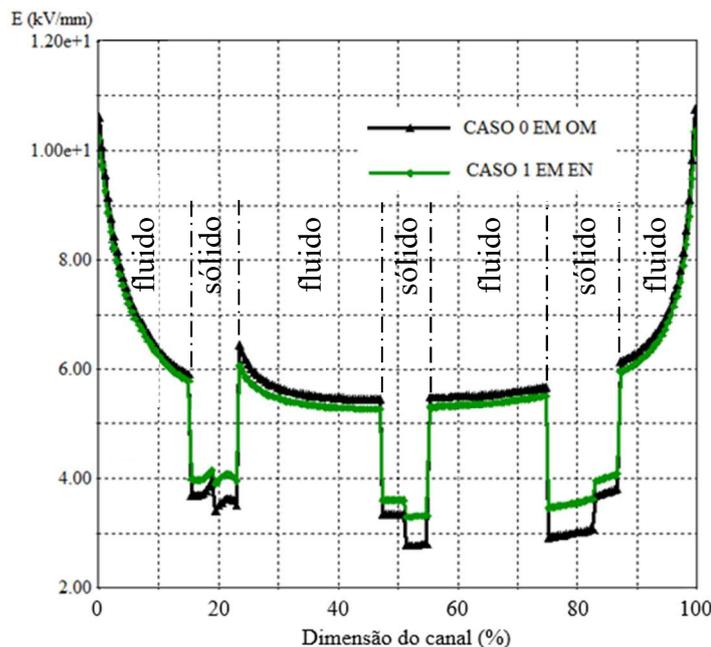


Figura 4.5. Comparativo de campo no canal (segmento A) para casos 0 e 1

### 4.3 Modificações no projeto de isolamento em EN

Na substituição de um líquido isolante tradicional por um alternativo, a distribuição de campo elétrico em torno dos enrolamentos de transformadores precisa ser cuidadosamente considerada, uma vez que está relacionada com a confiabilidade e com o custo do equipamento. Para que a distância entre enrolamentos de um projeto em OM seja aplicável ao EN, a meta principal é reduzir as concentrações de campo elétrico. Esta redução objetiva manter as margens de segurança adotadas com OM, apesar do pior desempenho do EN frente à propagação de *streamers* em arranjos heterogêneos. Nas simulações iniciais, foi observado que a substituição do OM (caso 0) pelo EN (caso 1) reduz os valores máximos de campo no projeto. Na sequência, são propostos casos com modificações nos componentes do projeto de isolamento, buscando reduções adicionais dos níveis de campo. No processo de adequação do projeto ao EN, as alterações apresentadas na Tabela 4.4 são testadas individualmente. Estes testes não objetivam otimizar o projeto, uma vez que não foram definidos limites de campo aplicáveis ao EN.

Tabela 4.4. Modificações individuais a serem testadas no projeto com EN

Caso	Modificação proposta no projeto de isolamento	Como muda
2	Aumento do raio dos condutores do enrolamento de AT	Raio de 0,5 para 1,0mm
3	Aumento do raio da blindagem na cabeça de AT	Raio de 5 para 10mm
4	Aumento do raio dos condutores do enrolamento de BT	Raio de 0,5 para 1,0mm
5	Adição de blindagem eletrostática na cabeça de BT	Incluída com raio 2mm
6	Aumento do raio da blindagem na cabeça de BT	Raio de 2 para 5mm
7	Aumento do número de cilindros entre os enrolamentos	De 3 para 4 cilindros
8	Aumento do raio do isolamento moldado de AT	Raio de 9 para 12mm
9	Aumento do raio do isolamento moldado de BT	Raio de 5 para 9mm
10	Adição de reforço de isolamento na extremidade de AT	Incluído com 1mm
11	Retirada do reforço de isolamento na extremidade de BT	Retirado com 1mm

As modificações propostas na Tabela 4.4 serão divididas em dois grupos de simulações. No primeiro grupo são analisados os casos 2 a 6, que estão associados às modificações nos raios dos eletrodos (fios condutores e blindagens dos dois enrolamentos) energizados e aterrados. Os casos 7 a 11 são avaliados no segundo grupo de simulações, que dizem respeito a alterações nos componentes isolantes críticos (sob maiores níveis de estresse) do projeto.

As modificações nas cabeças dos enrolamentos apresentadas na Tabela 4.4 seguem variações práticas (padrões) adotadas pelo fabricante e são mostradas na Figura 4.6. O objetivo da figura é facilitar a identificação individual dos componentes alterados nas simulações.

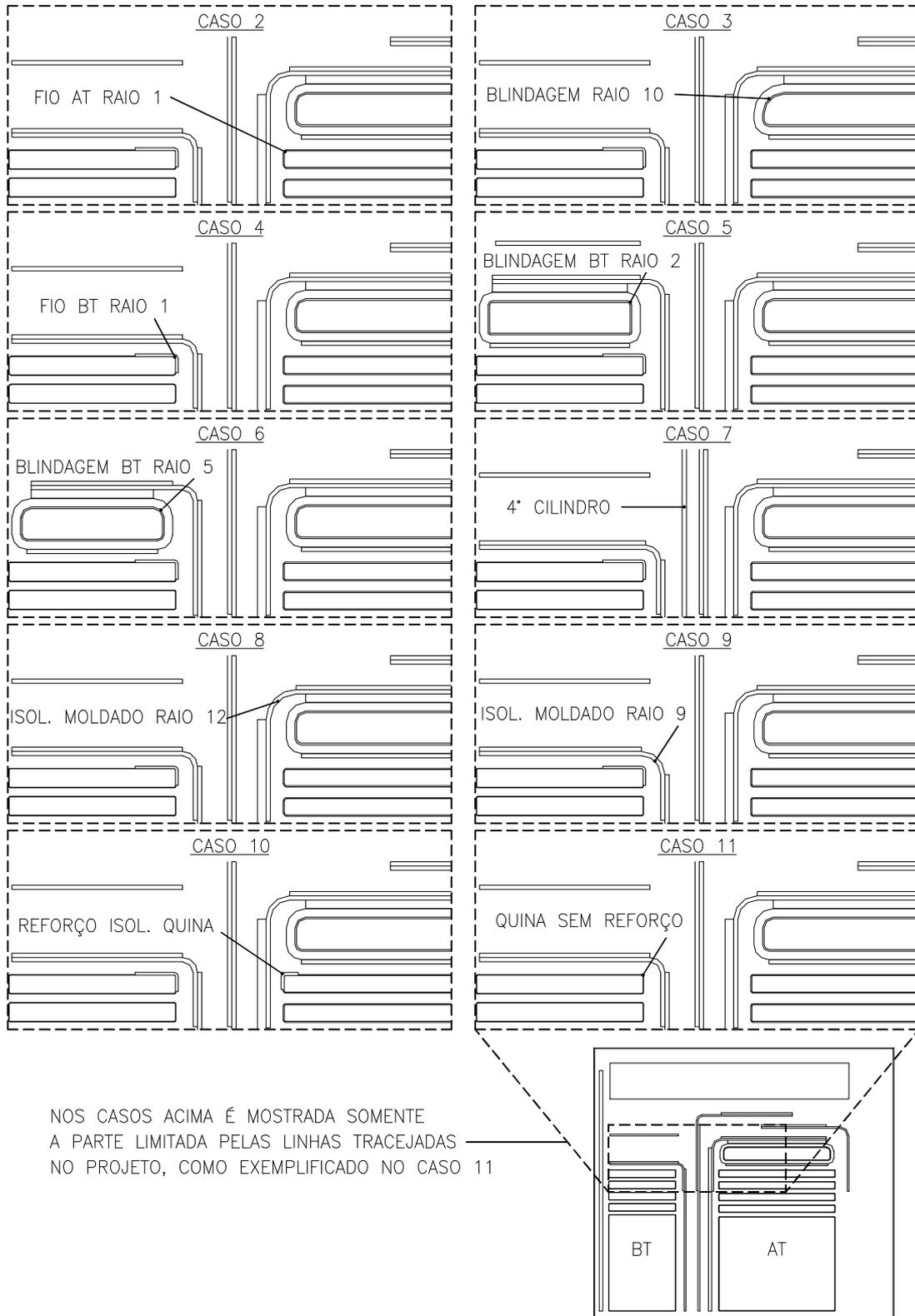


Figura 4.6. Modificações individuais no projeto. Cedida por TSEA Energia.

### 4.3.1 Casos 2 a 6 - modificações dos raios dos eletrodos

No projeto de isolamento, os eletrodos energizados são os fios condutores (seções) do enrolamento de AT e sua blindagem eletrostática. Os condutores do enrolamento de BT e sua blindagem eletrostática, quando aplicável, compõem o conjunto de eletrodos aterrados, a exemplo do que acontece no ensaio simulado.

Os valores máximos de campo elétrico nos segmentos analisados (identificados na Seção 4.2.2) são apresentados na Tabela 4.5 para os casos 2 a 6. Os dados do caso 1 são mantidos para permitir a comparação com o projeto em EN não modificado.

Tabela 4.5. Campos máximos nas modificações dos eletrodos em EN.

Ponto	<i>A)</i>	<i>B)</i>	<i>C)</i>	<i>D)</i>	<i>E)</i>	<i>F)</i>	<i>G)</i>
	Canal	Fio AT	Bld. AT	Capa AT	Fio BT	Bld. BT	Capa BT
Caso	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm
1 (EN)	10,34	<b>10,74</b>	7,23	4,76	10,44	N/A	5,54
2 (EN)	10,21	10,33	7,23	4,76	<b>10,43</b>	N/A	5,54
3 (EN)	11,65	<b>11,94</b>	5,96	4,10	10,12	N/A	5,40
4 (EN)	10,33	<b>10,73</b>	7,22	4,76	10,29	N/A	5,52
5 (EN)	10,98	<b>11,39</b>	7,78	5,21	8,26	5,27	3,74
6 (EN)	10,96	<b>11,37</b>	7,75	5,19	8,35	5,30	3,65

Nota: valores em negrito são os campos máximos de cada caso.

Os dados apresentados na Tabela 4.5 para as modificações dos raios dos eletrodos nos casos 2 a 6, são comentados individualmente a seguir, avaliando ainda se a modificação pode ser considerada recomendável para adequação do projeto ao EN.

Caso 2: os raios dos condutores do enrolamento de AT são alterados de 0,5mm (projeto de referência) para 1,0mm neste caso. O aumento do raio do condutor de AT e consequente aumento do raio de seu isolamento, reduz o campo no segmento *B* (isolamento do condutor de AT). Esta modificação também reduz o campo máximo ao longo do canal (segmento *A*) e pode ser considerada uma modificação recomendável.

Caso 3: o raio interno da blindagem de AT (ponto da blindagem no potencial do enrolamento) é alterado de 5mm (projeto de referência) para 10mm neste caso. O aumento do raio interno da blindagem eletrostática de AT, e consequente aumento do raio de seu isolamento, reduz significativamente o campo nos segmentos *C* (isolamento da blindagem AT) e *D* (isolamento moldado de AT). Esta modificação também tem efeito de redução de campo do lado de BT, observado nos segmentos *E* (isolamento do condutor de BT) e *G* (isolamento moldado de BT). Contudo, tal alteração tem um impacto negativo ao aumentar consideravelmente os campos máximos ao longo do canal (segmento *A*) e no segmento *B* (isolamento do condutor de AT). É recomendável que o aumento do raio da blindagem seja reavaliado em conjunto com outras modificações do lado de AT.

Caso 4: os raios dos condutores do enrolamento de BT são alterados de 0,5mm (projeto de referência) para 1,0mm neste caso. O aumento do raio do condutor de BT e consequente aumento do raio de seu isolamento, leva à redução de campo no segmento *E* (isolamento do condutor de BT). Há uma redução muito pequena no campo máximo do projeto. A ausência de aumento de campo em todos os segmentos, junto à redução no segmento *E*, permite que esta modificação seja considerada recomendável.

Caso 5: uma blindagem é adicionada no enrolamento de BT com raio interno (ponto da blindagem no potencial do enrolamento) de 2mm neste caso. A colocação de blindagem eletrostática em BT reduz drasticamente o campo nos segmentos *E* (isolamento do condutor de BT) e *G* (isolamento moldado de BT). Contudo, esta modificação aumenta o campo ao longo do canal (segmento *A*) e todos os segmentos do lado de AT (*B*, *C* e *D*). Por aumentar o campo máximo no projeto de isolamento, inicialmente esta modificação não é considerada recomendável, demandando a avaliação do efeito de uma blindagem com um raio maior.

Caso 6: o raio interno da blindagem de BT (ponto da blindagem no potencial do enrolamento) é alterado de 2mm (projeto do caso 5) para 5mm neste caso. O aumento do raio interno da blindagem eletrostática adicionada em BT apresentou resultados similares ao caso 5, com redução dos valores de campo do lado de BT (segmentos *E*, *F* e *G*) e valores mais altos de campo do lado de AT (segmentos *B*, *C* e *D*). Por aumentar o campo máximo no projeto de isolamento, a adição de blindagem em BT não é considerada recomendável isoladamente. É recomendável que a inclusão da blindagem de BT seja reavaliada em conjunto com modificações do lado de AT.

### 4.3.2 Casos 7 a 11 - modificações dos isolamentos

Como visto no Capítulo 3, a formação de descargas na interface entre papelão e EN demandam atenção. Logo, a redução de campo nos isolamentos também é objetivada na adequação do projeto de isolamento ao EN. Neste sentido, são realizados testes com inclusão de cilindro no canal entre enrolamentos, alterações de raios dos isolamentos moldados, adição e remoção de isolamentos de reforço nas quinas dos enrolamentos, como descrito na Tabela 4.4. Os valores máximos de campo elétrico nos segmentos analisados (identificados na Seção 4.2.2) são apresentados na Tabela 4.6 para os casos 7 a 11. Os dados do caso 1 são mantidos para permitir a comparação com o projeto em EN não modificado.

Tabela 4.6. Campos máximos nas modificações dos isolamentos em EN.

Ponto	A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)
	Canal	Fio AT	Bld. AT	Capa AT	Fio BT	Bld. BT	Capa BT
Caso	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm
1 (EN)	10,34	<b>10,74</b>	7,23	4,76	10,44	N/A	5,54
7 (EN)	10,48	<b>10,89</b>	7,28	4,81	10,56	N/A	5,92
8 (EN)	10,34	<b>10,74</b>	7,23	4,97	10,43	N/A	5,54
9 (EN)	10,72	<b>10,72</b>	7,22	4,75	10,43	N/A	6,08
10 (EN)	10,24	8,50	7,21	4,75	<b>10,46</b>	N/A	5,55
11 (EN)	<b>16,13</b>	10,71	7,21	4,75	15,33	N/A	5,44

Nota: valores em negrito são os campos máximos de cada caso.

Os dados apresentados na Tabela 4.6 para as modificações dos isolamentos nos casos 7 a 11, são comentados individualmente a seguir, avaliando ainda se a modificação pode ser considerada recomendável para adequação do projeto ao EN.

Caso 7: a quantidade de cilindros isolantes entre os enrolamentos é alterada de 3 (projeto de referência) para 4 neste caso. A colocação de mais um cilindro isolante entre os enrolamentos não produz nenhum efeito de redução nos valores máximos de campo elétrico. Um aumento representativo de campo é observado no segmento G (isolamento moldado de BT). Logo, apesar de menores canais de líquido suportarem maiores níveis de campo [8], o aumento do campo máximo no projeto de isolamento leva a considerar esta modificação não recomendável.

Caso 8: o raio interno do isolamento moldado do enrolamento de AT foi alterado de 9mm (projeto de referência) para 12mm neste caso. O aumento do raio do isolamento moldado de AT não produz nenhum efeito de redução nos valores máximos de campo elétrico do lado de AT (segmentos *B* e *C*). O aumento do comprimento do segmento sob análise o aproxima da blindagem de AT, onde o campo é mais alto. Logo, há um aumento de campo no próprio segmento *D* (isolamento moldado de AT). As reduções dos valores de campo no lado de BT (segmentos *E* e *G*) são desprezíveis e não há variação no campo máximo ao longo do canal (segmento *A*). Isoladamente esta modificação não pode ser dita recomendável. Mas deve ser considerada uma reavaliação do aumento do raio do isolamento moldado, em conjunto com o aumento do raio da blindagem de AT.

Caso 9: o raio interno do isolamento moldado do enrolamento de BT é alterado de 5mm (projeto de referência) para 9mm neste caso. O aumento do raio do isolamento moldado de BT leva a reduções desprezíveis de campo na maioria dos segmentos (*B*, *C*, *D* e *E*). Como o aumento do perímetro de análise do isolamento se aproxima do enrolamento de BT, onde o campo é mais alto, há um aumento de valor no segmento *G* (isolamento moldado de BT). Aumentando o campo máximo ao longo do canal (segmento *A*), esta modificação não é considerada recomendável sem o uso de blindagem. O aumento do raio do isolamento moldado de BT, em conjunto com o aumento do raio da blindagem, deve ser reavaliado.

Caso 10: um isolamento de extremidade com espessura de 1mm é adicionado à quina do enrolamento de AT neste caso. A adição do reforço de isolamento no condutor da extremidade de AT leva a uma drástica redução de campo no segmento *B* (isolamento do condutor AT). Reduções muito pequenas de campo são observadas nos outros segmentos do lado de AT (*C* e *D*) e aumentos muito pequenos são registrados do lado de BT (segmentos *E* e *G*). O campo máximo ao longo do canal (segmento *A*) também é reduzido e, portanto, esta modificação é considerada recomendável.

Caso 11: o isolamento de extremidade de espessura de 1mm é retirado da quina do enrolamento de BT neste caso. A retirada do reforço de isolamento no condutor da extremidade de BT leva a um drástico aumento de campo no segmento *E* (isolamento do condutor BT). Reduções de campo muito pequenas são observadas em outros segmentos (*B*, *C*, *D* e *G*). Mas o campo máximo ao longo do canal (segmento *A*) também apresenta um forte aumento e, portanto, esta modificação não é considerada recomendável.

### 4.3.3 Modificações combinadas e projeto proposto

Nas seções anteriores foi possível avaliar individualmente modificações em eletrodos e em isolamentos do projeto. Algumas das alterações possíveis foram descartadas, outras consideradas recomendáveis e outras demandam a verificação de modificações combinadas em mais de um componente. Na sequência são propostos três novos casos, frutos de combinações dos casos anteriormente simulados considerados positivos. Buscando reduções adicionais dos níveis de campo, as alterações apresentadas na Tabela 4.7 são testadas.

Tabela 4.7. Modificações combinadas a serem testadas no projeto com EN

Caso	Modificação combinada proposta no projeto	Casos combinados
12	Aumento de raios, blindagem em BT, e reforço isol. em AT	2, 3, 4, 6, 8, 9 e 10
13	Aumento de raios de fios e isol. e reforço de isol. em AT	2, 3, 4, 8 e 10
14	Aumento de raios dos fios e reforço de isolamento em AT	2, 4 e 10

Os valores máximos de campo elétrico nos segmentos analisados (identificados na Seção 4.2.2) são apresentados na Tabela 4.8 para os casos 12 a 14. Os dados do caso 1 são mantidos para permitir a comparação com o projeto em EN não modificado.

Tabela 4.8. Campos máximos nas modificações combinadas em EN.

Ponto	A)	B)	C)	D)	E)	F)	G)
	Canal	Fio AT	Bld. AT	Capa AT	Fio BT	Bld. BT	Capa BT
Caso	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm
1 (EN)	10,34	<b>10,74</b>	7,23	4,76	10,44	N/A	5,54
12 (EN)	8,36	<b>9,13</b>	7,32	5,17	8,24	5,21	3,93
13 (EN)	9,96	8,64	6,82	4,76	<b>10,22</b>	N/A	5,49
14 (EN)	10,05	8,51	7,21	4,75	<b>10,31</b>	N/A	5,53

Nota: valores em negrito são os campos máximos de cada caso.

Os dados apresentados na Tabela 4.8 para as modificações combinadas de eletrodos e isolamentos dos casos 12 a 14, são comentados a seguir, avaliando ainda se o projeto modificado pode ser considerado recomendável ao EN. Ao final, um dos casos é escolhido como o projeto de isolamento a ser aplicado ao EN.

Caso 12: os raios dos condutores dos enrolamentos de BT e AT foram alterados de 0,5mm para 1,0mm, o isolamento adicionado à quina do enrolamento de AT tem espessura de 1mm, foi adicionada blindagem em BT com raio de 5mm, o raio da blindagem da AT foi alterado de 5mm para 10mm, o raio do isolamento moldado de BT foi alterado de 5mm para 9mm e o raio do isolamento moldado de AT foi alterado de 9mm para 12mm neste caso. O aumento dos raios dos condutores, blindagens e isolamentos moldados, em conjunto com o reforço na extremidade de AT, leva a significativas reduções de campos nos segmentos *B*, *E* (isolamento dos condutores de AT e BT) e *G* (isolamento moldado de BT), bem como ao longo do canal (segmento *A*). Pequenas variações são encontradas nos campos das blindagens e há aumento do campo no segmento *D* (isolamento moldado de AT). O conjunto de modificações que compõem este projeto de isolamento pode ser considerado recomendável.

Caso 13: os raios dos condutores dos enrolamentos BT e AT foram alterados de 0,5mm para 1,0mm, o isolamento adicionado à quina de AT tem espessura de 1mm, o raio da blindagem da AT foi alterado de 5mm para 10mm e o raio do isolamento moldado de AT foi alterado de 9mm para 12mm neste caso. O aumento dos raios dos condutores, blindagem e isolamento moldado de AT, em conjunto com o reforço na extremidade de AT, leva a redução de campo em todos os segmentos, sendo expressiva em *B* (isolamento do condutor AT). O conjunto de modificações que compõem este projeto de isolamento pode ser considerado recomendável.

Caso 14: os raios dos condutores dos enrolamentos de BT e AT foram alterados de 0,5mm para 1,0mm e o isolamento adicionado à quina de AT tem espessura de 1mm neste caso. O aumento dos raios dos condutores, em conjunto com o reforço na extremidade de AT, leva a significativa redução de campo no segmento *D* (isolamento moldado de AT) e reduções menos expressivas ao longo do canal (segmento *A*) e no segmento *E* (isolamento do condutor BT). Pelo desempenho inferior aos casos anteriores de modificações combinadas, este projeto de isolamento não é considerado recomendável.

Caso escolhido: os projetos de isolamentos dos casos 12 e 13 poderiam ser aplicados. Contudo, o caso 12 implica em reduções mais expressivas de campo, incluindo o valor máximo reduzido 18,3% com relação ao projeto em OM. As variações de campo com relação ao projeto em OM são mostradas na Tabela 4.9 para todos os casos apresentados. Com base nas simulações, o projeto do caso 12 é proposto como mais adequado à aplicação em EN, mantendo a distância entre enrolamentos aplicável ao OM, com modificações minimamente dispendiosas.

Tabela 4.9. Variação dos campos máximos em EN com relação ao caso 0 (OM).

Ponto	<i>A)</i>	<i>B)</i>	<i>C)</i>	<i>D)</i>	<i>E)</i>	<i>F)</i>	<i>G)</i>
	Canal	Fio AT	Bld. AT	Capa AT	Fio BT	Bld. BT	Capa BT
Caso	Percentual de variação do campo máximo em relação ao caso 0, em OM						
1 (EN)	-3,8%	-3,9%	-2,6%	-1,3%	-3,7%	N/A	-1,5%
2 (EN)	-5,0%	-7,6%	-2,6%	-1,2%	-3,8%	N/A	-1,6%
3 (EN)	8,3%	6,8%	-19,7%	-14,9%	-6,7%	N/A	-4,1%
4 (EN)	-3,9%	-4,0%	-2,7%	-1,3%	-5,1%	N/A	-1,9%
5 (EN)	2,2%	1,9%	4,9%	8,0%	-23,8%	0,0%	-33,6%
6 (EN)	2,0%	1,8%	4,4%	7,5%	-23,0%	0,6%	-35,2%
7 (EN)	-2,5%	-2,6%	-1,9%	-0,3%	-2,6%	N/A	5,2%
8 (EN)	-3,8%	-3,9%	-2,6%	3,0%	-3,8%	N/A	-1,6%
9 (EN)	-0,3%	-4,1%	-2,7%	-1,4%	-3,8%	N/A	8,1%
10 (EN)	-4,8%	-24,0%	-2,8%	-1,4%	-3,6%	N/A	-1,3%
11 (EN)	50,0%	-4,2%	-2,8%	-1,5%	41,4%	N/A	-3,4%
<b>12 (EN)</b>	<b>-22,2%</b>	<b>-18,3%</b>	<b>-1,4%</b>	<b>7,2%</b>	<b>-24,0%</b>	<b>-1,1%</b>	<b>-30,1%</b>
13 (EN)	-7,4%	-22,7%	-8,0%	-1,4%	-5,8%	N/A	-2,5%
14 (EN)	-6,5%	-23,9%	-2,8%	-1,5%	-4,9%	N/A	-1,8%

Nota: valores em negrito são as variações de campo no projeto escolhido.

Para melhor visualização das variações nos segmentos aplicáveis, o campo máximo nos segmentos *A* a *G* analisados (identificados na Seção 4.2.2) são apresentados na Figura 4.7 para os projetos do caso 0 (isolado em OM), caso 1 (somente troca do OM pelo EN) e caso 12 (escolhido como adequado ao EN). Lembre-se que o segmento *F* só é aplicável ao caso 12.

As expressivas reduções de campo nos condutores (segmentos *B* e *E*), não são observadas na blindagem de AT (segmento *C*) e no isolamento moldado de AT (segmento *D*), onde houve aumento de campo. Contudo, com base na diferença entre os valores encontrados e admitidos nestes segmentos em OM, os níveis de campo obtidos são considerados aceitáveis. Outro importante ponto abordado no capítulo seguinte é a ausência de variações críticas de campo ao longo dos segmentos, que poderiam promover descargas superficiais. A Figura 4.8 mostra a variação de campo no segmento *D* para os casos 0 (OM) e 12 (EN) do lado do fluido. O lado esquerdo do gráfico (campos máximos) é a borda do segmento mais próxima de BT.

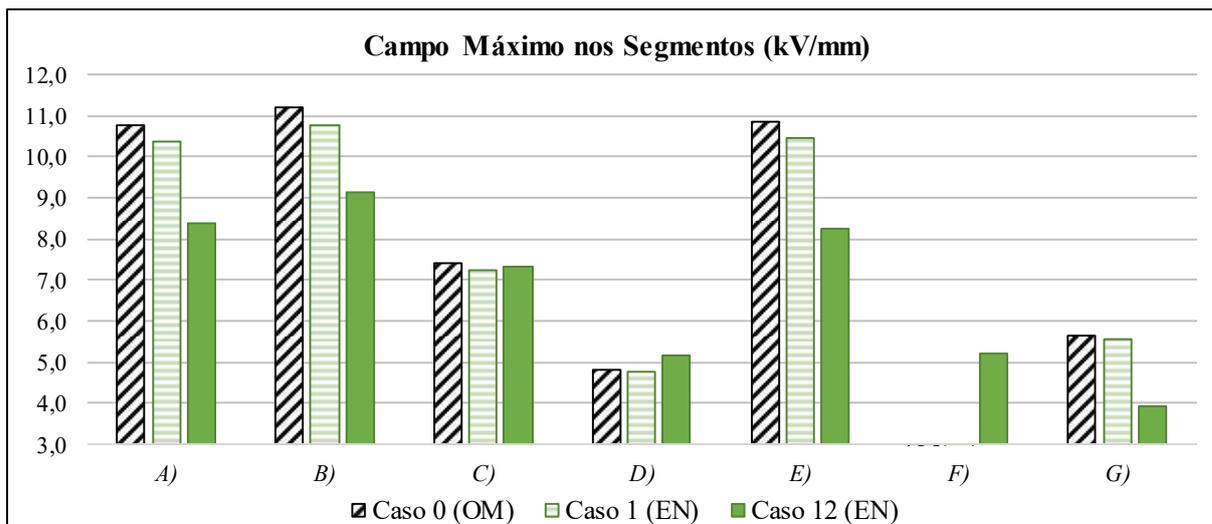


Figura 4.7. Variações de campo nos segmentos dos projetos em OM e EN.

Lembrando que, neste capítulo, as simulações computacionais objetivaram a redução de campo, principalmente devido a propagação de *streamers* rápidos ocorrer em tensões mais baixas no fluido alternativo, em condições de campo não uniforme. No capítulo seguinte são discutidos limites de projeto aplicáveis ao EN. Tais limites permitem avaliar se as reduções de campo apresentadas na Figura 4.7 são suficientes para manter as margens de segurança normalmente aplicadas aos projetos com OM. Observando as reduções do caso 0 para o caso 1, não é esperado que as variações de desempenho discutidas no Capítulo 3 sejam compensadas pela simples substituição do fluido isolante. Caso os limites de projeto permitam considerar seguro o projeto em EN escolhido (caso 12), uma comparação de custo deve ser apresentada para quantificar a vantagem de customizar o projeto para o novo fluido.

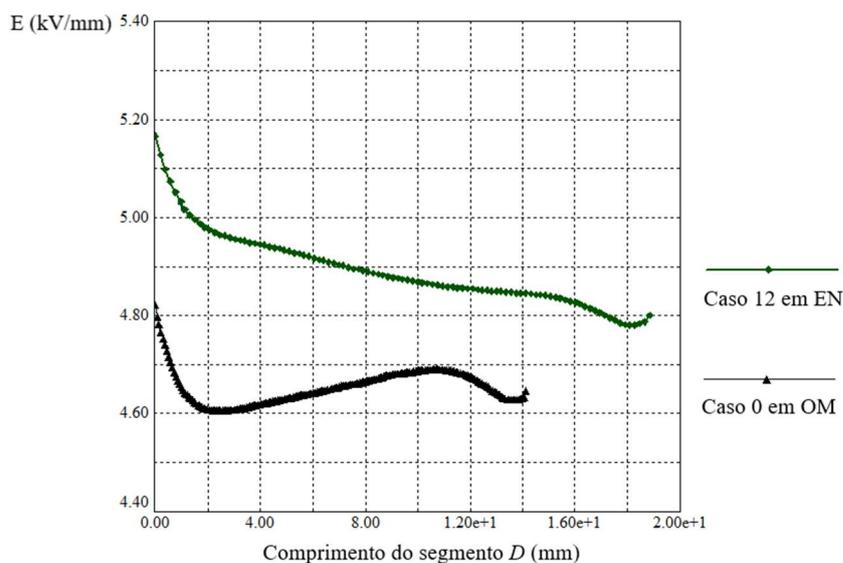


Figura 4.8. Variação de campo ao longo da capa de AT (segmento  $D$ ).

Cabe registrar que a solução apresentada é particular para o projeto em EN analisado. Para um equipamento da mesma tensão máxima 145kV, mas com IA 550kV e tensão aplicada 230kV (valores também normalizados) [24], um projeto sem blindagem em BT (caso 13) poderia ser a melhor opção. Portanto, a distribuição de campo deve ser avaliada a cada projeto.

#### **4.4 Considerações finais do capítulo**

Neste capítulo, a substituição do OM pelo EN no projeto de isolamento continuou a ser avaliada, principalmente através de simulações computacionais de campo elétrico. Características de um transformador de potência real de 40MVA (IA de 650kV) foram usadas no modelo adotado nas simulações computacionais. Por ser impactante em relação ao custo do equipamento e ter características de arranjo heterogêneo, onde o EN tem pior desempenho, as extremidades do canal entre os enrolamentos foram definidas como foco das avaliações. Componentes do projeto de isolamento foram identificados, assim como o esforço elétrico máximo aplicável.

O efeito da variação das permissividades dos fluidos foi avaliado e considerado favorável ao EN. Buscando reduzir os campos máximos em pontos críticos do projeto, modificações foram testadas individualmente e depois combinadas. As simulações de campo foram usadas para modificar o perfil de eletrodos e componentes isolantes, além de indicar onde reforços de isolamentos eram necessários. Tais modificações visaram manter a distância entre enrolamentos (eletrodos) usada em OM, a fim de garantir a competitividade do projeto com o fluido alternativo. Ao final, o projeto de isolamento do caso 12 foi escolhido para aplicação em EN, por permitir reduções consideráveis dos valores controlados de campo elétrico.

Reconhecidas as variações de comportamento dos dois fluidos e consideradas as modificações no projeto de isolamento para redução dos níveis de campo, no próximo capítulo são avaliados os limites de projeto nos dois fluidos, de modo a verificar se as margens de segurança são equivalentes. Avaliar se as reduções dos níveis de campo elétrico obtidas no Capítulo 4 são suficientes para compensar o pior desempenho de EN com relação a formação de descargas descritos no Capítulo 3 é o objetivo principal do Capítulo 5. Confirmando-se a aplicabilidade do projeto escolhido no estudo de caso, a redução de custo pela adequação do projeto ao EN é computada no final do capítulo seguinte.

## 5 LIMITES DE PROJETO EM ÉSTER NATURAL

Reconhecer os parâmetros que apresentam variação de desempenho é fundamental no processo de adequação do projeto dielétrico a um fluido alternativo. Para que o transformador com o novo líquido seja economicamente competitivo, é desejável que as distâncias de projeto não sejam aumentadas em relação ao isolante tradicional. Logo, como *streamers* se propagam com tensões mais baixas no EN, a sua escolha demanda redução de campo elétrico. Contudo, é preciso saber que percentuais de redução de campo são necessários para que o projeto em EN tenha as mesmas margens de segurança normalmente aplicadas em OM. Para transformadores de potência, os limites de projeto são bem estabelecidos para o OM. Neste capítulo são discutidos os limites que podem ser considerados no projeto de isolamento em EN. No item 5.1 são avaliadas tensões suportáveis no projeto, de acordo com o arranjo e a uniformidade do campo elétrico. O limite para escoamento em EN também é abordado. Um parecer sobre o uso do projeto escolhido no capítulo anterior é apresentado no item 5.2, em conjunto com alterações recomendadas para projetos com EN. Ao final, uma comparação de custo é mostrada no item 5.3, a fim de contabilizar a adequação do projeto ao EN.

### 5.1 Limites ou tensões suportáveis de projeto

O projeto de transformadores baseado no uso de isolamento de celulose em conjunto com OM é alicerçado em mais de 100 anos de experiência. O projetista deve controlar os níveis de campo elétrico nos canais de fluido, no isolamento sólido e na interface entre esses elementos. Curvas de projeto fornecem os limites de campo em cada uma dessas áreas críticas [8]. Tais curvas são baseadas em um risco de falha aceitavelmente baixo, normalmente com uma probabilidade próxima de 1%. As tensões limites de projeto são usualmente chamadas de tensões suportáveis [25].

Parâmetros dielétricos foram comparados no Capítulo 3, quase sempre usando tensões disruptivas ou tensões que representam 50% de probabilidade de falha. Contudo, ainda são raros os trabalhos em que os testes realizados definem curvas de projeto ou tensões suportáveis (1% de risco de falha). Com base nos dados avaliados, os limites de projeto em EN são discutidos a seguir, para condições de campos uniformes e divergentes.

### 5.1.1 Limite para condições de campo uniforme e arranjos homogêneos

Como visto no Capítulo 3, variações de desempenho entre EN e OM são minimizadas quando condições de campo uniforme e arranjos homogêneos são considerados. Logo, cabe avaliar os limites de projeto nestas condições em separado de campos e arranjos divergentes. Como as variações de desempenho estão associadas à dimensão do canal de fluido, pode ser útil a sugestão de um limite de referência para canais de EN em regiões críticas.

A tarefa inicial na aplicação de tensões suportáveis é identificar onde a distribuição de campo é uniforme no projeto modelado. Linhas equipotenciais em torno do enrolamento energizado são mostradas na Figura 5.1, para o caso 1 simulado no capítulo anterior. A tensão varia de seu valor máximo (275kV) no enrolamento de AT até zero em BT e demais partes aterradas (núcleo e tanque). Cabe lembrar que a parte inferior do desenho não é usada para análise e sua simplificação gera distorções de campo não aplicáveis ao transformador estudado. Desconsiderando estas deformações na parte inferior do modelo, o distanciamento entre linhas equipotenciais indica onde o campo elétrico varia uniformemente. Os retângulos com linhas mais espessas, adicionados à Figura 5.1, mostram regiões onde o campo é considerado uniforme ou quase uniforme, ou seja, a parte central do canal entre os enrolamentos e entre AT e tanque. Já em torno das cabeças superiores dos enrolamentos, o campo é considerado não uniforme, com regiões de concentração de campo evidenciadas por linhas equipotenciais mais próximas.

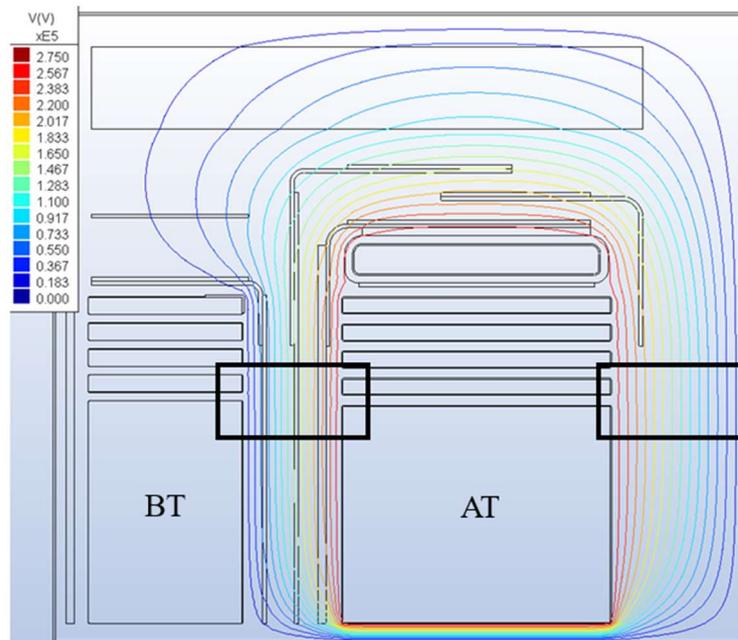


Figura 5.1. Linhas equipotenciais no projeto de isolamento modelado.

Limites de projeto (tensões suportáveis onde o risco de disrupção é baixo como 1%) são muito importantes para calculistas de transformadores de potência. Distribuições de Weibull são geralmente usadas em tratamentos estatísticos para obter a tensão suportável, a partir dos dados de testes disruptivos, usando fatores de escala e forma. Mas, para calcular tensões com baixas probabilidades de falha, o pequeno tamanho das amostras testadas pode ser uma limitação importante, resultando em níveis consideráveis de incerteza [38]. Um exemplo são os limites de projeto obtidos por um estudo com tensões CA em campo uniforme, realizados em canal de apenas 1mm [4]. Apesar do arranjo de teste de dimensões reduzidas, o trabalho considera que as margens de segurança são similares para projetos em OM e EN.

O número de disrupções avaliadas é importante no levantamento dos limites de projeto. Tensões suportáveis foram calculadas em um trabalho que aplicou 1.255 impulsos atmosféricos em OM e 639 impulsos em EN [38]. O campo foi considerado quase uniforme, num arranjo de teste com eletrodos esféricos distanciados de 3,8mm. Este trabalho reuniu resultados e levantou curvas de suportabilidade a tensões impulsivas, com probabilidade de falha de 1% nos fluidos. Os campos limites para projeto são apresentados com linhas tracejadas na Figura 5.2, para uma considerável faixa de canal de fluido. Como referência, curvas para 50% de probabilidade de disrupção também são mostradas na figura em linhas sólidas.

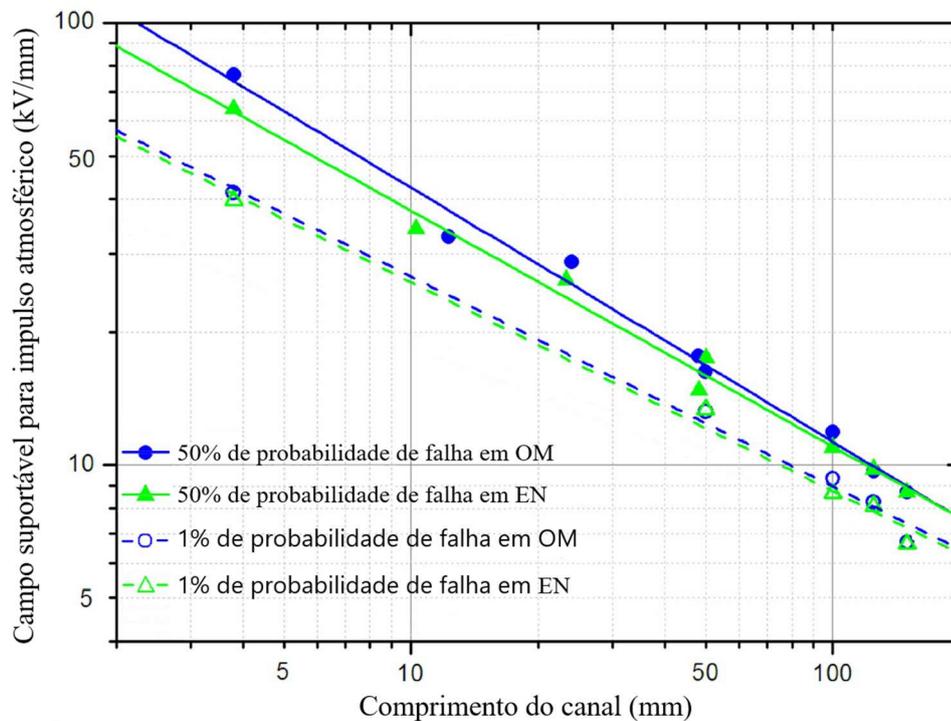


Figura 5.2. Limites de campos suportáveis para impulso. Adaptada de [38].

As Equações 5.1 e 5.2, apresentadas pelo mesmo trabalho [38], permitem calcular campos suportáveis a partir do comprimento “ $d$ ” do canal de fluido:

$$\text{Campo para 1\% de falha em OM: } E = 79,48 \times d^{-0,47} \quad \text{Equação 5.1}$$

$$\text{Campo para 1\% de falha em EN: } E = 76,84 \times d^{-0,47} \quad \text{Equação 5.2}$$

Nestas equações, originadas de testes em campo uniforme, os expoentes não variam para os dois fluidos. Logo, ressalta-se que o campo suportável calculado para o EN é apenas 3,4% inferior ao do OM. Na Seção 4.2.3 foi visto que, devido a variação de permissividades, a substituição do OM pelo EN reduziu o campo máximo em 3,9%. Portanto, um efeito de compensação pode ser aplicado, de modo a negligenciar a variação de limites destas equações.

Limites de projeto para EN iguais ou melhores que do OM são a conclusão de outro estudo, que usou tensões impulsivas em arranjos com canais de 3 a 55mm, simulando condições existentes em transformadores [39]. Apesar de relatar dificuldade para calcular tensões suportáveis, o trabalho considera que os projetistas podem usar as mesmas regras do OM em equipamentos isolados em EN, desde que o fluido seja adequadamente seco e desgaseificado.

Voltando à Figura 5.2, pode-se notar que a diferença de desempenho entre os fluidos não aumenta, quando a probabilidade de interrupção é variada de 50% (linhas sólidas) para 1% (linhas tracejadas). O mesmo pode ser concluído se comparadas as probabilidades de interrupção dos gráficos da Figura 3.7 e da Figura 3.17. Uma vez que a redução da probabilidade de falha diminui as diferenças entre EN e OM, as variações de parâmetros estudadas no Capítulo 3 podem ser consideradas na definição de curvas de projeto. Portanto, com base nas variações de desempenho já avaliadas e nos limites publicados citados nesta seção, as tensões suportáveis aplicáveis ao OM podem ser usadas para o EN, em condições de campo uniforme e arranjos homogêneos. A exceção para esta regra fica por conta de grandes canais de líquido, onde a suportabilidade do EN é reduzida e a adição de barreiras é recomendada [38][6].

Para definir se um canal de fluido é grande ou não, é necessário considerar o nível de campo a que estará submetido, já que a suportabilidade do canal depende de sua dimensão [8]. Um dos trabalhos avaliados considera que a variação de desempenho do EN é minimizada pela prática de projetistas limitarem os canais de líquido a 15mm [39]. Um retorno às Figuras 3.8, 3.10, 3.12 e 3.17 mostra que este pode ser um bom limite de referência. Portanto, canais acima de 15mm devem ser desencorajados em áreas críticas do projeto de isolamento em EN.

### 5.1.2 Limite para condições de campo não uniforme e arranjos heterogêneos

*Streamers* rápidos são perigosos em transformadores de potência, devido à possibilidade de propagação em surtos de curta duração, como os impulsos atmosféricos, e pela propagação em distâncias mais longas que os *streamers* lentos para um mesmo nível de tensão [16]. Como a tensão de aceleração dos *streamers* em EN é consideravelmente inferior à do OM em arranjos heterogêneos, especialmente em polaridade positiva, os limites de projeto aplicáveis para os fluidos em condições de campo não uniforme não tendem a convergir, como considerado para campos uniformes na seção anterior.

Suportabilidades a tensões impulsivas em um arranjo heterogêneo ponta-esfera, com canais de 2 a 25mm, foram estudadas com três técnicas de teste em um trabalho que publicou curvas de projeto para quatro tipos de EN, em comparação a um tipo de OM [53]. Dentre os EN testados, um tem como vegetal base o coco e outros três são originados de palma. As curvas de suportabilidade (1% de probabilidade de falha) a impulso atmosférico em campo não uniforme são mostradas na Figura 5.3 [53] para polaridades positiva (gráfico à esquerda) e negativa (gráfico à direita). Os limites de projeto dos quatro tipos de EN foram inferiores aos limites em OM. A diferença de desempenho se destaca na polaridade negativa, especialmente para comprimentos de canais a partir de 15mm, valor considerado como limite de referência na seção anterior. As diferenças entre as tensões que representam 50% de probabilidade de disrupção também foram comparadas no mesmo trabalho. A variação entre estas suportabilidades seguiu a mesma tendência das curvas de projeto (1% de falha), sendo críticas em polaridade negativa para canais maiores ou iguais a 15mm.

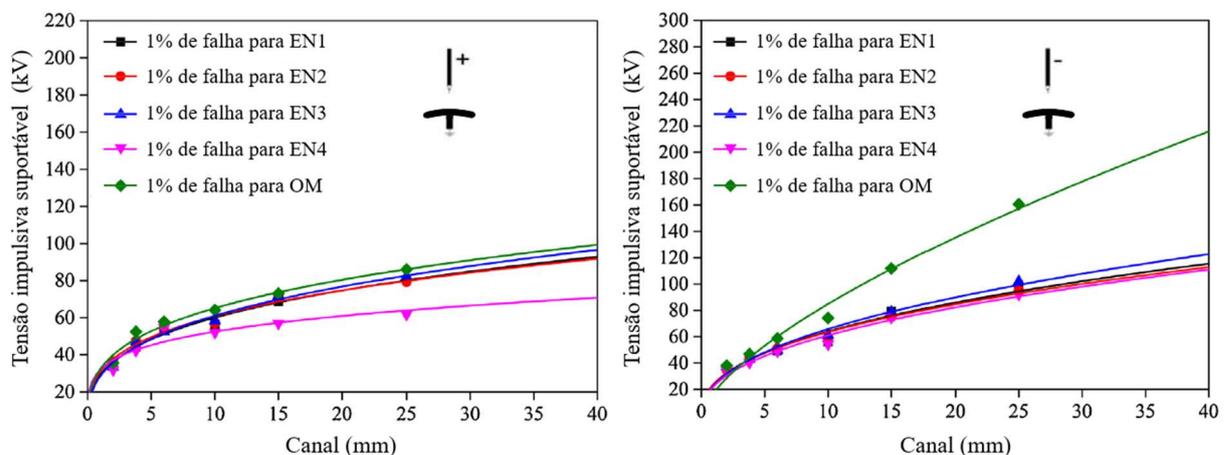


Figura 5.3. Limites de tensões suportáveis para impulso. Adaptada de [53].

Outro trabalho avaliou arranjos de campo não uniforme com tensões CA e impulsivas [6]. Os limites de projeto (risco de falha 1%) foram calculados, mas não foram publicados. Contudo, foi relatado que piores desempenhos e maiores desvios nos testes demandaram curvas mais conservadoras para limites de projeto em EN. Modificações no projeto de isolamento e barreiras de papelão também foram consideradas necessárias na substituição do fluido isolante.

Se considerados os parâmetros avaliados no Capítulo 3 e os poucos dados publicados sobre limites de projeto usando arranjos heterogêneos e campo não uniforme, conclui-se que deve haver uma diferenciação entre as suportabilidades de OM e EN nestes casos. Esta variação entre os limites aplicáveis para os fluidos deve aumentar com o comprimento dos canais. Além disto, as curvas devem ser específicas para o fluido vegetal a ser adotado, já que o gráfico à esquerda da Figura 5.3 apresenta uma variação considerável para um dos EN testados.

Por sua aplicação centenária, limites de projeto em arranjos divergentes são bem estabelecidos para transformadores de potência isolados em OM. O nível máximo de campo na superfície de um eletrodo isolado em celulose, como uma seção de enrolamento, é limitado entre 11 e 12kV/mm em OM [7]. O valor de campo máximo encontrado para o projeto simulado em OM no capítulo anterior (caso 0 na Seção 4.2.3) é de 11,18kV/mm no isolamento do condutor de AT, o que confirma a aplicação do limite publicado. Contudo, apesar de reconhecida a necessidade de reduzir a suportabilidade do EN em regiões de campo não uniforme, ainda é preciso definir claramente este limite para o projeto com fluido alternativo. Esta pode ser a lacuna mais importante a ser preenchida na adequação do projeto de isolamento ao EN. Contudo, não se pode estabelecer um valor limite (10kV/mm no eletrodo isolado, por exemplo) com base em poucos resultados publicados. Para definir este limite, seria importante conhecer resultados de testes em arranjos com dimensões práticas, que poderiam ser compartilhados por fabricantes de transformadores. A ausência de curvas de projeto em campo não uniforme, sugeridas a partir de ensaios em protótipos, é um desfaio a ser superado pela comunidade científica. A definição destes limites pode levar a otimizações de projetos em EN.

Mesmo sem curvas de projeto bem estabelecidas para campos não uniformes, as margens de segurança do projeto em EN, escolhido no capítulo anterior, são avaliadas na Seção 5.2.1. Além de avaliar limites de campo nos sólidos impregnados e nos canais de EN, é necessária avaliar a suportabilidade a descargas superficiais. O escoamento na interface entre os meios isolantes é um dos parâmetros avaliados no Capítulo 3, em que o EN apresenta pior desempenho que o líquido convencional.

### 5.1.3 Limite para descargas de escoamento

Isolamentos sólidos são usados para dividir canais, especialmente próximo aos eletrodos, para permitir um maior valor médio de campo elétrico e evitar a formação de descargas. Contudo, a interface entre os sólidos e o fluido é um ponto crítico do projeto de isolamento [8]. Nas simulações do capítulo anterior, a menor diferença entre as permissividades de fluido e sólidos impregnados conduziu a uma distribuição de campo elétrico mais uniforme em EN. Mas os menores valores de campo encontrados na interface podem não significar uma melhor condição de projeto. Como visto no Capítulo 3, o efeito de promoção de descargas superficiais, a maior possibilidade de ocorrer trilhamento no sólido e a maior capacidade de captar umidade do EN, precisam ser considerados no projeto.

Para reduzir a possibilidade de ocorrer descargas de escoamento, a variação de tensão ao longo das superfícies isolantes deve ser controlada. Sempre que possível, as barreiras de papelão são posicionadas de acordo com as linhas equipotenciais, de modo a minimizar o estresse tangencial ao longo do papelão [13]. Nas cabeças dos enrolamentos, onde as linhas de campo mudam de sentido (vertical  $\leftrightarrow$  horizontal), isolamentos com raios de curvatura são adotados. Apesar disto, em todo projeto há a presença de tensões interfaciais ou de escoamento ao longo da superfície dos isolamentos. Onde as linhas equipotenciais cruzam a superfície de um isolante sólido haverá diferença de potencial e conseqüente estresse na interface líquido/sólido. As linhas equipotenciais em torno das cabeças dos enrolamentos são apresentadas na Figura 5.4 para o caso 12 do capítulo anterior, proposto para uso em EN.



Figura 5.4. Linhas equipotenciais nas extremidades dos enrolamentos

Como visto na Seção 4.3.2, o aumento do raio do isolamento moldado de AT (segmento *D* da Figura 4.3) implica maior valor máximo de campo elétrico (Tabela 4.8) devido ao aumento do perímetro analisado que se aproxima da blindagem de AT, onde a tensão é máxima. Contudo, o maior raio do isolamento moldado tende a concordar com as linhas equipotenciais da Figura 5.4, o que é positivo para o controle do estresse tangencial. Sendo objetivo a redução de linhas que atravessam o isolamento, diminuindo a diferença de potencial na sua superfície, o aumento do raio do isolamento moldado de AT realmente deve ser recomendado.

Curvas bem definidas limitam o campo e controlam as descargas superficiais em OM. Mas é necessário modificar os limites de escoamento no projeto que adota o fluido vegetal [8]. A Figura 5.5 [8] apresenta os campos limites para escoamento (1% de probabilidade de ocorrer descargas parciais) para tensões alternadas e impulsos atmosféricos nas duas polaridades, usando canais de 10, 20 e 35mm. Este gráfico é um raro exemplo de curvas publicadas para uso em área industrial que incluem o EN. Pode ser dito que as suportabilidades indicadas na Figura 5.5 para os dois fluidos se confundem. Contudo, cabe registrar que as amostras usadas nos testes foram submetidas a secagem sob vácuo e que foi controlada a exposição ao oxigênio dos fluidos, que também foram desgaseificados. Isto mostra que o pior desempenho de EN em relação a descargas superficiais discutido na Seção 3.2.4 pode ser compensado por modificações no tratamento dos materiais isolantes, abordadas na Seção 3.3.

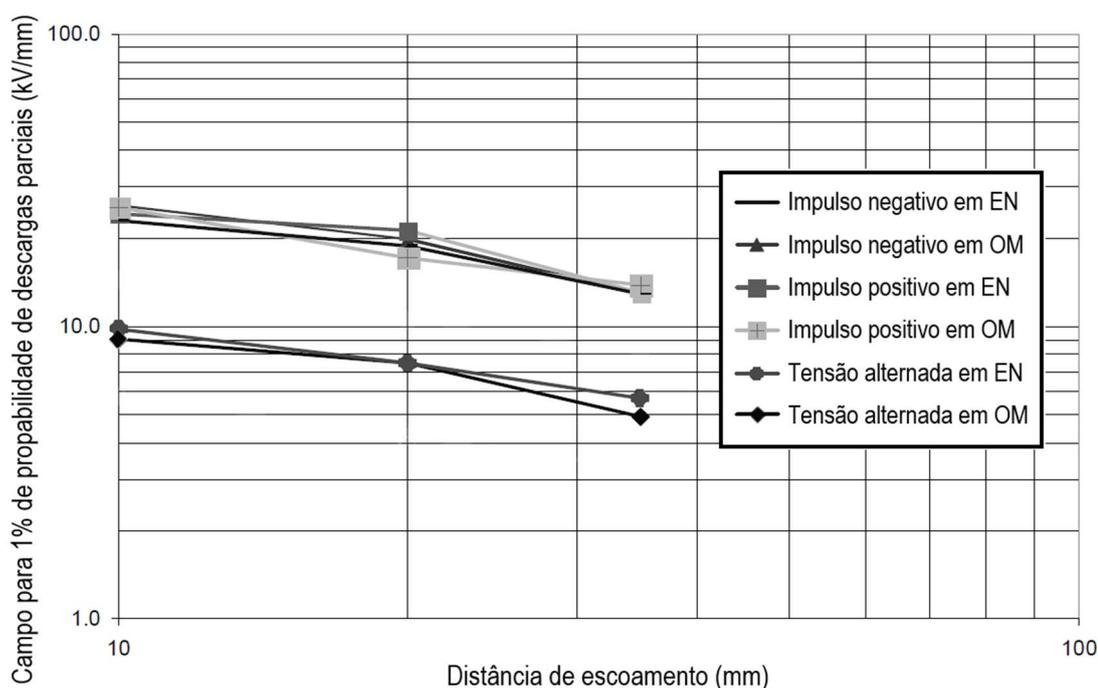


Figura 5.5. Suportabilidades a escoamento. Adaptada de [8]

Como visto no Capítulo 3, descargas superficiais em EN são promovidas em arranjos heterogêneos. Na seção anterior, a redução de campo em configurações divergentes já foi considerada necessária ao projeto de isolamento em EN. Logo, se reduzidos os níveis de campo, a proximidade das curvas apresentadas na Figura 5.5 permite dizer que o projeto de escoamento tende a se adequar com poucas medidas específicas. De qualquer forma, a adequação do perfil e o controle das tensões ao longo das superfícies isolantes são pontos importantes.

## 5.2 Adequações do projeto de isolamento recomendadas para o EN

Como visto na Seção 3.2.2, a disrupção é dominada pela iniciação dos *streamers* em campos quase uniformes com baixo fator de heterogeneidade. Para arranjos com elevado fator de heterogeneidade, a disrupção é determinada pela propagação de *streamers*. Outros pontos importantes a serem lembrados é que a tensão para início de descargas parciais é equivalente para os dois fluidos (Tabela 3.1 e Seção 3.2.1), assim como a tensão inicial para o aparecimento de *streamers* em arranjos heterogêneos (Seção 3.2.3), onde a tensão de aceleração dos *streamers* mais baixa em EN é o ponto crítico. Por fim, a disrupção por arborescência nos isolamentos sólidos ocorre geralmente em condição de campo não uniforme (Seção 2.3.1). Estes temas recordados concordam com as avaliações sobre limites de projeto da seção anterior. Campos uniformes e arranjos homogêneos permitem o uso de tensões suportáveis em OM para o EN, desde que limitadas as dimensões dos canais de fluido. Por sua vez, arranjos heterogêneos e campos não uniformes requerem a redução dos limites de projeto que, preferencialmente, devem ser calculados a partir de testes realizados em protótipos de dimensões consideráveis.

As dimensões de transformadores isolados em EN e OM podem ser similares [38]. No entanto, modificações de projeto no sentido de evitar a propagação de *streamers* precisam ser consideradas para lidar com o desempenho inferior do EN em campo não uniforme. Exemplos de alterações que podem ser sugeridas são aumentos de raios de eletrodos e isolamentos, divisão de grandes canais de líquido, uso de blindagem eletrostática e adição de reforços de isolamento. Para identificar as medidas necessárias à adequação do projeto de isolamento ao EN, são recomendadas simulações da distribuição de campo elétrico, considerando as variações de permissividades. Limites de projeto específicos para o EN devem ser usados para checar a confiabilidade do projeto modificado, que deve ter margens de segurança capazes de garantir a mesma confiabilidade de equipamentos isolados em OM.

### 5.2.1 Avaliação do projeto escolhido

No projeto recomendado para aplicação em EN (caso 12 do capítulo anterior) é importante identificar quais dimensões foram alteradas e demandam verificação de limites e margens de segurança. Como visto na Seção 4.1.1, as distâncias entre enrolamentos e entre estes e partes aterradas (núcleo e tanque) foram majoradas no projeto original do transformador estudado. Estas dimensões foram reduzidas, para distâncias comumente usadas em OM, no projeto de isolamento modificado em EN. Além do canal entre os enrolamentos (BT-AT), foco das simulações no Capítulo 4, a Figura 5.6 (propriedade de TSEA Energia) mostra as distâncias entre o enrolamento de AT e tanque (cota AT-TQ na figura) e entre enrolamento e núcleo (cota AT-NC na figura), que também é válida para a parte inferior não modelada. Estas dimensões foram avaliadas para o novo projeto considerado adequado para uso em EN.

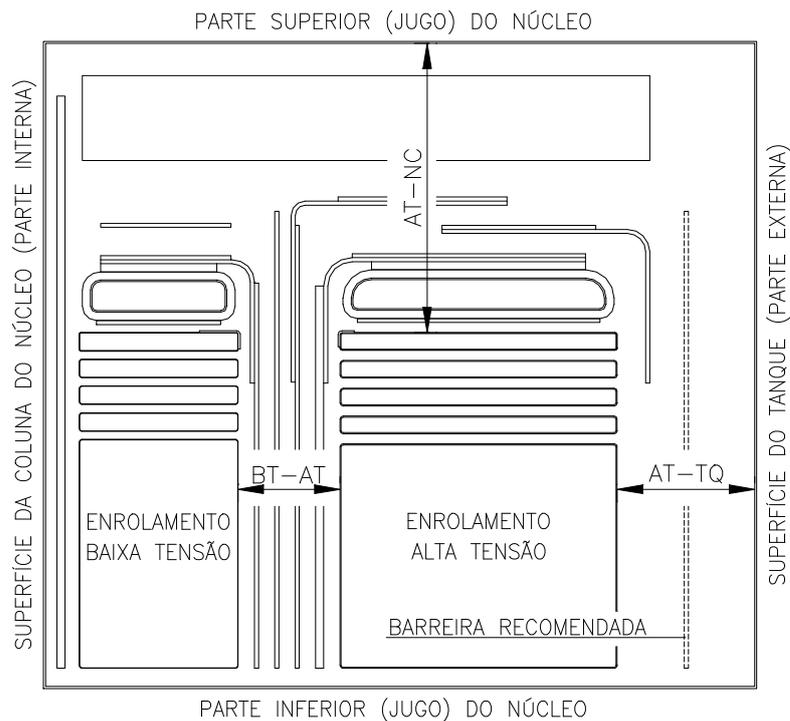


Figura 5.6. Distâncias alteradas no projeto de isolamento. Cedida por TSEA Energia.

Já foi visto que a suportabilidade do canal de fluido está associada à sua dimensão e que o desempenho do EN piora com o aumento do canal. Avaliando os valores de campo do projeto, as dimensões dos canais e as curvas de suportabilidades disponíveis (como as da Figura 5.2) não foram identificadas alterações necessárias na extensão AT-NC do projeto. Contudo, para que as margens de segurança em EN fossem equivalentes às do OM, uma barreira de papelão

foi considerada mandatória na dimensão AT-TQ, de modo a dividir o canal original, obtendo dois canais de maior suportabilidade. A barreira a ser adicionada é mostrada em linhas tracejadas na Figura 5.6. Apesar das regiões BT-AT e AT-NC não demandarem mais barreiras neste projeto, divisões de canais podem ser necessárias nestas regiões em outros casos.

Embora as dimensões destacadas na Figura 5.6 sejam omitidas neste trabalho a pedido do fabricante e os limites para campo não uniforme não sejam definidos na Seção 5.1.2, uma comparação permite avaliar a aplicabilidade do projeto recomendado no capítulo anterior. O projeto superdimensionado do equipamento fornecido foi identificado como caso 15 e simulado. A Tabela 5.1 compara os valores máximos de campo nos segmentos analisados (identificados na Seção 4.2.2) para os casos 12 (modificado) e 15 (fornecido). Houve aumento de campo nos segmentos *C* (isolamento da blindagem AT) e *D* (isolamento moldado de AT) do caso 12, mas estes não são valores críticos no projeto analisado, conforme considerado na Seção 4.3.3.

Tabela 5.1. Campos máximos para o equipamento fornecido e para o projeto escolhido.

Ponto	<i>A)</i>	<i>B)</i>	<i>C)</i>	<i>D)</i>	<i>E)</i>	<i>F)</i>	<i>G)</i>
	Canal	Fio AT	Bld. AT	Capa AT	Fio BT	Bld. BT	Capa BT
Caso	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm	kV/mm
12 (EN)	8,36	<b>9,13</b>	7,32	5,17	8,24	5,21	3,93
15 (EN)	9,20	<b>9,74</b>	6,96	4,55	9,09	N/A	4,81

Nota: valores em negrito são os campos máximos de cada caso.

Os valores adotados no projeto dos transformadores aprovados nos ensaios podem ser usados como limites de referência para campos não uniformes. Logo, o projeto em EN do caso 12 é considerado apto a ser utilizado em fornecimentos futuros. A redução de 6,3% do valor máximo de campo permite dizer que as margens de segurança do projeto de isolamento modificado são, no mínimo, equivalentes àquelas aplicadas nos transformadores em operação.

As pequenas reduções de campo entre os casos 0 a 1, apresentadas na Figura 4.7, não podem ser consideradas suficientes pela comparação com o transformador fornecido (caso 15). Contudo, a necessidade de redução de campo em arranjo divergente discutida na Seção 5.1 permite desencorajar a substituição do fluido isolante sem modificação do projeto. A substituição do projeto original do caso 15 (superdimensionado) pelo proposto no caso 12 do capítulo anterior (adequado ao EN) é contabilizada a seguir.

### 5.3 Redução de custo no projeto de isolamento adequado ao EN

Uma vez que o projeto de isolamento do caso 12, apresentado no capítulo anterior, foi considerado adequado frente aos limites adotados como referência, cabe avaliá-lo sob o ponto de vista financeiro. A Tabela 5.2 (propriedade de TSEA Energia) apresenta variações de massa e custo dos principais materiais modificados durante a adequação do projeto ao EN.

Tabela 5.2. Redução de materiais no projeto em EN. Cedida por TSEA Energia.

Material reduzido	Quant. reduzida	R\$ / unidade	Redução (R\$)
Aço silício	315 kg	9,37 / kg	2.951,55
Cobre	131 kg	30,05 / kg	3.936,55
Papel / papelão baixa densidade	15,2 kg	12,10 / kg	183,92
Papelão de alta densidade	15,8 kg	27,97 / kg	441,93
Isolamento moldado	0,29 kg	852,04 / kg	247,09
Aço carbono	800 kg	3,13 / kg	2.504,00
Éster natural	2.800 l (2.576 kg)	8,96 / l	25.088,00
Total	3.853 kg	---	35.353,04

O valor reduzido apresentado na Tabela 5.2, significa 2,1% do total de materiais (incluindo acessórios) usados na fabricação do transformador objeto de estudo. Além disto, outros custos não detalhados são abatidos. A redução de mão-de-obra, o menor custo para transporte e o menor valor de construção da base do equipamento, são exemplos de tópicos impactados pela redução de quase quatro toneladas de material (5% da massa do equipamento).

Outras reduções de custo devem ser consideradas ao optar por transformadores de potência imersos em EN. Graças à resistência a fogo do fluido alternativo, o seguro contra incêndio deve ser significativamente reduzido e paredes corta fogo podem ser dispensadas no local de instalação e bacias de contenção de líquido podem ser simplificadas. Também cabe contabilizar o crédito de carbono por sua origem em fonte renovável [17]. Portanto, se equacionadas todas as reduções de custo impactadas, a adoção de um projeto customizado em EN é fortemente recomendada.

Entretanto, nem tudo é positivo na comparação de custo de equipamentos em OM e EN. O atual preço do EN é cerca 3,5 vezes o do OM, distante da diferença entre 10% e 15%

considerada numa publicação do ano de 2009 [54]. Aumentos de tempo em processos de fabricação e alterações de materiais incompatíveis com o EN devem ser computadas. Buchas e comutadores para aplicação em EN têm preços significativamente maiores que os destinados ao uso em OM (informação cedida por TSEA Energia). Contudo, é esperado que estas diferenças sejam minimizadas quando equipamentos em EN forem comercializados em maiores escalas.

#### **5.4 Considerações finais do capítulo**

Este capítulo apresentou considerações sobre os limites a serem adotados em projetos de isolamento de transformadores de potência isolados em EN. Limites de suportabilidade, definidos para probabilidades aceitáveis de falha, foram avaliados com base nas curvas de projeto publicadas e nas variações de desempenho anteriormente discutidas.

Foi considerado que os mesmos limites aplicados para o OM podem ser usados para o EN, quando avaliados campos quase uniformes e arranjos homogêneos, em canais de fluido de dimensões reduzidas. Um valor de referência foi sugerido para canais onde os níveis de campo são críticos. Para arranjos heterogêneos e campos não uniformes, foi identificada a necessidade de redução dos valores suportáveis no projeto. Contudo, a escassez de dados publicados não permitiu estabelecer tais limites para o EN, sendo considerado necessário o compartilhamento de testes em protótipos com dimensões práticas. Já para descargas de escoamento, curvas de projeto publicadas mostram que a suportabilidade do EN pode ser equivalente à do OM, se comparados sistemas isolantes adequadamente secos e desgaseificados e considerada a redução de campo já demandada para campos não uniformes.

Foram apresentados exemplos de modificações possíveis na adequação do projeto de isolamento ao EN e realçada a necessidade de realizar simulações computacionais de campo elétrico. Usando dados dos transformadores fornecidos, as margens de segurança do projeto de isolamento sugerido no capítulo anterior foram consideradas adequadas na região crítica de campo não uniforme. Ao final, um comparativo de custo é apresentado para quantificar a importância de usar um projeto customizado para aplicação em EN. As conclusões deste trabalho são apresentadas no capítulo seguinte.

## 6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Neste trabalho foram cobertas etapas necessárias para adequação do projeto de isolamento de transformadores de potência na substituição do óleo mineral pelo éster natural. O passo inicial foi a investigação das variações de desempenho dos materiais envolvidos. Identificados parâmetros que demandam alterações de projeto, foram realizadas simulações de campo elétrico que permitiram customizar o desenho dielétrico para o fluido isolante alternativo. Na etapa final, foram discutidos limites de tensões de projeto aplicáveis com o novo líquido. Considerações relevantes e conclusões são apresentadas neste capítulo, juntamente com propostas de continuidade para este trabalho.

A experiência de aplicação do óleo mineral em transformadores de potência é centenária. Legislações ambientais cada vez mais restritivas e a ameaça de escassez de petróleo nas próximas décadas tem incentivado a substituição do OM por alternativas renováveis. Considerado ambientalmente amigável e com menor risco de incêndio, a adoção do EN em transformadores de potência transitou de tensões de distribuição para o universo da transmissão. Como uma demarcação neste território, um equipamento imerso em EN de 300MVA e 420kV foi instalado em 2014. Contudo, com histórico em alta tensão inferior a 20 anos, a utilização do EN ainda pode ser considerada em fase de teste, já que a expectativa de vida dos transformadores de potência é de 35 a 40 anos. Portanto, foi considerado que a substituição do OM pelo EN precisa ser conduzida de modo a manter o nível de segurança deste equipamento estratégico para o sistema elétrico.

Durante a realização dos ensaios de fábrica, assim como em sua operação ao longo da vida útil, os transformadores são submetidos a esforços elétricos de características distintas. Para garantir a suportabilidade do projeto de isolamento a esses esforços, foi considerado imperativo conhecer a resposta de parâmetros dielétricos quando substituído o fluido isolante.

Nas comparações de disrupções em tensões CA, foi visto que o EN e a celulose por ele impregnada têm maior suportabilidade, mesmo quando envelhecidos. Apesar do EN absorver muito mais água que o OM, sua capacidade de isolamento não é afetada em níveis usuais de umidade relativa e tal absorção foi considerada capaz de estender a vida útil da celulose. A suportabilidade do EN também foi superior à do OM na presença de partículas metálicas e de celulose, assim como na combinação de contaminações. De negativo na suportabilidade CA do

EN, foi computada uma sensibilidade um pouco maior ao aumento da área do eletrodo. Logo, a suportabilidade CA do EN não traz grandes desafios na adequação do projeto de isolamento.

Processos de formação de descargas foram comparados. As tensões iniciais para aparecimento de DP no EN líquido foram superiores, mas descargas de escoamento foram iniciadas em tensões inferiores às do OM. A suportabilidade a tensões impulsivas do EN é comparável à do OM somente em campo quase uniforme ou quando avaliados pequenos canais, mas é reduzida para arranjos heterogêneos e canais maiores. Quando comparados fenômenos pré-descarga, *streamers* em EN se propagam mais rapidamente e em tensões bem mais baixas, podendo alcançar comprimentos críticos e levar à disrupção. Para a suportabilidade do projeto de isolamento em EN frente a tensões impulsivas, campos não uniformes e grandes canais de fluido são pontos críticos.

Descargas de escoamento, através da superfície do papelão imerso em EN, são facilitadas em ciclos negativos de tensões CA. As amplitudes e frequências de DP são maiores na formação de trilhamento em EN. Marcas brancas podem ser geradas em papelões secos e crescer mais rapidamente em EN, assim como transitar para marcas carbonizadas nos papelões. Apesar de processos de secagem e desgaseificação reduzirem a diferença de desempenho, a formação de descargas superficiais na celulose impregnada com EN deve ser outro foco de atenção, especialmente em arranjos heterogêneos.

Além das propriedades dielétricas, foram avaliados outros parâmetros com impacto na adequação do projeto de isolamento. Um ponto importante a ser observado é a exposição do EN ao oxigênio, devido à sua pior estabilidade no processo de oxidação, que restringe as formas de respiro aplicáveis aos transformadores. Com viscosidade cerca de quatro vezes maior que do OM, os materiais precisam de maiores tempo e temperatura para serem secos e impregnados com EN. A geração de gases é diferente no EN e precisa considerar parâmetros específicos de análise e monitoramento.

Pelo pior desempenho do EN relacionado a propagação de *streamers* e descargas de escoamento, foi considerada necessária a modificação do projeto, reduzindo os níveis de campo elétrico nas extremidades dos enrolamentos. Como as suportabilidades e as permissividades dos fluidos variam, a distribuição de campo elétrico no projeto foi estudada através de simulações computacionais. Características de um transformador fornecido foram modeladas e o arranjo heterogêneo do canal entre as cabeças dos enrolamentos foi o foco das simulações.

Objetivou-se reduções de campo e das distâncias do equipamento modelado, de modo a adotar as mesmas dimensões que seriam usadas em OM. Além da variação das permissividades implicar redução de campo elétrico no EN, outras expressivas reduções foram alcançadas ao incluir itens e modificar o perfil de componentes. Um projeto de isolamento mais competitivo foi apresentado para aplicação em EN, sendo sua validação considerada necessária.

Os limites de projeto foram avaliados para checar a confiabilidade do projeto proposto. Para probabilidades aceitáveis de falha, a suportabilidade do EN não foi corrigida ao serem considerados campos quase uniformes e arranjos homogêneos, em canais de dimensões limitadas. Para arranjos heterogêneos e campos não uniformes foi identificada a necessidade de redução dos limites de projeto. Entretanto, não foi possível defini-los sem o compartilhamento de curvas levantadas em testes com dimensões reais. A ausência de limites que determinem o nível de segurança em campo não uniforme é considerada a maior lacuna para substituição do EN pelo OM. Com o tratamento dos isolamentos e a redução de campo necessária para canais em campos não uniformes, a suportabilidade a escoamento do EN pode ser considerada equivalente à do OM. Modificações possíveis na adequação de projetos de isolamento ao EN foram recomendadas, sendo destacada a necessidade de simulações de campo. Sem limites estabelecidos para campos não uniformes, o projeto sugerido foi validado com base nos dados dos transformadores fornecidos. Uma redução de custo significativa foi apresentada, destacando a importância da adequação do projeto de isolamento de transformadores de potência, na substituição do OM pelo EN.

## **6.1 Propostas de continuidade**

Uma linha de continuidade deste trabalho é a avaliação da suportabilidade do EN a transitórios de alta frequência. A padronização de ensaios, que atestem o desempenho dielétrico dos transformadores sujeitos a esta classe de sobretensões, tem sido tratada para OM. Como o EN demanda modificações de projeto para garantir a confiabilidade frente a tensões impulsivas, deve ser importante avaliar a suportabilidade de EN aos transitórios de frente muito rápida.

Várias sementes são usadas para a produção de EN. Comparações apresentadas neste trabalho mostraram que a suportabilidade do EN pode apresentar variações significativas, dependendo do produto analisado. Focar nas diferenças de comportamento, a partir do vegetal

base, seria uma continuação razoável deste trabalho. No mesmo contexto, estudar misturas de OM e EN pode ser de grande valia. Como os fluidos podem ser combinados em qualquer proporção, é pertinente avaliar percentuais de mistura que permitam conciliar vantagens dos dois líquidos isolantes. Combinações e comparações com outros tipos de líquido, como ésteres sintéticos e nanofluidos, podem ser consideradas.

O fator DIL (design impulse level) foi usado neste trabalho para comparar tensões operativas e de ensaios. Contudo, as relações usadas para contrastar as severidades dos esforços elétricos foram levantadas para o OM. É recomendável que estes fatores (que relacionam tensões de diferentes amplitudes, frequências e durações) sejam estudados para o EN, considerando variações dos modelos de teste, principalmente para arranjos divergentes. A revisão destes fatores poderia validar ou corrigir comparações apresentadas neste trabalho.

A avaliação do isolamento combinada com outras partes do projeto de transformadores de potência pode ser considerado outro desenvolvimento futuro. Como a viscosidade do EN é cerca de quatro vezes maior que a do OM, o projeto de isolamento não é concebido isoladamente. A estrutura isolante deve favorecer a troca de calor, permitindo que a circulação do fluido transporte o calor gerado nos enrolamentos para o sistema de resfriamento, onde é dissipado. O sistema de isolamento também deve fornecer resistência mecânica suficiente para suportar condições de faltas, como forças de curto-circuito. No contexto da suportabilidade a esforços mecânicos, a resistência a tração do papel impregnado (novo e degradado) em EN pode divergir. Reunir estes temas num trabalho único pode ser útil a projetistas e usuários.

Projetos de isolamento desenvolvidos através de simulações computacionais devem ser validados pela construção de protótipos. É importante considerar diferenças entre processos reais de fabricação e testes de pequena escala em laboratórios de pesquisa. Limites de projeto, levantados a partir de ensaios em fábrica, devem ser investigados para o EN. Dados detalhados de produção e testes de unidade(s) protótipo(s) poderão ser tema de um trabalho futuro. A partir da clara definição das tensões suportáveis em campos não uniformes, o projeto de isolamento com o fluido vegetal poderá ser aprimorado. Processos de otimização poderão ser usados para definir canais, formatos de eletrodos e perfis de isolamentos, avaliando relações custo-benefício dentro de faixas aplicáveis ao processo produtivo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Asano e S. A. Page, “Reducing environmental impact and improving safety and performance of power transformers with natural ester dielectric insulating fluids”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, nº 1, p. 134–141, 2014.
- [2] I. Fofana, “50 Years in the Development of Insulating Liquids”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, nº 5, p. 13–25, 2013.
- [3] C. G. Azcarraga, A. Cavallini, e U. Piovan, “A Comparison of the Voltage Withstand Properties of Ester and Mineral Oils”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, p. 6–10, 2014.
- [4] X. Wang e Z. D. Wang, “Study of Dielectric Behavior of Ester Transformer Liquids under ac Voltage”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, nº 6, p. 1916–1925, 2012.
- [5] D. M. Mehta, P. Kundu, A. Chowdhury, V. K. Lakhiani, e A. S. Jhala, “A review of critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part II”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, nº 3, p. 1705–1712, 2016.
- [6] D. Chu *et al.*, “Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids”, *CIGRE - Elektrotechnik & Informationstechnik DOI*, p. 1–6, 2012.
- [7] W. Ziomek, K. Vijayan, D. Boyd, K. Kuby, e M. Franchek, “High voltage power transformer insulation design”, *2011 Electrical Insulation Conference, IEEE*, p. 211–215, 2011.
- [8] T. A. Prevost, “Dielectric properties of natural esters and their influence on transformer insulation system design and performance - An update”, *Conference Paper - IEEE*. p. 1–7, 2009.
- [9] R. Ocón, R. Montes, R. Liñan, e A. Guzmán, “Expierence with the first 230 kV shell type autotransformer retro-filled with natural ester on Mexican grid”, *CIGRE*, p. 1–8, 2014.
- [10] C. T. Duy, O. Lesaint, A. Denat, e N. Bonifaci, “Streamer propagation and breakdown

- in natural ester at high voltage”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, nº 6, p. 1582–1594, 2009.
- [11] Q. Liu e Z. D. Wang, “Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, nº 1, p. 285–294, 2011.
- [12] X. Yi e Z. Wang, “Surface tracking on pressboard in natural and synthetic transformer liquids under AC stress”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, nº 5, p. 1625–1634, 2013.
- [13] X. Yi e Z. Wang, “Creepage discharge on pressboards in synthetic and natural ester transformer liquids under ac stress”, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 7, nº 3, p. 191–198, 2013.
- [14] M. C. M. Pena, “Falhas em transformadores de potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções”, *Universidade Federal de Itajubá*. Dissertação de Mestrado, Itajubá, p. 1–134, 2003.
- [15] M. B. C. Stocco, “Avaliação do potencial de aplicação de óleos vegetais como fluidos isolants em transformadores de distribuição da rede elétrica”, *Universidade Federal do Paraná*. Dissertação de Mestrado, Curitiba, p. 1–108, 2009.
- [16] W. G. A2.35, “Experiences in Service with New Insulating Liquids”, *436 CIGRE Brochure*. p. 1–94, 2010.
- [17] R. Frotscher *et al.*, “Behaviour of Ester Liquids under Dielectric and Thermal Stress – From Laboratory Testing to Practical Use”, *CIGRE Paris Conf. Pap. D1-105*, p. 1–12, 2012.
- [18] V. Prasad Chavidi e D. Gnanasekaran, *Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids Applications in Power Plants*, 1st ed. Singapore: Springer, 2017.
- [19] *International Electrotechnical Commission, IEC 62270 Std Fluids for electrotechnical applications – Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment Fluides*. 2013, p. 1–33.
- [20] K. J. Rapp, J. Luksich, e A. Sbravati, “Application of Natural Ester Insulating Liquids in

- Power Transformers”, *Proceedings of My Transfo*, p. 1–7, 2014.
- [21] C. Krause, U. Kaminskis, A. Wild, K. Rapp, e A. Sbravati, “Dielectric prototype test of a full-scale 420 kV power transformer HV lead exit insulated with natural ester liquid”, in *34th Electrical Insulation Conference, EIC 2016*, 2016, p. 129–133.
- [22] JWG-A2-C4-03, “Interação entre Transformadores e o Sistema Elétrico com Foco nos Transitórios Eletromagnéticos de Alta Frequência”, *CIGRE, BT-012*. p. 1–102, 2009.
- [23] R. A. W. Juan A. Martinez, Jean Mahseredjian, “Parameter determination procedures for modeling system transients”, *IEEE Power & Energy Magazine*, p. 16–26, 2005.
- [24] *Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 5356 Transformadores de potência - Parte 3: Níveis de isolamento, ensaios dielétricos e espaçamentos externos em ar*. 2007, p. 1–44.
- [25] J. K. Nelson e C. Shaw, “The impulse design of transformer oil-cellulose structures”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, n° 3, p. 477–482, 2006.
- [26] E. O. Förster, “Progress in the Field of Electric Properties of Dielectric Liquids”, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 25, n° 1, p. 45–53, 1990.
- [27] X. Yi e Z. Wang, “The influences of solid surface on the propagation of creepage discharge in insulating liquids”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, n° 1, p. 303–312, 2015.
- [28] E. Kuffel e W. S. Zaengl, *High Voltage Engineering - Fundamentals*, 2nd ed. Oxford: BTCV, 2000.
- [29] *International Electrotechnical Commission, IEC 60076-7 Std Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers*. 2018, p. 1–86.
- [30] *Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Std 4 High-Voltage Testing Techniques*. 2013, p. 1–199.
- [31] S. Singha, R. Jr, G. Frimpong, C. Claiborne, e D. Cherry, “Comparative aging characteristics between a high oleic natural ester dielectric liquid and mineral oil”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, n° 1, p. 149–158, 2014.

- [32] R. Liao, J. Hao, G. Chen, Z. Ma, e L. Yang, “A Comparative Study of Physicochemical , Dielectric and Thermal Properties of Pressboard Insulation Impregnated with Natural Ester and Mineral Oil.pdf”, *Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, n° 5, p. 1626–1637, 2011.
- [33] M. Unge, S. Singha, N. Van Dung, D. Linhjell, S. Ingebrigtsen, e L. E. Lundgaard, “Enhancements in the lightning impulse breakdown characteristics of natural ester dielectric liquids”, *Applied Physics Letters*, vol. 102, n° 17, p. 1–5, 2013.
- [34] I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, e S. Pérez, “Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers”, *Electric Power Systems Research*, vol. 98, Elsevier B.V., p. 58–69, 2013.
- [35] W. Lu e Q. Liu, “Effect of cellulose particles on impulse breakdown in ester transformer liquids in uniform electric fields”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, n° 5, p. 2554–2564, 2015.
- [36] S. Chandrasekar e G. C. Montanari, “Analysis of partial discharge characteristics of natural esters as dielectric fluid for electric power apparatus applications”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, n° 3, p. 1251–1259, 2014.
- [37] Q. Liu e Z. D. Wang, “Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids with pressboard interface under lightning impulse voltage”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, n° 6, p. 1908–1917, 2011.
- [38] Q. Liu e Z. Wang, “Breakdown and withstand strengths of ester transformer liquids in a quasi-uniform field under impulse voltages”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, n° 2, p. 571–579, 2013.
- [39] K. J. Rapp, J. Corkran, C. P. McShane, e T. A. Prevost, “Lightning impulse testing of natural ester fluid gaps and insulation interfaces”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, n° 6, p. 1595–1603, 2009.
- [40] P. Rozga e M. Stanek, “Characteristics of streamers developing at inception voltage in small gaps of natural ester, synthetic ester and mineral oil under lightning impulse”, *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 10, n° 1, p. 50–57, 2016.

- [41] J. Zhou *et al.*, “Study on the propagation characteristic of streamer in long oil gap of natural ester”, in *12th IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)*, 2018, p. 872–875.
- [42] S. Haegele, F. Vahidi, S. Tenbohlen, K. Rapp, e A. Sbravati, “Investigation of interfacial surface creep breakdown at oil-pressboard interfaces in natural ester liquid and mineral oil”, in *IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)*, 2017, p. 1–5.
- [43] Operador Nacional do Sistema Elétrico, *NT-038/2014 Rev. 0 - Ensaio de elevação de temperatura de transformadores em sobrecarga*. 2014, p. 1–25.
- [44] P. Kundu, V. K. Lakhiani, D. M. Mehta, A. Chowdhury, e 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 Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, n° 2, p. 873–880, 2016.
- [45] S. Ab Ghani, N. A. Muhamad, Z. A. Noorden, H. Zainuddin, N. Abu Bakar, e M. A. Talib, “Methods for improving the workability of natural ester insulating oils in power transformer applications: A review”, *Electric Power Systems Research*, vol. 163, Elsevier B.V., p. 655–667, 2018.
- [46] H. M. Wilhelm *et al.*, “Avaliação da resistência a oxidação e do consumo do aditivo antioxidante de um éster natural isolante a base de óleo de milho em uso”, *Cigre Brasil, D1-02*, p. 1–8, 2014.
- [47] S. Tenbohlen, M. Koch, D. Vukovic, e A. Weinläder, “Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers”, *CIGRE, A2-102*, p. 1–8, 2008.
- [48] S. P. Moore, W. Wangard, K. J. Rapp, D. L. Woods, e R. M. Del Vecchio, “Cold start of a 240-MVA generator step-up transformer filled with natural ester fluid”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, n° 1, p. 256–263, 2015.
- [49] H. M. Wilhelm, V. Franch, L. Tulio, e A. F. Franch, “Compatibility of transformer construction materials with natural ester-based insulating fluids”, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, n° 5, p. 2703–2708, 2015.

- [50] *Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE C57.155 Std Guide for Interpretation of Gases Generated in Natural Ester and Synthetic Ester-Immersed Transformers*. 2014, p. 1–52.
- [51] Z. Wang, X. Wang, X. Yi, S. Li, e J. V. Hinshaw, “Gas generation in natural ester and mineral oil under partial discharge and sparking faults”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, n° 5, p. 62–70, 2013.
- [52] Integrated Engineering Software, “ELECTRO 2D/RS Electric Design Software”, *Electro V80*. [www.integratedsoft.com](http://www.integratedsoft.com), Manitoba.
- [53] Y. V. Thien *et al.*, “The effect of polarity on the lightning breakdown voltages of palm oil and coconut oil under a non-uniform field for transformers application”, *Industrial Crops and Products*, vol. 89, Elsevier B.V., p. 250–256, 2016.
- [54] D. P. Stockton, J. R. Bland, T. McClanahan, J. Wilson, D. L. Harris, e P. McShane, “Seed-oil-based coolants for transformers”, *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 15, n° 1, p. 68–74, 2009.