

ESTUDO DE FLUÍDO BIODEGRADÁVEL EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: ÉSTER VERSUS ÓLEO MINERAL

NUNO FREDERICO MOREIRA LAPA

março de 2022

ESTUDO DE FLUIDO BIODEGRADÁVEL EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: ÉSTER VERSUS ÓLEO MINERAL

Nuno Frederico Moreira Lapa



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia
2022

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de TEDSE
– Dissertação/Estágio do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de
Energia

Candidato: Nuno Frederico Moreira Lapa, Nº 1160949, 1160949@isep.ipp.pt

Orientação científica: Teresa Alexandra Nogueira, TAN@isep.ipp.pt

Empresa: Efacec Energia

Supervisão: Andrea Soto, Andrea.soto@efacec.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2022

À minha família

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao meu avô, Francisco Lapa. Avô, obrigado por teres sido uma pessoa sempre presente na minha vida e por me ajudares e incentivares sempre para ultrapassar os grandes desafios que a vida assim exigia. Obrigado por tudo, nunca serás esquecido em momento algum.

Aos meus pais, por serem um pilar fundamental na minha vida. Obrigado pelas palavras, pelas condições, e pelo apoio que sempre me proporcionaram para que conseguisse alcançar um sonho. Um obrigado nunca será suficiente, esta vitória também é vossa.

À minha orientadora Institucional, Prof. Dr^a Teresa Nogueira, por toda a ajuda, disponibilidade e transmissão de conhecimentos.

À minha orientadora empresarial, Eng^a Andrea Soto. Foi uma pessoa muito importante para esta etapa. Obrigado por estar sempre disponível para me ajudar.

Ao meu amigo Eng^o Pedro Correia, por toda a ajuda desde a minha entrada na empresa Efacec, por estar sempre disponível para me ajudar e por ser uma pessoa presente.

A todas as pessoas que envolvem a equipa dos transformadores. Um obrigado a todos vocês pela vossa amizade, pela ajuda e pela oportunidade de realizar esta dissertação na vossa área.

À minha namorada, por me apoiar em todos os momentos da minha vida. Obrigado pelo apoio constante nesta etapa. Sem ti, a realização deste trabalho seria muito mais difícil.

Por fim e não menos importante, aos meus amigos. Muito obrigado pela vossa amizade, por me apoiarem nos bons e maus momentos ao longo do meu percurso académico. Jamais serão esquecidos.

Resumo

Os transformadores de potência são um dos elementos mais importantes no sistema elétrico. Estas máquinas elétricas são estáticas e apresentam um elevado rendimento e fiabilidade, consequência de uma adequada conceção da máquina e da sua constituição com materiais de alta fiabilidade. Este trabalho de dissertação está enquadrado na área de transformadores de potência do tipo *Core*, e o foco é colocado no fluido dielétrico, que tem função de isolante e de permitir a refrigeração do transformador. Atualmente, grande parte dos transformadores utilizam óleo mineral como fluido dielétrico e de arrefecimento. Com a crescente preocupação ambiental as comunidades científicas têm vindo a procurar uma alternativa ao fluido óleo mineral, sendo o óleo éster um potencial candidato uma vez que apresenta uma elevada biodegradabilidade, alta resistência ao fogo, e não apresenta danos ao meio ambiente.

Neste trabalho foi desenvolvido um estudo intensivo de análise e comparação do comportamento de transformadores de potência de tipo *Core*, imersos a óleo mineral e a éster. Este estudo foi implementado em 3 classes distintas de transformadores, nomeadamente, com potências de 20 MVA, 50 MVA e 125/40 MVA. Foi aplicada uma metodologia de cálculo dos transformadores que consistiu numa sequência de processos, desde o dimensionamento da parte ativa e estruturas isolantes do transformador, até ao cálculo das solicitações dielétricas e análise do campo elétrico. Os resultados obtidos foram apoiados em *softwares* específicos, com correção automática de erros e desvios que garantem o cumprimento da legislação relativa a este equipamento. Para todos os casos de estudo analisados, os cálculos foram efetuados respeitando o mesmo Índice de Eficiência de Pico (PEI), de acordo com o regulamento (EU) 2019/1783 da Comissão europeia. Os resultados demonstraram que, no caso da utilização do éster, as perdas de joule e as dimensões do transformador aumentam assim como as massas e o custo global de fabrico. No entanto, os transformadores imersos em éster apresentam valores mais favoráveis de campo elétrico, mais precisamente os campos de aresta e no óleo, face aos transformadores imersos em óleo mineral.

Palavras-Chave

Transformadores de potência tipo *Core*, óleo mineral, óleo éster, metodologia de cálculo, PEI, perdas de joule, massas, custo global de fabrico, campo elétrico

Abstract

Power transformers are one of the most important elements in the electric system. These electric machines are static and have high performance and reliability, as a result of an adequate machine design and its composition of highly reliable materials. This dissertation is framed in the area of Core-type power transformers, and the focus is placed on the dielectric fluid, which functions as an insulator and allows the cooling of the transformer. Currently, most transformers use mineral oil as a dielectric and cooling fluid. With the growing environmental concern, scientific communities have been looking for an alternative to mineral oil fluid, ester oil being a potential candidate since it has high biodegradability, high fire resistance, and does not harm the environment.

In this dissertation, an intensive study was carried out to analyse and compare the behaviour of Core-type power transformers, immersed in mineral and éster oil. This study was implemented in 3 different classes of transformers, namely, with 20 MVA, 50 MVA and 125/40 MVA powers. A transformers calculation methodology was applied, which consisted of a sequence of processes, from the sizing of the active part and the insulating structures of the transformer, to the calculation of the dielectric stresses and analysis of the electric field. The results obtained were supported by specific software, with automatic correction of errors and deviations that guarantee compliance with the legislation concerning this equipment. For all case studies analysed, the calculations were carried out complying with the same Peak Efficiency Index (PEI), in accordance with regulation (EU) 2019/1783 of the European Commission. The results showed that, when using the éster oil, the joule losses and the dimensions of the transformer increase as well as the weight and the overall cost of manufacture. However, transformers immersed in éster oil show more favorable values of electric field, more precisely in the edge fields and oil, compared to the transformers immersed in mineral oil.

Keywords

Core-type power transformers, mineral oil, éster oil, calculation methodology, PEI, joule loss, weight, overall cost of manufacture, electric field

Índice

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ACRÓNIMOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2.OBJETIVOS	2
1.3.ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	3
2. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: COMPONENTES E ISOLANTES.....	5
2.1.CONSTITUIÇÃO	6
2.1.1. CIRCUITO MAGNÉTICO DO TRANSFORMADOR.....	6
2.1.2. ISOLANTES SÓLIDOS	7
2.2.TIPOS DE REFRIGERAÇÃO	8
2.3.ENSAIOS DIELÉTRICOS E DE AQUECIMENTO	12
2.3.1. ENSAIOS DIÉLETRICOS	13
2.3.2. ENSAIO DE AQUECIMENTO.....	14
2.4.FLUIDOS ISOLANTES	15
2.4.1. IMPACTE AMBIENTAL	16
2.4.2. COMPOSIÇÃO DO ÓLEO MINERAL	16
2.4.3. COMPOSIÇÃO DO ÓLEO ÉSTER.....	17
2.5.ÉSTER VERSUS ÓLEO MINERAL – PROPRIEDADES	17
2.5.1. PERMITIVIDADE RELATIVA.....	17
2.5.2. TENSÃO DISRUPTIVA.....	19
2.5.3. PONTO DE FOGO, INFLAMAÇÃO E PONTO DE FLUIDEZ.....	20
2.5.4. VISCOCIDADE.....	20
2.5.5. FATOR DE DISSIPACÃO DIELÉTRICO	21
2.5.6. PROPRIEDADES QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO	21
2.5.7. VALORES DAS PROPRIEDADES PARA ÓLEO MINERAL, ÉSTER NATURAL E ÉSTER SINTÉTICO	22
2.6.PEI- PEAK EFFICIENCY INDEX.....	23

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO: APLICAÇÕES	25
3.1.ANÁLISE INTRODUTÓRIA.....	25
3.2.SOFTWARE DE CÁLCULO CORET	27
3.3.SOFTWARE DE CÁLCULO CORETRANSIENT: SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS	28
3.4.SOFTWARE COMERCIAL ELECTRO- ESTUDO DE CAMPO ELÉTRICO	32
3.5.CASOS DE ESTUDO	33
3.5.1. CASO 1	33
3.5.2. CASO 2	36
3.5.3. CASO 3	38
4. ANÁLISE E RESULTADOS: ÓLEO MINERAL VERSUS ÉSTER	43
4.1.CASO 1 – ÓLEO MINERAL.....	43
4.1.1. MASSAS E GRANDEZAS ELÉTRICAS	43
4.1.2. SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS	44
4.1.3. ESTUDO DO CAMPO ELÉTRICO	45
4.2.CASO 2 – ÓLEO MINERAL	52
4.2.1. MASSAS E GRANDEZAS ELÉTRICAS	52
4.2.2. SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS	53
4.2.3. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO	54
4.3.CASO 3 – ÓLEO MINERAL.....	56
4.3.1. MASSAS E GRANDEZAS ELÉTRICAS	56
4.3.2. SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS	57
4.3.3. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO	57
4.4.CASO 1- ÓLEO ÉSTER.....	59
4.4.1. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO	59
4.4.2. SIMULAÇÃO DE CÁLCULO – GRANDEZAS ELÉTRICAS E DIMENSÕES	61
4.5.CASO 2- ÓLEO ÉSTER	62
4.5.1. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO	62
4.5.2. SIMULAÇÃO DE CÁLCULO – GRANDEZAS ELÉTRICAS E DIMENSÕES	66
4.6.CASO 3- ÓLEO ÉSTER.....	67
4.6.1. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO	67
4.6.2. SIMULAÇÃO DE CÁLCULO – GRANDEZAS ELÉTRICAS E DIMENSÕES	69
4.7.ANÁLISE COMPARATIVA	70
4.7.1. CASO 1	70
4.7.2. CASO 2	73
4.7.3. CASO 3	75
4.8.DISSCUSSÃO DE RESULTADOS	77
5. CONCLUSÕES.....	79
5.1.ANÁLISE CONCLUSIVA	79

5.2.PERSPETIVAS FUTURAS.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81
ANEXO A. ANÁLISE CAMPO ELÉTRICO BT CASO 2.....	85
ANEXO B. ANÁLISE CAMPO ELÉTRICO BT CASO 3	87

Índice de Figuras

Figura 1 – Núcleo tipo <i>Core</i>	7
Figura 2 – Método de refrigeração ONAN/KNAN	10
Figura 3 – Método de refrigeração ONAF/KNAF	11
Figura 4 – Método de refrigeração OFAN-ODAN / KFAN-KDAN	11
Figura 5 – Método de refrigeração OFAF-ODAF /KFAF-KDAF	12
Figura 6 - Método de refrigeração OFWF- ODWF /KFWF-KDWF	12
Figura 7 -Forma de onda LI	13
Figura 8 – Teste IVPD	14
Figura 9 - Composição molecular dos tipos de óleo mineral Parafínico e Nafténico	16
Figura 10 - Composição molecular do éster natural (a) e do versus sintético (b)	17
Figura 11 – Campo elétrico na aresta enrolamento-papel éster versus óleo mineral	19
Figura 12 – Cartão entre os enrolamentos BT-AT	19
Figura 13 – Exemplo de comportamento da tensão disruptiva com água no transformador	20
Figura 14 – Fluxograma do processo de cálculo de transformadores <i>Core</i>	26
Figura 15 – Tomada Máxima e Nominal	29
Figura 16 – Tomada Mínima e onda de choque neutro	30
Figura 17 – Exemplo de ligações elétricas no ensaio de onda de choque na tomada máxima definidas no CoreTransient.	31

Figura 18 – <i>Software Eletro</i> -Estudo de campos elétricos <i>streamline</i> exemplo	32
Figura 19 - <i>Software Eletro</i> - Estudo de campos elétricos campo aresta exemplo	33
Figura 20 – Exemplo de deslizante no tubo de baixa tensão	33
Figura 21 - Corte de janela caso 1	36
Figura 22 – Corte de janela caso 2	38
Figura 23 – Corte de janela caso 3	41
Figura 24 – Solicitações dielétricas Caso 1- Óleo mineral	45
Figura 25 – Áreas de interesse para análise de campo elétrico para o caso 1	46
Figura 26 - Estudo campo elétrico culassa superior – Óleo Mineral	47
Figura 27 – Estudo campo elétrico culassa inferior -Óleo Mineral	47
Figura 28 – Estudo campo elétrico entre AT e regulação inferior -Óleo Mineral	48
Figura 29 – Estudo campo elétrico entre AT e regulação meio – Óleo Mineral	48
Figura 30 – Estudo entre AT e regulação superior – Óleo mineral	48
Figura 31 – BT-AT inferior – Óleo Mineral	49
Figura 32 – BT-AT meio – Óleo Mineral	49
Figura 33 – BT -AT superior– Óleo Mineral	49
Figura 34 – Campo elétrico entre CM-BT inferior -Óleo Mineral	50
Figura 35 – Campo elétrico entre CM-BT meio – Óleo Mineral	50
Figura 36 – Campo elétrico entre CM-BT superior – Óleo Mineral	51
Figura 37 - Solicitações dielétricas Caso 2	53
Figura 38 – Análise de campo elétrico BT-AT- óleo mineral caso 2	54

Figura 39 - Análise de campo elétrico BT-AT meio – óleo mineral caso 2	54
Figura 40 – Análise de campo elétrico entre AT-REG caso 2 – óleo mineral	55
Figura 41 – Solicitações dielétricas caso 3	57
Figura 42 – Análise campo elétrico AT-BT cima Caso 3	58
Figura 43- Análise campo elétrico AT-BT meio Caso 3	58
Figura 44- Análise campo elétrico AT-Regulação superior Caso 3	58
Figura 45 - Análise campo elétrico Regulação-terciário superior Caso 3	59
Figura 46 – Análise de campo elétrico BT-AT superior caso 2 éster	63
Figura 47 - Análise de campo elétrico BT-AT meio caso 2 problema éster	63
Figura 48- Análise de campo elétrico BT-AT caso 2 após correção	63
Figura 49- Análise de campo elétrico BT-AT meio caso 2 problema 1 resolvido	64
Figura 50 – Alteração e análise de campo elétrico para éster AT-REG caso 2	64
Figura 51 – Campo de aresta regulação em éster caso 2	65
Figura 52 – Análise campo elétrico AT-BT cima éster caso 3	67
Figura 53 - Análise campo elétrico AT-BT meio éster caso 3	67
Figura 54 – Análise de campo elétrico AT-REG éster caso 3	68
Figura 55 - Análise de campo elétrico Regulação-Terciário éster caso 3	68
Figura 56 – Éster Versus Óleo mineral -Fatores de segurança caso 1 BT-AT meio	71
Figura 57 - Éster Versus Óleo mineral -Fatores de segurança caso 1 BT-AT Superior	71
Figura 58 – Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM-Superior Caso 2	85
Figura 59 - Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM- Meio Caso 2	85

Figura 60 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM-Superior Caso 2	86
Figura 61 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM- Meio Caso 2	86
Figura 62 - Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM-Superior Caso 3	87
Figura 63 - Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM- Meio Caso 3	87
Figura 64 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM-Superior Caso 3	88
Figura 65 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM- Meio Caso 3	88

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Codificação dos tipos de refrigeração para óleo mineral	9
Tabela 2 – Permittividades dielétricas relativas dos materiais: óleo mineral ou éster	18
Tabela 3 – Resumo das propriedades dos fluidos isolantes	22
Tabela 4 – Definições gerais do transformador do caso 1	34
Tabela 5 – Garantias do caso 1	34
Tabela 6 - Definições gerais do transformador do caso 2	36
Tabela 7- Garantias do caso 2	37
Tabela 8 - Definições gerais do transformador do caso 3	39
Tabela 9 - Garantias do caso 3	40
Tabela 10 – Características do transformador do caso 1 para óleo mineral	44
Tabela 11 – Valores do campo elétrico na aresta -caso 1 óleo mineral	51
Tabela 12 – Fatores de segurança de deslizantes – caso 1 óleo mineral	51
Tabela 13 - Características do transformador do caso 2 para óleo mineral	52
Tabela 14 – Valores do campo elétrico na aresta caso 2 – óleo mineral	55
Tabela 15 – Fatores de segurança de deslizantes – óleo mineral caso 2	55
Tabela 16 - Características do transformador do caso 3 para óleo mineral	56
Tabela 17 - Valores do campo elétrico na aresta -caso 3 óleo mineral	59
Tabela 18 – Valores de fatores de segurança no óleo éster no caso 1	60
Tabela 19 - Valores de campos elétricos nas arestas no óleo éster caso 1	61
Tabela 20 - Valores de deslizante no óleo éster caso 1	61

Tabela 21 – Características do transformador para óleo éster caso 1	62
Tabela 22 - Comparação dos campos de aresta por enrolamento no caso 2 éster	65
Tabela 23 – Análise de deslizante em éster - caso 2	65
Tabela 24 - Características do transformador do caso 2 para óleo éster	66
Tabela 25 – Valores de campo elétrico na aresta caso 3 éster	68
Tabela 26 - Características do transformador do caso 3 para óleo éster	69
Tabela 27 - Comparação dos valores de campos elétricos Óleo mineral vs Éster caso 1	71
Tabela 28 – Comparação de deslizante óleo mineral vs éster caso 1	72
Tabela 29 – Comparação das grandezas e massas óleo mineral versus éster caso 1	73
Tabela 30 - Comparação dos valores de campos elétricos Óleo mineral vs Éster caso 2	74
Tabela 31 - Comparação de deslizante óleo mineral vs éster caso 2	74
Tabela 32 - Comparação das grandezas e massas óleo mineral versus éster caso 2	75
Tabela 33- Comparação dos valores de campos elétricos Óleo mineral vs Éster caso 3	76
Tabela 34 - Comparação das grandezas e massas óleo mineral versus éster caso 3	76

Acrónimos

AT	–	Alta Tensão
AV	–	Applied Voltage Test
BT	–	Baixa Tensão
CM	–	Circuito Magnético
DIL		<i>Design Insulation Level</i>
IVPD	–	<i>Induced Voltage with Partial discharge Measurement</i>
IVW	–	<i>Induced Voltage Withstand Test</i>
LI	–	<i>Lightning Impulse</i>
ODAF	–	Óleo dirigido, ar forçado
ODAN	–	Óleo dirigido, ar natural
ODWF	–	Óleo dirigido, água forçada
OFAF	–	Óleo forçado, ar forçado
OFAN	–	Óleo forçado, ar natural
OFWF	–	Óleo forçado, água forçada
ONAF	–	Óleo natural, ar forçado
ONAN	–	Óleo natural, ar natural
PEI	–	<i>Peak efficiency Index</i>

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O presente documento é elaborado no âmbito da unidade curricular Dissertação/Estágio do curso de Mestrado de Engenharia Eletrotécnica- Sistemas Elétricos de Energia. A importância desta unidade curricular, na opinião do autor, é imprescindível para todos os alunos uma vez que podem escolher dissertar sobre um tema e especializar-se no mesmo, preparando-se assim para o futuro e para os desafios profissionais que se avizinham.

Face ao atual desafio mundial imposto pelas alterações climáticas, a transição energética não é uma opção, é uma necessidade para atingir a neutralidade carbónica e combater o cambio climático. O consumo de energia vai continuar a aumentar nos países desenvolvidos, e vai chegar progressivamente às pessoas que ainda não têm acesso. O mundo precisa de mais energia sustentável e a nossa relação com a energia deve mudar. Esta transição energética será feita essencialmente sobre três pilares: a descarbonização, a descentralização e a digitalização [1]. Ao mesmo tempo, o World Energy Council, define a sustentabilidade energética baseando-se em três dimensões principais: segurança energética, equidade da energia, sustentabilidade ambiental dos sistemas de energia [2]. De acordo com [3], a segurança energética define-se como a “disponibilidade de energia para servir uma determinada procura, num determinado espaço de tempo, forma e local”. A equidade energética relaciona-se ao acesso da população à energia elétrica. A sustentabilidade ambiental diz respeito à produção de energia elétrica limpa, ou seja, com baixa emissão de dióxido de carbono [4]. Equilibrar esses três objetivos constitui o ‘Trilema do Sistema

Energético’, e sistemas equilibrados permitem a prosperidade e competitividade de cada país.

Face a estes retos energéticos orientados para a sustentabilidade, a utilização de fluidos alternativos nos transformadores, como ésteres naturais e sintéticos, tem vindo a ser alvo de muita investigação. Como alternativa emergente, a tecnologia da utilização do éster encontra-se num estágio em que ainda é necessário ultrapassar muitos desafios técnico-económicos e, acima de tudo, conhecer o seu comportamento tecnológico e ambiental para que se torne num produto comercial e competitivo face ao óleo mineral. Este trabalho pretende contribuir para o estudo e desenvolvimento da nova geração de transformadores imersos em éster como líquido isolante, com uma tecnologia mais sustentável que vai ao encontro dos atuais desafios da atual transição energética.

Serão estudados e comparados 3 gamas de transformadores de potência imersos a óleo mineral com a mesma gama de transformadores imersos a éster. Para cada caso, os cálculos são efetuados respeitando o mesmo Índice de Eficiência de Pico (PEI), de acordo com o Regulamento (UE) 2019/1783 da Comissão. O PEI depende da potência, das perdas em vazio e em carga do transformador.

1.2. OBJETIVOS

Neste trabalho serão analisados três transformadores de potência, com as seguintes características:

- 20 MVA, 63 kV
 - Óleo mineral
 - Éster
- 50 MVA, 132 kV
 - Óleo mineral
 - Éster
- 125 MVA, 232 kV
 - Óleo mineral
 - Éster

Esta gama de transformadores, dividida em três casos, será estudada e analisada utilizando o *software* de cálculo desenvolvido internamente na EFACEC ao longo dos anos e o *software* comercial de análise de campos elétricos utilizado na empresa. As distâncias elétricas a considerar estarão de acordo com as regras de dimensionamento de transformadores para óleo mineral e as regras de dimensionamento de transformadores para óleo éster atualmente em vigor na empresa.

Na comparação entre o éster e o óleo mineral da mesma gama, pretende-se quantificar as relações para os seguintes parâmetros:

- Dimensão total dos transformadores (área de instalação);
- Massa de transporte e massa total instalada;
- Custos de materiais e de fabrico total;
- Potência disponível em transformadores inicialmente dimensionados para imersão em óleo mineral e reavaliados posteriormente para imersão em éster;
- Vantagens qualitativas.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente documento está dividido por cinco capítulos:

No Capítulo 1 é feita uma introdução geral sobre o tema da dissertação, começando por uma contextualização do assunto e descrevendo os objetivos propostos para esta dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada uma introdução geral sobre os transformadores de potência, dando ênfase aos principais componentes, como o circuito magnético, os tipos de isolantes sólidos geralmente utilizados, os tipos de refrigeração, os ensaios dielétricos, o ensaio de aquecimento, uma descrição e comparação entre fluidos isolantes, e por fim uma breve descrição sobre o PEI.

No Capítulo 3 é apresentado o processo de cálculo e os *softwares* utilizados para a análise realizada nesta dissertação e faz uma introdução geral aos casos de estudo, apresentando os dados gerais e o corte de janela para cada caso.

No Capítulo 4 é realizada uma análise de resultados obtidos entre óleo mineral e óleo éster e no fim é apresentada uma análise comparativa e discussão de resultados.

O Capítulo 5 contém as conclusões do trabalho, em que se apresenta as principais mais valias deste estudo tanto como propostas de trabalhos futuros.

2. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA: COMPONENTES E ISOLANTES

Neste capítulo pretende-se dar as bases fundamentais para a análise que se irá desenvolver nesta dissertação. O capítulo começa com uma introdução aos transformadores de potência e logo de seguida disserta sobre os principais componentes do mesmo, como a parte ativa e não ativa e os tipos de isolamento. Para além disto, descreve os tipos de refrigeração atualmente definidos pela norma e que são utilizados em transformadores de potência, descreve os testes dielétricos mais usuais aplicados nos transformadores, apresenta também uma comparação entre o óleo mineral e éster, apresentado as suas constituições moleculares, os elementos que afetam as suas propriedades dielétricas e térmicas, uma comparação de propriedades entre eles e por fim uma descrição do PEI (*Peak Efficiency Index*).

2.1. CONSTITUIÇÃO

O transformador de potência é uma máquina estática com dois ou mais enrolamentos que, por indução eletromagnética, transforma um sistema de tensão e corrente alternada noutro sistema de tensão e corrente alternada de valor habitualmente diferentes, à mesma frequência, com o objetivo de transmitir potência elétrica. Os transformadores têm rendimentos bastante elevados. São desenhados e constituídos por vários componentes que garantem que estes funcionem eficientemente no seu período de vida útil. O dimensionamento de um transformador varia consoante a especificação dada pelo cliente e as normas que devem ser aplicadas, e todos eles são constituídos por uma parte ativa e por uma parte não ativa. A parte ativa refere-se ao núcleo e aos enrolamentos, partes que são responsáveis pela condução do fluxo magnético e corrente elétrica respetivamente. A parte não ativa, de acordo com [5], envolve a estrutura de isolamento, o sistema de refrigeração e outros elementos construtivos (cuba, regulador, proteção, entre outros). Neste documento, pretende-se apenas dissertar os principais componentes dos transformadores:

- Tipos de circuito magnético: Core;
- Isolamentos sólidos e líquidos;
- Sistemas de refrigeração.

2.1.1. CIRCUITO MAGNÉTICO DO TRANSFORMADOR

O circuito magnético, ou núcleo de um transformador, é responsável pela transferência de energia de um enrolamento para o outro de forma eficiente, providenciando um caminho de baixa relutância para o campo magnético. Inicialmente os núcleos eram formados por ferro fundido, mas foram sendo introduzidas melhorias nos materiais até serem constituídos por lâminas de chapa ferromagnética empilhadas como se verifica atualmente. Estas lâminas são placas de aço-silício de grãos orientados, muito finas, de espessura entre 0,23 e 0,30 mm, isoladas e montadas em superposição com o objetivo de evitar as correntes de circulação dentro do próprio material [6].

Relativamente às construções do núcleo, existem dois tipos que dão lugar a duas tecnologias: a tipo *Core* e a tipo *Shell*. Além de outras características que as distinguem, a principal é o caminho do fluxo magnético.

Dando ênfase à tecnologia tipo *Core*, na Figura 1 (retirado e adaptado de [6]), do lado esquerdo, observa-se o exemplo do núcleo do tipo monofásico. Os enrolamentos são cilíndricos e estão bobinados ao redor do circuito magnético. De um lado temos a alta tensão e do outro lado a baixa tensão. Consegue-se também observar o sentido do fluxo magnético. O lado da direita apresenta uma configuração trifásica, três “pernas”, em que os enrolamentos de AT (Alta Tensão) e de BT (Baixa Tensão) são cilíndricos e estão bobinados concentricamente ao redor do circuito magnético (cada fase sobre a mesma “perna” do núcleo) [6].

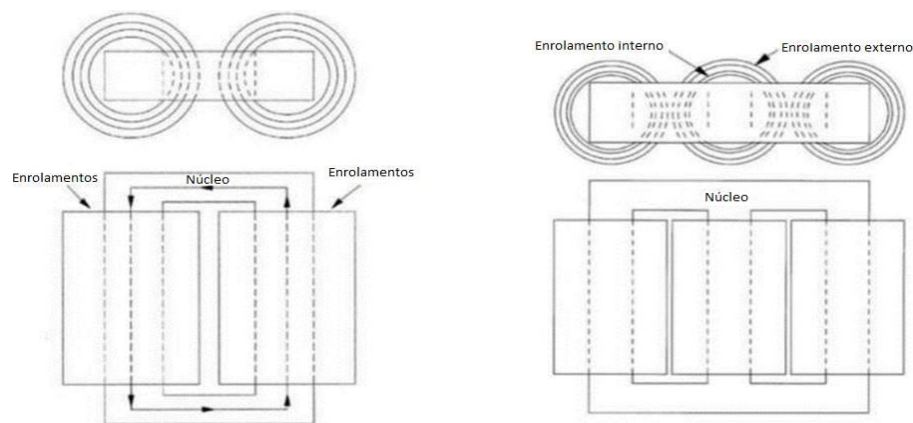


Figura 1 – Núcleo tipo *Core*

2.1.2. ISOLANTES SÓLIDOS

A estrutura isolante de um transformador de potência imerso em óleo denomina-se como estrutura isolante híbrida porque é composta por materiais sólidos (maioritariamente compostos celulósicos) e matérias líquidas (óleos isolantes). Ambos os componentes estão em constante análise e evolução devido ao impacto e importância que têm na constituição e no funcionamento do transformador. O isolamento sólido é composto por um material que está presente em volta dos condutores assim como na divisão de canais de óleo (tubos de cartão) e que por estar no interior da cuba do transformador está imerso em óleo.

Os casos abordados nesta tese utilizam isolamento sólido constituído por celulose, que é um polímero natural e vegetal e que tem um tempo de vida, como todos os restantes equipamentos do transformador. De acordo com [6], este elemento tem um processo lento de degradação que inicia quando a máquina inicia o ciclo de operação e que pode ser afetado pelo calor, oxigénio, água e ácido. Os materiais isolantes de origem celulósico para além de

possuírem boas propriedades dielétricas, apresentam também boas características de resistência mecânica capazes de suportar os esforços eletrodinâmicos se o transformador estiver bem dimensionado. Em contrapartida, este apresenta uma desvantagem, uma vez que é um material altamente higroscópico, ou seja, absorve bastante água [7].

Para uso nos transformadores de potência, existem usualmente três tipo de isolamento sólido:

- Papel Kraft;
- Cartão de alta densidade;
- Papel termo-estabilizado.

O Papel Kraft tem sido a preferência dos fabricantes de transformadores de potência para uso de isolamento sólido dos condutores. O cartão de alta densidade é um material desenvolvido para utilização específica em transformadores onde o processo construtivo termina com uma verificação de partículas metálicas. É utilizado em paralelo com o papel kraft na constituição do isolamento sólido, geralmente para o isolamento entre enrolamentos.

Esta configuração de estrutura isolante híbrida aumenta a resistência mecânica necessária para suportar os esforços eletrodinâmicos (curto-circuitos, etc). O papel termo-estabilizado é usado quando se pretende uma taxa de decomposição menor do papel isolante [8].

2.2. TIPOS DE REFRIGERAÇÃO

A refrigeração tem uma elevada importância na manutenção e fiabilidade do transformador. Se o sistema de refrigeração for mal dimensionado poderá encurtar a vida útil do transformador. Existem diferentes tipos de sistemas de refrigeração e durante o processo de desenvolvimento de cálculo do transformador é necessário definir o mais adequado.

Na Tabela 1(baseado em [9]) são apresentados os diferentes tipos de refrigeração, atualmente usados em transformadores de potência. Podem ser codificados através de quatro letras, e estes estão descritos na norma IEC 60076-2, que é a norma internacional que descreve os métodos de refrigeração, limites de temperatura, entre outros.

Tabela 1 – Codificação dos tipos de refrigeração para óleo mineral

TIPOS DE REFRIGERAÇÃO	DESCRIÇÃO
ONAN	Óleo natural, ar natural
ONAF	Óleo natural, ar forçado
OFAN	Óleo forçado, ar natural
ODAN	Óleo dirigido, ar natural
OFAF	Óleo forçado, ar forçado
ODAF	Óleo dirigido, ar forçado
OFWF	Óleo forçado, água forçada
ODWF	Óleo dirigido, água forçada

Na Tabela 1, a primeira letra dos códigos apresentados na coluna de esquerda identifica o isolante líquido que irá ser utilizado no transformador. A maior parte das vezes é utilizado a letra O, que significa que se irá utilizar um óleo mineral ou sintético com um ponto de combustão menor ou igual que 300°C. A letra K e L, que também podem ser utilizadas na primeira letra (embora não esteja representada na Tabela 1), representam óleos com combustão superior a 300°C e óleos que não se consegue medir o ponto de combustão, respetivamente. Raramente se utiliza a letra L para classificação da refrigeração. De realçar que no caso do éster, a letra usada é o K em vez de O e o L é utilizado quando se usa piraleno, askarel e clofeno.

A segunda letra representa o tipo de mecanismo a utilizar para refrigerar o óleo. O N representa que o óleo será refrigerado através de convecção natural, e o F ou D, representam uma circulação forçada e dirigida, respetivamente. A terceira letra é o meio de refrigeração externo que pode ser ar (A) ou água (W). Por fim a quarta letra representa o mecanismo de circulação para o meio de refrigeração externo que pode ser por convecção natural (N) ou forçado (F) [9].

ONAN (KNAN)

O método de refrigeração ONAN é o método mais simples e mais barato para aplicar nos transformadores (ver Figura 2 retirada e adaptada [10]). O funcionamento deste método passa por evacuar o calor gerado pelos enrolamentos através do ar. Neste caso, o óleo que circula dentro da cuba irá aquecer, devido ao calor provocado pelas perdas nos condutores e outras partes metálicas, e irá deslocar-se para a parte superior da cuba, passando para os radiadores pela condutora superior, que depois irá circular por gravidade pelo radiador e dissipar o calor no ar, sempre que a temperatura do ar seja inferior à temperatura do óleo. Finalmente, o óleo entra novamente no transformador pela conduta inferior [10].

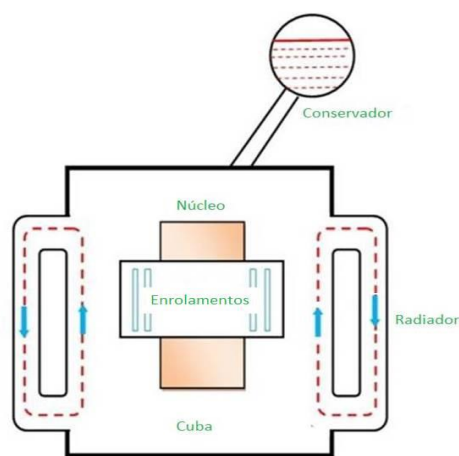


Figura 2 – Método de refrigeração ONAN/KNAN

ONAF (KNAF)

O método de refrigeração ONAF é muito semelhante ao ONAN. Enquanto no ONAN a refrigeração do óleo é pelo ar de forma natural, na situação de ar forçado, o transformador precisa de ser refrigerado mais rapidamente e mais eficientemente, colocando ventiladores por baixo dos radiadores (ver Figura 3 retirada e adaptada [10]). Nos casos em que os transformadores podem operar em ambos os regimes, deverá ser dimensionado para a situação mais exigente, que normalmente coincide com as temperaturas previstas no regime ONAN. A solução ONAF é habitualmente mais cara que a solução ONAN devido à aquisição de ventiladores [10].

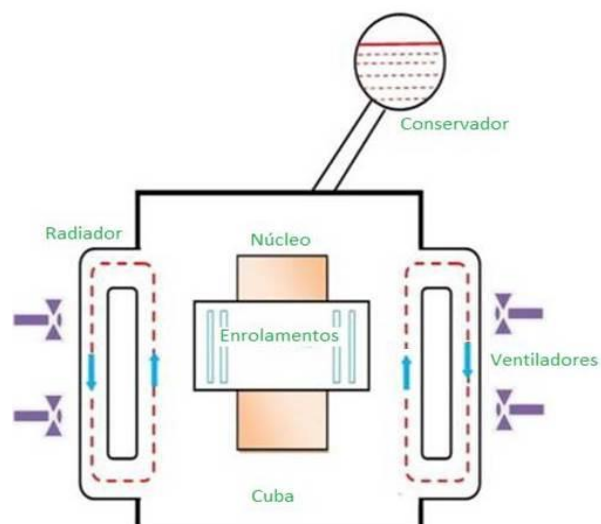


Figura 3 – Método de refrigeração ONAF/KNAF

OFAN e ODAN | OFAF e ODAF (KNAN e KDAN | KFAF KDAF)

O tipo de refrigeração OFAN, é um sistema de circulação de óleo forçado no interior do transformador junto com um sistema de ventilação por ar natural com o objetivo de dissipar o calor do óleo ao meio ambiente. O tipo de refrigeração ODAN é semelhante ao OFAN, no sentido em que o óleo é também bombeado para o interior do transformador junto com um sistema de ventilação por ar natural com o objetivo de dissipar o calor do óleo para meio ambiente, mas existe um sistema que direciona o óleo pelos caminhos preferentes. Também é possível ter este tipo de refrigeração com ar forçado, que aumenta a capacidade de refrigeração do mesmo. Na Figura 4 (retirada de [9]) e Figura 5 (retirada e adaptada de [11]) consegue-se observar o método de refrigeração OFAN-ODAN e o OFAF-ODAF, respetivamente [9] [11].

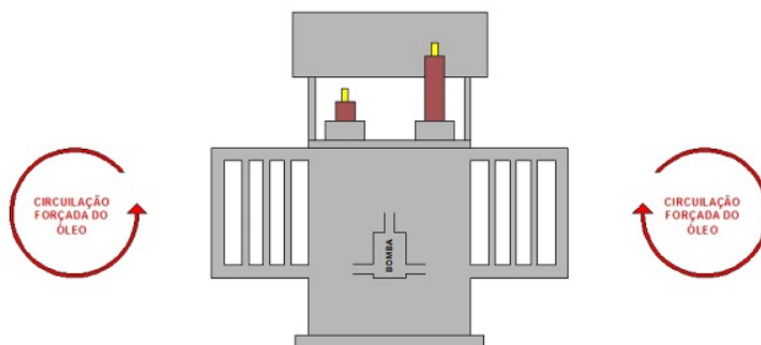


Figura 4 – Método de refrigeração OFAN-ODAN / KFAN-KDAN

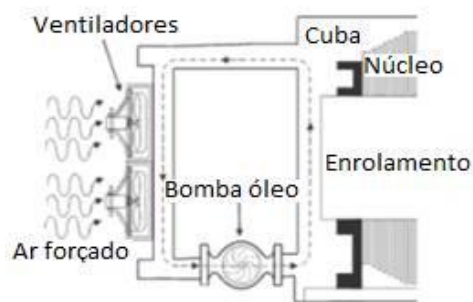


Figura 5 – Método de refrigeração OFAF-ODAF /KFAF-KDAF

OFWF – ODWF (KFWF- KDWF)

No tipo de refrigeração em óleo forçado e refrigeração externa de água forçada (ver Figura 6 retirada e adaptada de [9]), a diferença está na utilização de água em lugar de ar, num circuito isolado, garantindo assim uma melhor refrigeração do óleo uma vez que se consegue garantir temperaturas inferiores na água comparativamente ao ar [9].

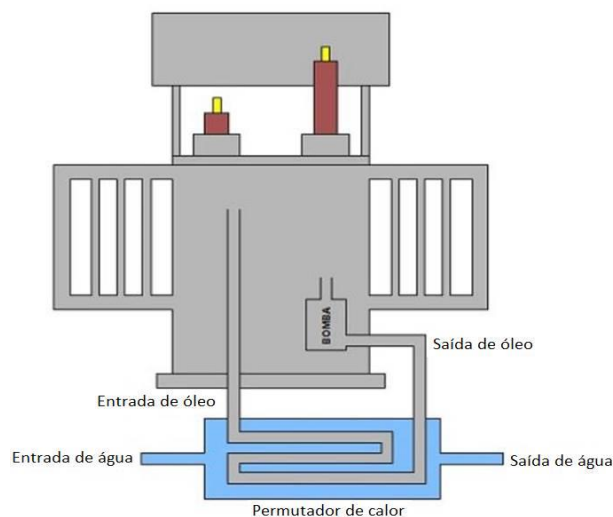


Figura 6 - Método de refrigeração OFWF- ODWF /KFWF-KDWF

2.3. ENSAIOS DIELÉTRICOS E DE AQUECIMENTO

Os ensaios que se realizam sobre os transformadores têm por objetivo verificar o cumprimento das normas e das especificações do cliente de modo a realizar o controlo de

qualidade e garantias de fiabilidade. Esta dissertação irá apenas descrever aqueles ensaios que serão abordados no trabalho a desenvolver.

2.3.1. ENSAIOS DIÉLETRICOS

Os testes ou ensaios dielétricos são obrigatoriamente realizados em transformadores de potência. Estes ensaios permitem verificar se o transformador está dimensionado adequadamente. A norma internacional IEC 60076-3 [12] define os ensaios dielétricos a realizar no transformador, assim como as tensões aplicadas e a duração dos mesmos, sendo os seguintes os mais relevantes:

- Ensaio *Lightning Impulse* (LI):

Este ensaio permite verificar se o transformador suporta valores de impulso atmosférico pico de tensão, num período curto de tempo. Na Figura 7 (retirada de [13]) pode-se observar um exemplo de forma de onda deste ensaio. Os tempos T_1 e T_2 são definidos de acordo com a norma anteriormente referida, que indica para T_1 o valor de 1,2 microssegundos e para T_2 um valor de 50 microssegundos [13].

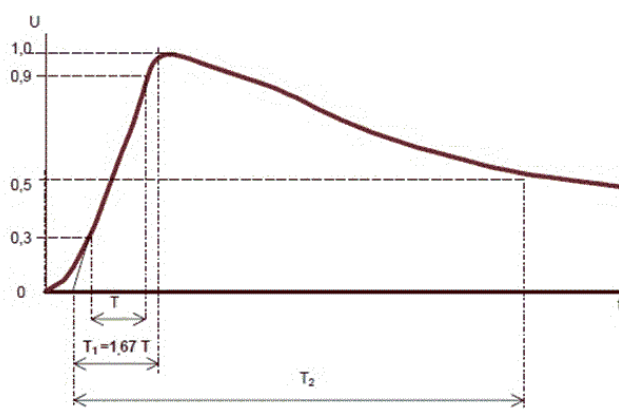


Figura 7 -Forma de onda LI

- Ensaio de tensão aplicada

Este teste permite verificar a rigidez dielétrica das estruturas isolantes e dos terminais que envolvem cada enrolamento à massa [12]

- Ensaio de tensão induzida (IVW)

Neste ensaio aplica-se uma tensão trifásica nas três fases do transformador (o terminal de neutro não tem tensão onde está ligado à massa). Serve para testar o isolamento entre espiras [12].

- Teste de tensão induzida com medição das descargas parciais (IVPD)

Este ensaio trifásico permite verificar se o transformador em funcionamento não terá descargas parciais prejudiciais ao seu funcionamento. Na Figura 8 (retirada e adaptada de [14]) pode-se observar a forma da onda incidente no ensaio de IVPD [14].

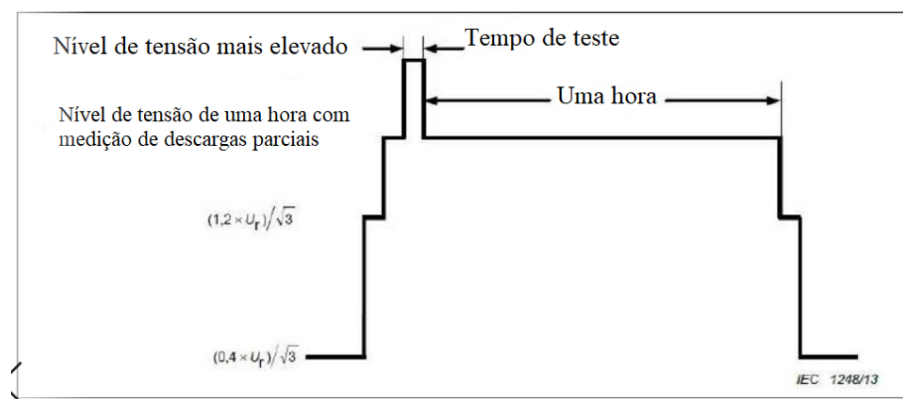


Figura 8 – Teste IVPD

Além destes testes dielétricos, existe também o ensaio monofásico SI (*Switching Impulse*) que simula eventuais operações de manobra que possam ocorrer nas linhas de tensão. Em suma, este teste permite verificar a capacidade do transformador suportar as operações de manobra que eventualmente possam ocorrer [12].

2.3.2. ENSAIO DE AQUECIMENTO

O propósito dos ensaios de aquecimento do transformador é verificar que o transformador não supere os limites de temperatura que foram garantidos ao cliente. Estes limites, são normalmente impostos pela norma ou pelo cliente e decorrem do envelhecimento que é imposto aos isolantes pela temperatura. Estes ensaios englobam a medição da temperatura do óleo superior, do óleo inferior e a medição da temperatura dos enrolamentos. A temperatura do óleo superior é a temperatura de óleo mais elevada e encontra-se na camada de óleo junto da tampa da cuba, sendo obtida através de termómetros colocados na parte

superior da cuba. A temperatura do óleo inferior é a temperatura mais baixa do transformador e mede-se na parte inferior da cuba. A medição das temperaturas médias dos enrolamentos, é obtida através da medição da resistência elétrica dos mesmos [15] . Na última década a indústria de transformadores tem introduzido sensores de temperatura de fibra ótica.

2.4. FLUIDOS ISOLANTES

Atualmente, os líquidos isolantes mais estudados/utilizados na indústria de transformadores são:

- Óleo mineral, proveniente de petróleo sendo, atualmente, o líquido isolante mais utilizado a nível mundial;
- Óleo Éster Natural, proveniente de produtos naturais;
- Óleo Éster Sintético, proveniente de ácidos e álcool.

A principal função do óleo é proporcionar um meio dielétrico que isole os condutores, mas também que atue como dissipador de calor, localizado nos enrolamentos, no núcleo e em partes metálicas estruturais do transformador. A dissipação ou evacuação de calor gerado pelas perdas, é realizada por convecção, por condução e por radiação. Na evacuação de calor, é preciso ter atenção às propriedades do óleo, como a viscosidade, inflamabilidade, densidade, o calor específico e a condutividade térmica. O ponto de inflamação é também um parâmetro importante do fluido de refrigeração relacionado com a segurança do fluido e do transformador. A circulação de óleo no interior do transformador promove a dissipação de calor por convecção forçada ou convecção natural. No caso da convecção forçada, o óleo é direcionado para os enrolamentos por ação de bombas. No caso de convecção natural, o óleo mais quente e menos denso, desloca-se para a parte superior, enquanto o óleo mais frio e mais denso movimenta-se para a parte inferior, por ação da gravidade. A condução térmica é a transferência de calor através do meio sólido (como cobre ou isolantes sólidos, por exemplo papel). Por último, a radiação térmica, é a transferência de calor que ocorre em todos os meios (incluindo vácuo), por ondas eletromagnéticas, sem necessidade de existir contacto entre corpos ou material. O fenómeno de transferência de calor por radiação tem particular importância no caso dos ganhos solares em que acontece no transformador, por exemplo quando a radiação solar incide sobre o transformador contribuindo para o seu

aquecimento. Além destas duas funções (isolante elétrico e térmico), o óleo também funciona como ferramenta de diagnóstico do estado do transformador através da sua análise química [6].

2.4.1. IMPACTE AMBIENTAL

O impacto ambiental é um assunto que não pode ser desprezado quando se fala em fluidos isolantes, pois o óleo mineral contém propriedades que podem prejudicar gravemente o meio ambiente. Apesar de a probabilidade de acontecer um derrame de óleo de um transformador de potência ser baixa, quando acontece apresenta danos catastróficos para o ambiente, sobretudo se afetar meios aquáticos. Com a crescente preocupação com o meio ambiente, a procura de alternativas ao óleo mineral tornou-se essencial uma vez que este óleo provém da refinação do petróleo. O óleo éster natural e sintético são, neste momento, dois potenciais materiais para substituir o óleo mineral pois devido às suas propriedades não prejudicam o ambiente.

2.4.2. COMPOSIÇÃO DO ÓLEO MINERAL

Existem dois tipos de óleo mineral que podem ser usados em transformadores de potência: nafténicos ou parafínicos. Na Figura 9 (adaptada de [16]) pode-se observar a composição molecular de estes dois tipos de óleo mineral.

É usado na indústria pelas suas características dielétricas e térmicas, mas atualmente é necessário adaptar a tecnologia a mudança de paradigma imposto pela transição energética.

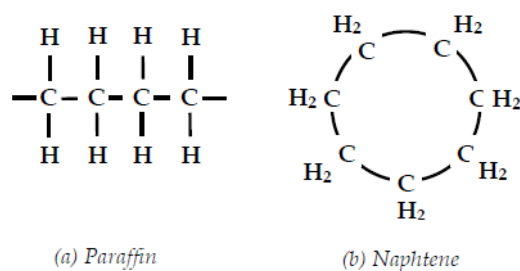


Figura 9 - Composição molecular dos tipos de óleo mineral Parafínico e Nafténico

2.4.3. COMPOSIÇÃO DO ÓLEO ÉSTER

O éster pode ser: natural ou sintético. O éster natural pode ser extraído de gorduras animais, soja, sementes, óleo de peixe, entre outros, já o éster sintético provém de ácidos e álcool [16]. Na Figura 10 (adaptado de [16]) pode-se observar a composição molecular do éster natural (a) e do éster sintético (b).

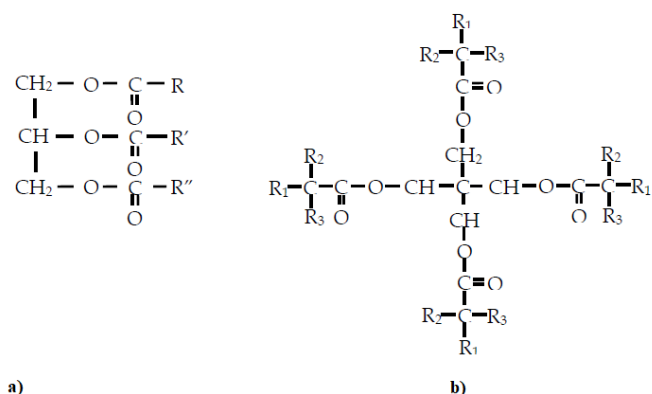


Figura 10 - Composição molecular do éster natural (a) e do versus sintético (b)

2.5. ÉSTER VERSUS ÓLEO MINERAL – PROPRIEDADES

2.5.1. PERMITIVIDADE RELATIVA

A permitividade relativa ou constante dielétrica de um meio contínuo é uma medida da permitividade estática relativa de um material e é um dos conceitos mais importantes quando se fala sobre as propriedades de um fluido isolante. Este conceito está diretamente relacionado com o valor de campo elétrico que um material isolante pode suportar. Quanto maior for esta permitividade, menor será o valor de campo elétrico no material. Como se pode observar na equação 1, a permitividade relativa de um material obtém-se através da divisão do valor da permitividade do material pela permitividade no vácuo (permitividade absoluta, ver equação 2) [17].

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = 8.8541 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2)$$

Na Tabela 2 indicam-se as permitividades relativas dos materiais passíveis de usar nos transformadores. De notar que as permitividades dos materiais com capacidade de absorção de óleo alteram em função de estar imersos em óleo mineral ou em óleo éster.

Tabela 2 – Permitividades dielétricas relativas dos materiais: óleo mineral ou éster

Material	ϵ_r (imersos em óleo mineral)	ϵ_r (imersos em éster)
Ar	1	1
Alumínio	1	1
Cartão extra duro	4.4	4.5
Cobre	1	1
Óleo Mineral	2.2	N.A
Éster	N.A	2.8
Papel	3.2	3.6
Moldado	3.5	3.5
Madeira	3.5	3.5

A permitividade do óleo éster é superior à do óleo mineral, o que significa que o valor de campo elétrico no óleo mineral é superior. No entanto, obtém-se valores de campo elétrico maiores no papel isolante quando imerso em éster do que em óleo mineral, devido a que as permitividades relativas do éster e do papel imerso em éster são mais próximas e provoca uma distribuição mais homogénea do campo elétrico [18]. Isto demonstra-se na Figura 11, retirada de [19], em que, no lado esquerdo se observa a distribuição do campo elétrico no papel imerso em éster, junto ao enrolamento (cor azul) que apresenta um valor mais elevado do que no exemplo em óleo mineral que se apresenta no lado direito. A permitividade relativa é influenciada pela temperatura, sendo que o aumento da temperatura provoca uma diminuição ligeira na permitividade no éster.

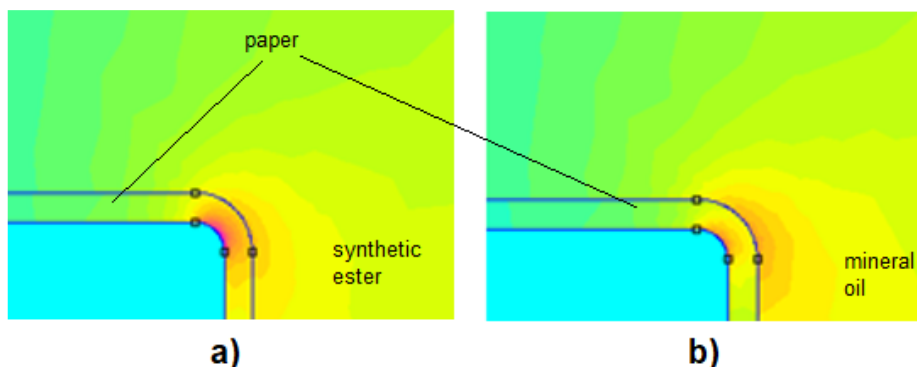


Figura 11 – Campo elétrico na aresta enrolamento-papel éster versus óleo mineral

Na Figura 12 (retirada e adaptada [7]) mostra-se um exemplo de uma estrutura isolante composta por um fluido dielétrico e barreiras de isolamento sólido, com o objetivo de melhorar a distribuição do campo elétrico no interior do transformador, ou seja, estes dois componentes em conjunto apresentam uma melhor resistência ao campo elétrico e também reforça a resistência mecânica, do que se fosse individualmente [7]. De acordo com [7], o primeiro canal entre o enrolamento e o cartão não deve ter uma distância muito pequena, e deve respeitar distâncias entre 6-10 mm. O autor [7] refere ainda que, este canal deve ser analisado com precisão.

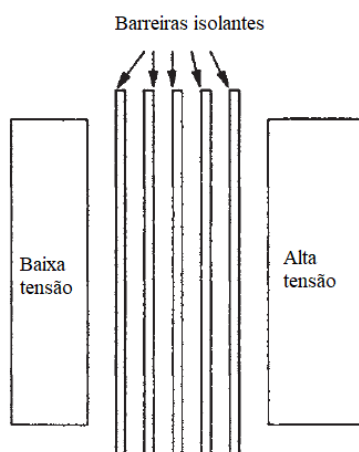


Figura 12 – Cartão entre os enrolamentos BT-AT

2.5.2. TENSÃO DISRUPTIVA

A tensão disruptiva representa a capacidade de um meio isolante suportar uma tensão até que ele não se torne condutor. O óleo mineral e óleo éster têm um valor de tensão disruptiva praticamente igual. No entanto, esta propriedade varia com a quantidade de água. Quanto

maior for a presença de água no óleo, menor será a tensão disruptiva, como mostra na Figura 13 (retirada de [20]).

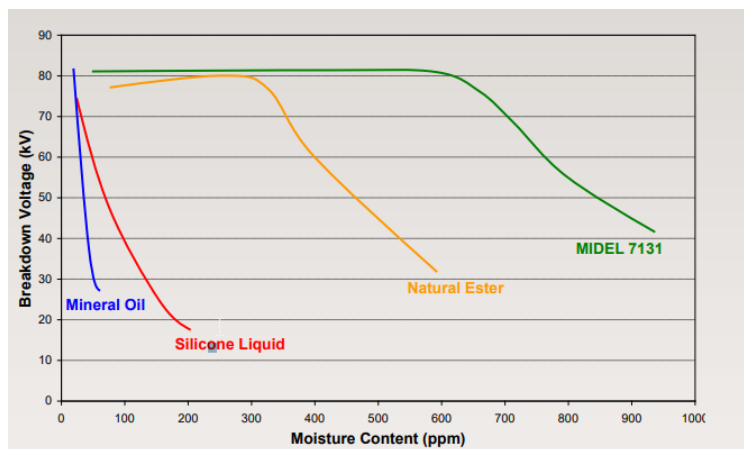


Figura 13 – Exemplo de comportamento da tensão disruptiva com água no transformador

2.5.3. PONTO DE FOGO, INFLAMAÇÃO E PONTO DE FLUIDEZ

Estas três propriedades do óleo são importantes e existe uma grande diferença entre eles.

O ponto de inflamação é a menor temperatura em que o óleo forma vapor para formar uma mistura inflamável [21].

Já o ponto de fogo, de acordo com [22], é a menor temperatura no qual o óleo atingirá uma pressão de vapor para continuar a queimar quando inflamado.

O ponto de fogo e de inflamação são maiores no éster, o que concede uma maior segurança em relação ao óleo mineral.

O ponto de fluidez (*Pour Point*) é a temperatura mínima em que o óleo deixa de fluir [21] e pode inviabilizar a dissipação do calor provocado pelas perdas. O ponto de fluidez do éster natural é menor que do éster sintético e do óleo mineral, sendo estes valores aproximadamente iguais. Na Tabela 3 pode-se observar estes valores para cada óleo.

2.5.4. VISCOCIDADE

A viscosidade está relacionada com a resistência de um fluido ao escoamento e irá afetar fortemente as temperaturas no interior do transformador. Como o éster tende a ser mais viscoso que o óleo mineral, este vai ter impacto no *design* do transformador. Para contra

reestabelecer este efeito da viscosidade os canais de óleo terão que ser aumentados, especialmente o canal de óleo entre os enrolamentos e o cartão que se apresenta após e antes do enrolamento.

2.5.5. FATOR DE DISSIPACÃO DIELÉTRICO

O fator de dissipação dielétrica representa o ângulo de perdas. Quanto maior for o ângulo maior serão as perdas no isolamento. Este indicador também nos pode dar outras informações como a contaminação do óleo, em que se apresentar valores elevados pode apresentar problemas no mesmo [21]. Por exemplo no óleo éster, este fator de dissipação é maior do que no óleo mineral. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 3.

2.5.6. PROPRIEDADES QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO

As propriedades principais que podem afetar as características do óleo são: a temperatura, quantidade de água, oxidação e acidez.

TEMPERATURA E TEOR DE ÁGUA

O papel isolante é um componente essencial para o isolamento de um transformador, e é o elemento que ajuda a determinar a vida útil do mesmo. A presença de água no interior do transformador é prejudicial, afetando assim as propriedades dielétricas do óleo [6] e do papel isolante, e acima de determinados níveis pode ser indicador de um mau funcionamento interno. De acordo com [6], ao aumentar a temperatura a taxa de degradação aumenta. Por exemplo, o éster sintético consegue absorver mais quantidade de água do que o óleo mineral, ou seja, tem uma maior capacidade de manter “seco” o papel [20].

OXIDAÇÃO E ACIDEZ

A acidez no óleo pode ser criada através da oxidação do óleo. O aumento da acidez no óleo faz com que também se prejudique a propriedade de isolamento do papel [6] e permite que a água se dissolva mais no óleo. A acidez também aumenta o processo de oxidação. Dando um exemplo, o éster natural poderá ter uma maior oxidação do que o óleo mineral, devido à sua composição química [22].

ENVELHECIMENTO DO PAPEL

Um fator de relevante importância é, também, o envelhecimento do papel de acordo com o óleo que se está a usar como isolante e refrigeração do transformador. De acordo com [23], conclui-se que o tempo de envelhecimento do papel é maior quando se usa óleo éster em relação ao do óleo mineral, sendo que o éster natural 8 vezes mais tempo a envelhecer do que o óleo mineral para papel termo-estabilizado, e 10 vezes mais tempo para o papel kraft.

2.5.7. VALORES DAS PROPRIEDADES PARA ÓLEO MINERAL, ÉSTER NATURAL E ÉSTER SINTÉTICO

Na Tabela 3 (retirado de [22] [24] [25]) apresenta-se um resumo dos valores típicos das propriedades para óleo mineral, éster natural e éster sintético.

Começando pela acidez, o óleo mineral apresenta uma acidez (óleos novos) ligeiramente mais baixa quando comparado com o éster natural e sintético e o ponto de fluidez é muito melhor no óleo mineral do que no éster natural. O óleo mineral tem um menor ponto de inflamação o que é uma desvantagem em relação ao óleo éster, em que os ésteres naturais e sintéticos apresentam praticamente o mesmo valor. O ponto de fogo é claramente superior nos óleos éster. No entanto, o óleo mineral apresenta uma menor viscosidade do que o óleo éster, o que permite ser mais eficaz na evacuação do calor gerado pelas perdas. A permitividade relativa é maior nos óleos éster o que é uma vantagem relativamente ao óleo mineral, por causa do campo elétrico. Dois pontos onde os ésteres são mais vantajosos comparativamente ao óleo mineral são: os óleos éster são biodegradáveis ao fim de 28 dias e a segurança contra o fogo é muito superior.

Tabela 3 – Resumo das propriedades dos fluidos isolantes

Propriedade	Óleo Mineral	Éster Natural	Éster Sintético – Midel 7131
Acidez (mg KOH/g)	$\leq 0,01$	$\leq 0,06$	$\leq 0,03$
Ponto de fluidez (°C)	≤ -40	≤ -10	≤ -56
Ponto de inflamação (°C)	$\geq 135 - 145$	≥ 250	≥ 250
Ponto de fogo (°C)	170	300	316

Viscosidade (cST)	≤ 12	≤ 50	35
Permitividade relativa	2,2	3,1	3,3
Fator de dissipação dielétrico	0,005 – 0,4	0,05 – 4,0	<0,008
Segurança contra o fogo	Não contém	Contém	Contém
Biodegradabilidade aos 28 dias	< 10%	>94%	Facilmente biodegradável

2.6. PEI- *PEAK EFFICIENCY INDEX*

O PEI (*Peak Efficiency Index*) é um indicador que tem que se cumprir quando se dimensiona um transformador de potência que serão utilizados nas redes de distribuição ou destinados a aplicações industriais, na união europeia. O PEI indica o valor de eficiência mínima (em %) que o transformador poderá ter de acordo com a sua potência, e garantir assim o funcionamento eficiente do transformador. Este indicador irá depender das perdas em carga e em vazio do transformador e da sua potência. Atualmente, encontra-se em vigor o cumprimento do PEI na fase nível 2. Assim, na equação 3 está representado o cálculo matemático para se obter o PEI [26].

$$PEI = 1 - \frac{2(P_0 + P_{c0} + P_{ck}(k_{PEI}))}{S_r \sqrt{\left(\frac{P_0 + P_{c0} + P_{ck}(k_{PEI})}{P_k}\right)}} \quad (3)$$

Onde:

P_0 – Perdas em vazio à tensão e frequência nominal;

P_{c0} – Potência elétrica exigida pelo sistema de refrigeração sem carga (para sistemas de refrigeração ONAN e ONAN/ONAF este valor é sempre 0);

K_{PEI} – Fator de carga em que ocorre o PEI;

$P_{ck}(k_{PEI})$ – Potência elétrica requerida pelo sistema de refrigeração para operar em regime k_{PEI} vezes a carga nominal;

P_k – Perdas em carga à corrente e frequência nominal;

S_r – Potência aparente do transformador.

3. METODOLOGIA DE CÁLCULO: APLICAÇÕES

Este capítulo apresenta a metodologia de cálculo de um transformador tipo *Core* utilizada para a análise realizada no capítulo 4 . Inicialmente é feita uma análise introdutória, dissertando de um modo geral o processo de cálculo e em seguida a apresentação e análise dos *softwares* utilizados. Por fim apresenta-se os dados gerais e os cortes de janela dos transformadores que serão alvos de estudo.

3.1. ANÁLISE INTRODUTÓRIA

Ao longo desta dissertação foram abordados vários temas importantes para a preparação da elaboração do trabalho, nomeadamente os componentes e materiais utilizados em transformadores. O fluxograma do processo de cálculo de dimensionamento de transformadores *Core*, e cujos resultados serão apresentados no Capítulo 4, é apresentado na Figura 14 e envolve as seguintes três etapas:

- Dimensionamento do corte de janela onde se verificam os requisitos do caderno de encargos e das normas aplicáveis;

- Determinação das solicitações dielétricas;
- Análise de campo elétrico no transformador.

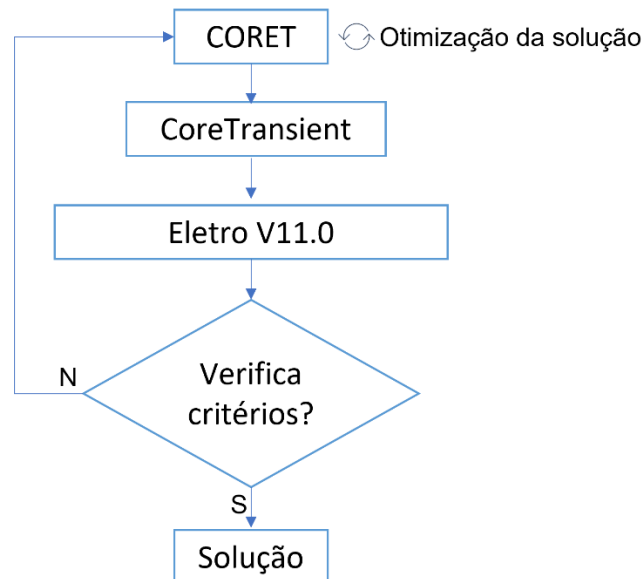


Figura 14 – Fluxograma do processo de cálculo de transformadores *Core*

O dimensionamento de um transformador começa pela definição do corte de janela, realizado utilizando o programa CORET. O corte de janela consiste em definir a composição da parte ativa (dimensionamento dos enrolamentos e do circuito magnético) e da respectiva estrutura isolante (por exemplo espessura de papel, que tipo de proteção a colocar à volta do enrolamento, entre outros). Além disso, o dimensionamento do transformador tem de respeitar o caderno de encargos do cliente, as normas e os critérios de dimensionamento da empresa. Os clientes além das características de tensão e potência também têm interesse em outras características como dimensões máximas, valores de perdas, impedâncias de curto-circuito, níveis de isolamento, aquecimentos e regimes de refrigeração. Todos estes dados vão influenciar o dimensionamento do transformador, tendo impacto nas distâncias entre enrolamentos, distâncias dos enrolamentos à cuba, tipo de enrolamentos, definição das características dos enrolamentos, entre outros.

Após encontrar no CORET a melhor solução que verifique todas as nossas regras (caderno de encargos, normas e regras internas), é necessário executar o programa CoreTransient para determinar a solicitação mais gravosas do ensaio LI. No entanto, é necessário simular as

outras solicitações dielétricas, mais precisamente a IVW, IVPD e SI, que também serão abordadas em 3.3.

As solicitações dielétricas irão depender da tensão nominal, dos materiais presentes e da configuração dos enrolamentos que foram selecionados na definição do corte da janela na etapa inicial.

Finalmente, para validar o desenho do ponto de vista elétrico, é realizada a análise de campo elétrico do transformador introduzindo, no software de análise de campo elétrico utilizado na Efacec (Eletro V11.0), a geometria do corte da janela, os materiais e as solicitações dielétricas. Esta análise é realizada em 2D através dos diferentes cortes representativos da geometria.

3.2. SOFTWARE DE CÁLCULO CORET

O principal *software* de cálculo da empresa Efacec para transformadores do tipo Core designa-se como CORET. É um programa desenvolvido em Fortran pela empresa ao longo dos anos. Esta ferramenta permite o dimensionamento elétrico, magnético, térmico, mecânico e o estudo técnico-económico dos transformadores do tipo Core, apresentando organizadamente todos os valores para o dimensionamento. Alguns exemplos dos *inputs* que o programa necessita, realçando os principais para este trabalho são: o diâmetro do circuito magnético, distâncias entre enrolamentos, tensão de cada enrolamento que constitui o transformador (BT, AT, regulação, terciário, entre outros), tipo de enrolamento e tipos de condutores e dimensões dos mesmos. Os *outputs* relevantes para avaliar o impacto da substituição do óleo mineral pelo éster são: impedância de curto-circuito (%), perdas em vazio, perdas de joule, perdas suplementares, aquecimentos e solicitações dielétricas. Adicionalmente, este programa realiza a verificação automática dos valores de entrada, reportando eventuais erros ou valores em falta. O programa CORET faz também o pós-processamento dos resultados para preparar automaticamente os dados de *input* do programa CoreTransient, que é um software desenvolvido também internamente na EFACEC para cálculo das solicitações dielétricas. O CORET calcula os parâmetros necessários para construir o circuito elétrico, como resistências e capacidades, em função do fluido dielétrico, e prepara os dados necessários para realizar o cálculo das indutâncias próprias e fatores de acoplamento mútuos, que serão os dados de *input* para o CoreTransient.

3.3. SOFTWARE DE CÁLCULO CORETRANSIENT: SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS

O estudo das solicitações dielétricas determina a diferença de potencial entre vários pontos dos enrolamentos ou entre camadas, e entre eles e a massa. Este estudo irá permitir depois aplicar as tensões necessárias na análise dos campos elétricos realizada no *software* Electro V11.0. As solicitações dielétricas a estudar para os casos de estudo são: LI (*Lightning Impulse*), AV (*Applied voltage*), SI (*Switching impulse*), IVPD e IVW.

Os valores de ensaio do LI (*Lightning Impulse*) são determinados no programa CoreTransient, onde deveremos definir as ligações elétricas para simular cada posição que o transformador pode apresentar. Os transformadores podem ter diferentes regimes de funcionamento, regulando a tensão, habitualmente do lado da alta tensão. A gama de variação da tensão é imposta pelo cliente, ou seja, esta gama permite que o enrolamento atinja um valor máximo e mínimo de tensão (em função da posição do regulador). A esses valores nominal, máximo e mínimo, dá-se o nome de tomada nominal, tomada máxima e tomada mínima, respetivamente. No entanto, na tomada nominal, dependendo da constituição do regulador, pode assumir duas posições, sendo elas a tomada nominal concordante e discordante. A posição nominal a escolher irá depender dos valores obtidos nas solicitações dielétricas, o que é necessário estudar ambos os casos. Quando se está a variar a tensão de forma decrescente, isto é, da tomada máxima até à nominal, é considerada de tomada nominal concordante. O contrário, da tomada mínima até à nominal, a tomada nominal é considerada discordante. Em suma, a única diferença entre ambas é o esquema de ligação. Na Figura 15 e Figura 16 pode-se observar de uma forma esquemática, o enrolamento de alta tensão e de regulação e as diferentes posições a estudar.

Na Figura 15, o enrolamento de alta tensão (retângulo superior) tem duas pontas, a ponta superior é numerada com um “1” e inferior é numerada com um “3”. O enrolamento inferior é o enrolamento de regulação, estando as pontas da regulação numeradas na ponta superior com um “4” e a ponta inferior por “n”, em que esse “n” é o número da ponta superior mais o número de escalões. No esquema da esquerda, correspondente com a tomada máxima, a onda incidente será aplicada na ponta 1, e a corrente irá circular até à ponta 3. Uma vez que a ponta 3 está ligada à ponta 4, a corrente irá circular pelo enrolamento de regulação até chegar ao seletor (numerado com o número 2) que está conectado à massa. A tomada

nominal concordante, a onda de choque irá ser aplicado também na ponta 1 da alta tensão, e a ponta 3 e 4 estão interligadas e o seletor da regulação (ponta 2) está ligado a ponta 4, o que significa que não irá “somar” nem “subtrair” espiras, mantendo assim a posição nominal. Na discordante o processo é semelhante, apenas que a ponta 3 irá ser conectada à ponta **n** e a ponta do seletor (2) será ligada à ponta **n**.

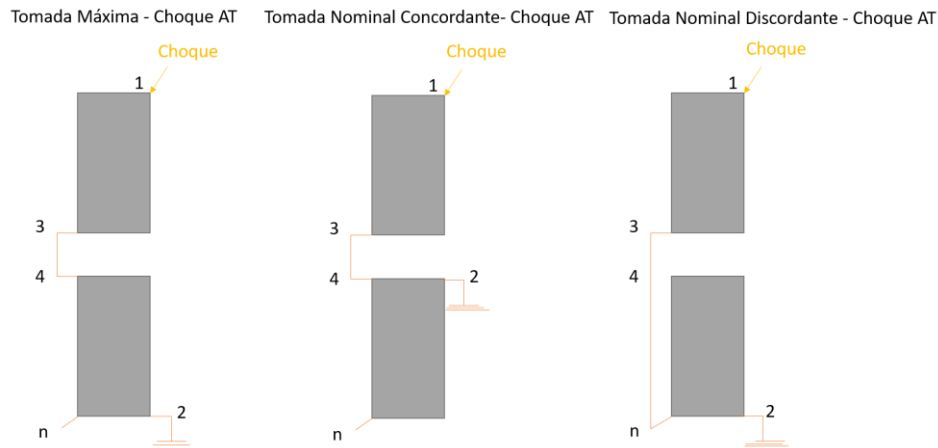


Figura 15 – Tomada Máxima e Nominal

A Figura 16, representa o esquema de ensaio na tomada mínima e de onda de choque de neutro. Seguindo o mesmo raciocínio do exemplo da tomada máxima, a onda de choque será aplicada na ponta 1 da alta tensão e a ponta 3 da alta tensão está neste caso ligada à ponta **n** da regulação (regulação por inversão). Por fim a ponta 2 (o seletor da regulação) será ligado à ponta 4. A onda de choque aplicado no neutro, aplica-se em enrolamentos em que tenham o ponto de neutro acessível (**YN**) no seletor da regulação e a ponta 3 e 4 estão conectadas e a ponta 1 da alta tensão está ligada à massa. De salientar que a onda de choque no neutro aplica-se sempre na posição máxima, de acordo com a norma IEC 60076-3 [12]. Nas simulações realizadas, o enrolamento de menor tensão (BT) está conectado à massa. Quando se executa o teste no lado de menor tensão os restantes enrolamentos estão conectados à massa.

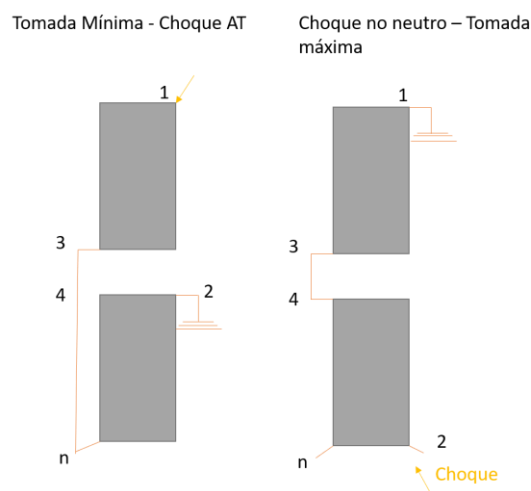


Figura 16 – Tomada Mínima e onda de choque neutro

Em relação ao ensaio AV, é aplicada uma tensão monofásica (que se encontra na norma acima referida) a todos os terminais acessíveis, linha e neutro (caso exista), o que resulta que entre pontos do mesmo enrolamento e de outra fase a diferença de potencial seja 0. Apenas entre qualquer ponto do enrolamento e a massa é que se obtém uma diferença de potencial [12].

Para realizar o ensaio SI, é aplicado uma tensão monofásica (que se encontra na norma acima referida) na alta tensão, enquanto os outros terminais de linha estão ao mesmo potencial e o terminal de neutro (caso esteja acessível) está ligado à massa. A variação da tensão ao longo do enrolamento é dada pela relação de espiras. Quando o enrolamento de baixa tensão não tenha valor associado ao ensaio de manobra, a tomada escolhida de acordo com o fabricante/cliente [12].

No ensaio de IVPD/IVW é aplicada uma tensão trifásica no enrolamento com menos espiras (normalmente BT ou terciário, caso exista) e que a variação da tensão ao longo do enrolamento é dada pela relação de espiras. O ensaio tem que ser feito com o transformador na tomada nominal (AT tem que estar na tomada nominal e a BT também, caso tenha regulação associada à mesma) [12].

De notar que os valores obtidos nas solicitações têm que ser convertidos para DIL (valor real a utilizar nestes cálculos). O fator DIL relaciona a capacidade dielétrica dos vários ensaios (LI, SI, IVPD, entre outros) da norma acima mencionada com ensaio de AV de curta duração (1 minuto a 50Hz nestes casos). Isto faz-se uma vez que por exemplo o ensaio LI é um

fenômeno transitório, este terá que ser convertido para um valor equivalente a 1 minuto de duração a 50 Hz. Assim os valores obtidos para a onda de choque (LI) terão que ser divididos por 2,5, a da aplicada (AV) por 1, a de SI por 2 e para o IVPD (pico) é de 1 e para o IVPD 0,9 (1hora).

Os valores de tensão a aplicar em cada ensaio são retirados da norma IEC 60076-3 [12].

Na Figura 17 encontra-se um exemplo de esquema de ligações elaborado definidos no CoreTransient. O enrolamento de menor tensão (BT) é enrolamento mais à esquerda, o enrolamento de alta tensão é o enrolamento do meio e o enrolamento de regulação é o enrolamento mais à direita. Os enrolamentos são divididos em células e cada célula têm 6 nós para realizar ligações. Estas células são numeradas de forma sequencial. Assim, nesse exemplo, para a tomada máxima as ligações são as seguintes:

- Célula “4 cima” e “1 baixo” – Massa;
- Célula “16 cima” – Onda de choque aplicado;
- Célula “5 baixo” – Ponta 17 cima;
- Célula “17 baixo” – Massa;

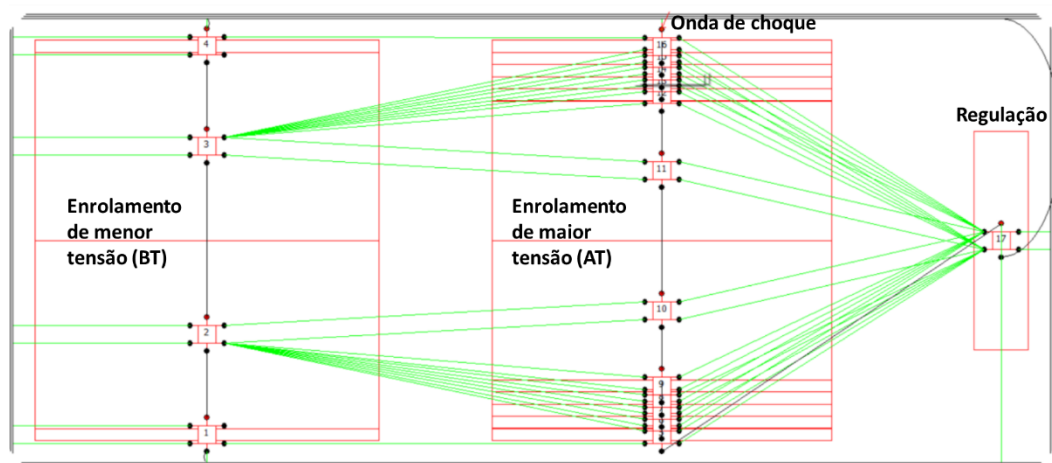


Figura 17 – Exemplo de ligações elétricas no ensaio de onda de choque na tomada máxima definidas no CoreTransient.

3.4. SOFTWARE COMERCIAL ELECTRO- ESTUDO DE CAMPO ELÉTRICO

Após a determinação das solicitações é necessário validar se os materiais suportam estas solicitações. Para isto é realizada uma análise em 2D, de diferentes cortes representativos da geometria, utilizando o programa comercial Electro.

O estudo do campo elétrico inclui o estudo do campo nas pontas dos enrolamentos (que têm tendência a concentrar as linhas de campo elétrico), entre enrolamentos (Ex: BT-AT, AT-REG, CM-BT, entre outros), e o estudo do campo elétrico na aresta e análise de deslizantes.

Para verificar que os materiais dos transformadores suportam as solicitações dielétricas mais gravosas, é necessário que os valores calculados cumpram os critérios de dimensionamento. Na zona entre enrolamentos/tubos e na análise de deslizantes o fator de segurança terá que ser maior ou igual a 1.2 para óleo mineral e 1.32 para éster, e o valor do campo elétrico máximo admissível no óleo na zona das arestas é 12 kV/mm e 10.9 kV/mm para éster. A Figura 18 apresenta um exemplo do *software* para análise de campos elétricos, em que se mostra como medir o fator de segurança em um canal de óleo através de uma *streamline*. Na Figura 19 consegue-se observar um exemplo da medição do campo elétrico aplicado na aresta selecionada, tanto como o valor do campo elétrico de acordo com a distância. A última análise a realizar é a análise de deslizantes. A estrutura isolante deve ser dimensionada adequadamente considerando a possibilidade de que uma onda se propague por um material, conhecidas como deslizantes [27]. Neste ponto irá se analisar a possibilidade de surgir deslizantes que seguem um caminho pelo tubo. Na Figura 20 consegue-se observar o fenómeno anteriormente dito. Um aspeto importante para realizar a análise de campo elétrico, é definir corretamente as permitividades dos materiais que constituem o transformador, apresentadas no subcapítulo 2.5.1 e ter o corte de janela correspondente ao transformador em análise.



Figura 18 – *Software Eletro* -Estudo de campos elétricos *streamline* exemplo

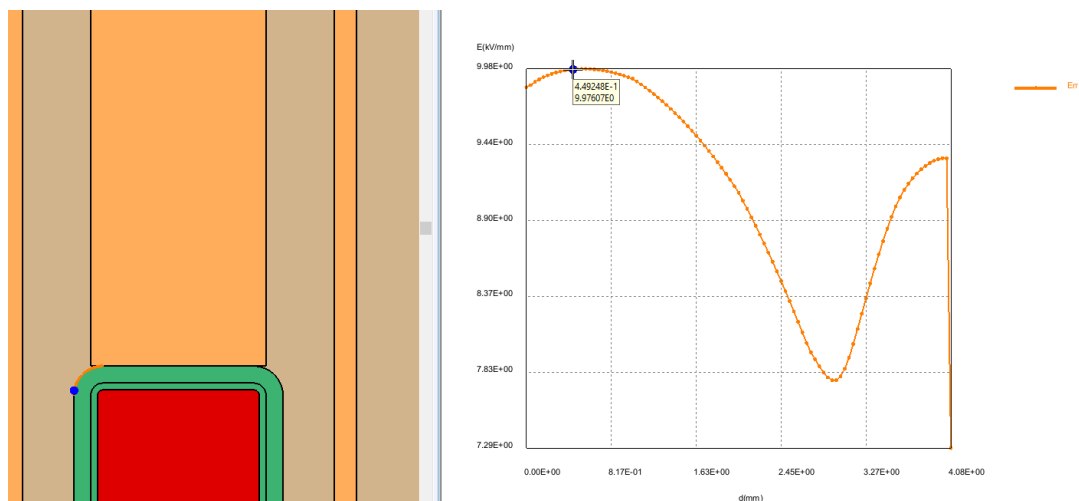


Figura 19 - *Software Eletro-* Estudo de campos elétricos campo aresta exemplo

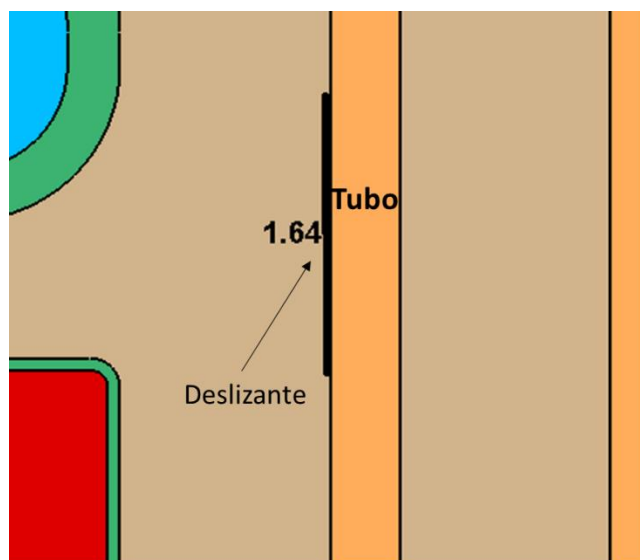


Figura 20 – Exemplo de deslizante no tubo de baixa tensão

3.5. CASOS DE ESTUDO

3.5.1. CASO 1

Na Tabela 4 encontra-se a descrição geral do transformador, assim como os valores das solicitações dielétricas (onda de choque e aplicada) para os quais deve ser dimensionado. Trata-se de um transformador de potência de 20 MVA, com uma tensão nominal 63 kV. Apresenta regulação de tensão no lado da alta tensão pelo que além do regime nominal (tomada nominal), tem mais 20 regimes de funcionamento, entre os que se destacam o regime no mínimo de espiras (tomada mínima) e no máximo de espiras (tomada máxima).

Tabela 4 – Definições gerais do transformador do caso 1

Transformador de potência trifásico tipo CORE	
Potência (MVA)	20
Tipo de ligação	Ynd11
Lado de Tensão mais alta AT-Nominal (kV)	63
Lado de Tensão mais baixa BT-Nominal (kV)	30
Regulação AT	$\pm 10 \times 1,50\%$
Tipo de refrigeração	ONAN
Onda de choque AT/BT (kVp)	325 / 170
Aplicada AT/BT (kVp)	140 / 70

Os valores garantidos são valores que a norma ou o cliente impõe quando pretendem um transformador ou que o fabricante indica e se compromete a respeitar. Quando se dimensiona um transformador de potência é necessário cumprir a esses valores (pode apresentar valores abaixo dos garantidos, mas nunca superior ao valor garantido com a tolerância). Para este transformador os valores garantidos encontram-se na Tabela 5, tanto como as suas tolerâncias.

Tabela 5 – Garantias do caso 1

Grandeza	Valor garantido (Posição nominal)	Tolerância (%)
Perdas em vazio (W)	10 400	15
Perdas em carga (W)	93 100	15

Perdas totais (W)	103 500	10
Impedância (%)	8,00	±7,5
Óleo Superior (°C)	60	0
Cobre médio (°C)	65	0
Ponto quente (°C)	78	0

Corte de janela

O corte de janela do transformador (1/4 da fase) do caso 1 é apresentado na Figura 21 , onde estão representados os enrolamentos de baixa tensão, alta tensão e regulação em que, entre si, estão colocados os devidos tubos. A importância da colocação dos tubos está explicada no subcapítulo anterior (2.5). Os enrolamentos são “revestidos” por papel isolante e há outros materiais como madeira e anéis de guarda que constituem os transformadores para dar resistência elétrica e mecânica. Neste caso em concreto, o enrolamento da AT está coberto por um moldado para proteger as arestas do enrolamento uma vez que se não tivesse este componente isolante, apresentaria valores de campo elétrico elevados na aresta.

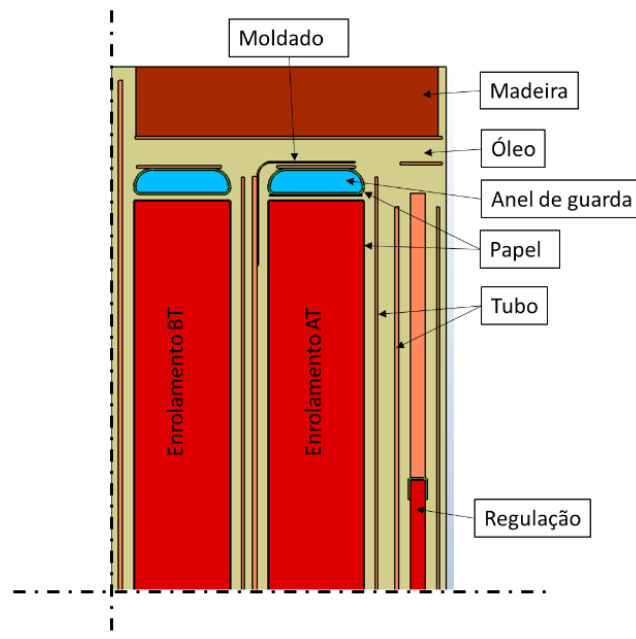


Figura 21 - Corte de janela caso 1

3.5.2. CASO 2

Na Tabela 6 pode-se observar os dados gerais do transformador para o caso 2. Este apresenta regulação de tensão no lado da alta tensão, 9 escalões com $+0,889\%$ da tensão em cada um deles, e 9 escalões com $-0,889\%$ cada escalão, pelo que além do regime nominal (tomada nominal), tem mais 18 regimes de funcionamento, entre os que se destacam o regime no mínimo de espiras (tomada mínima) e no máximo de espiras (tomada máxima). Trata-se de um transformador com maior potência e tensão, onde irá apresentar dimensões superiores ao do caso 1. Consequentemente, tem-se um valor de onda de choque e aplicada maior na alta tensão uma vez que a tensão do primário é maior, enquanto na baixa tensão manteve-se.

Tabela 6 - Definições gerais do transformador do caso 2

Transformador de potência trifásico tipo CORE	
Potência (MVA)	50 / 35
Tipo de ligação	Ynd11
Lado de tensão mais alta AT-Nominal (kV)	132

Lado de tensão mais baixa BT-Nominal (kV)	30
Regulação AT	$\pm 9 \times 0,889\%$
Tipo de refrigeração	ONAF/ONAN
Onda de choque AT/BT (kVp)	550 / 170
Aplicada AT/BT (kVp)	230 / 70
Aplicada no neutro AT (kVp)	140
SI AT (kVp)	460

Na Tabela 7 encontra-se os valores de dados garantidos para o transformador do caso 2.

Tabela 7- Garantias do caso 2

Grandeza	Valor garantido (posição nominal)	Tolerância (%)
Perdas em vazio (W)	26 300	15
Perdas em carga (W)	204 000	15
Perdas totais (W)	230 300	10
Impedância (%)	10,00	$\pm 7,5$
Óleo Superior (°C)	50	0
Cobre médio (°C)	55	0
Ponto quente (°C)	68	0

Corte de janela

O corte da janela do transformador do caso 2 é representado na Figura 22 (1/4 da fase). Apresenta o mesmo tipo de elementos construtivos que o caso 1, mas como a tensão de

serviço é maior, o nível de tensão de isolamento é maior, o que acaba por originar um maior valor de solicitação e consequentemente uma maior distância entre enrolamentos, o que leva a adição de mais tubos, e assim também criará mais canais de óleo.

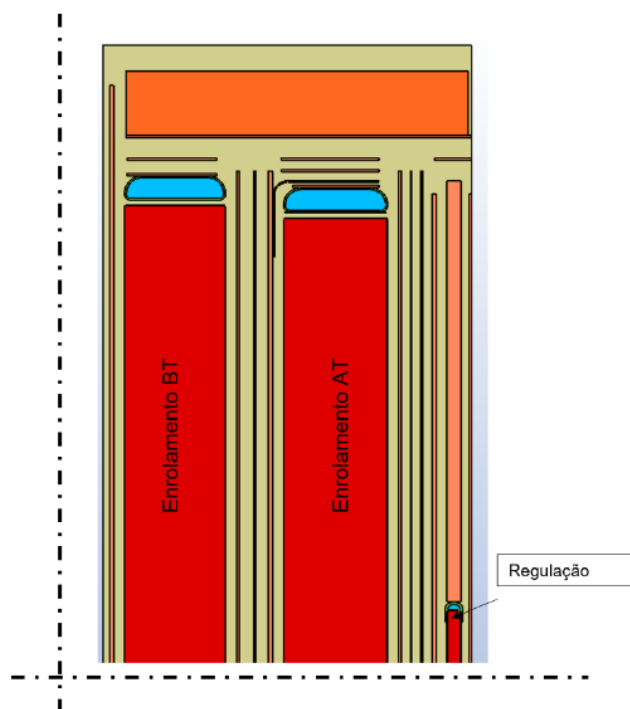


Figura 22 – Corte de janela caso 2

3.5.3. CASO 3

Por fim, tem-se um transformador de potência Core com umas dimensões maiores, uma vez que a tensão e a potência são relativamente maiores em relação aos dois casos anteriores. Além disso, este transformador conta com a presença de um terciário, além do enrolamento de alta tensão, baixa tensão e regulação. Apresenta regulação de tensão no lado da alta tensão, 10 escalões (-) com +1,207% da tensão cada um deles, e 6 (+) escalões com -1,207% cada escalão, pelo que além do regime nominal (tomada nominal), tem mais 17 regimes de funcionamento, entre os que se destacam o regime no mínimo de espiras (tomada mínima) e no máximo de espiras (tomada máxima). Neste caso também teremos que considerar no dimensionamento os valores de onda de choque e aplicada correspondentes ao terciário. Na Tabela 8 encontra-se os dados gerais do transformador para este caso.

Tabela 8 - Definições gerais do transformador do caso 3

Transformador de potência trifásico tipo CORE	
Potência (MVA)	125/100
Tipo de ligação	Ynyn0+d11
Lado de tensão mais alta AT-Nominal (kV)	232
Lado de tensão mais baixa BT-Nominal (kV)	66
Potência terciário (MVA)	32 / 40
Tensão nominal – Terciário (kV)	13,80
Regulação AT	$(+6; -10) \times 1,207\%$
Tipo de refrigeração	ONAF/ONAN
Onda de choque AT/BT /Terciário (kVp)	850 / 325 /125
Aplicada AT/BT /Terciário (kVp)	360 / 140 /50
Aplicada no neutro AT/ BT (kVp)	140
SI AT (kVp)	700

Na Tabela 9 consegue-se observar os dados garantidos para este transformador. De realçar as diferenças entre este e os outros transformadores, neste caso será necessário garantir perdas no terciário e impedâncias.

Tabela 9 - Garantias do caso 3

Grandeza Elétrica	Posição	Valor garantido	Tolerância (%)
Perdas em vazio (W)	Nominal	40 900	15
Perdas em carga (AT-BT) (W)	Nominal	314 000	10
Perdas em carga (AT-Terciário) (W)	Mínima	180 000	10
Impedância (AT-BT) (%)	Nominal	15,00	$\pm 7,5$
Impedância (AT-Terciário) (%)	Nominal	>5	-
Impedância (BT-T) (%)	Nominal	>5	-
Óleo Superior (°C)	-	60	0
Cobre médio (°C)	-	65	0
Ponto quente (°C)	-	78	0

Corte de janela

Como se pode observar no corte da janela na Figura 23 (1/4 da fase), este transformador tem quatro enrolamentos, o enrolamento de alta tensão mais regulação, baixa tensão e o terciário. Este transformador já tem tensões bastantes mais elevadas, o que requer ainda uma maior distância entre enrolamentos e uma maior atenção acerca dos materiais que envolvem o transformador de modo a proteger os enrolamentos. Por exemplo, o enrolamento da alta tensão precisa três moldados. Além disso, o terciário irá ficar ao lado da regulação (há casos em que este enrolamento poderá ficar mesmo ao lado do enrolamento BT), e irá existir também um moldado para proteger esses enrolamentos. O importante reter é que quanto maior a tensão do transformador, maior será a sua complexidade.

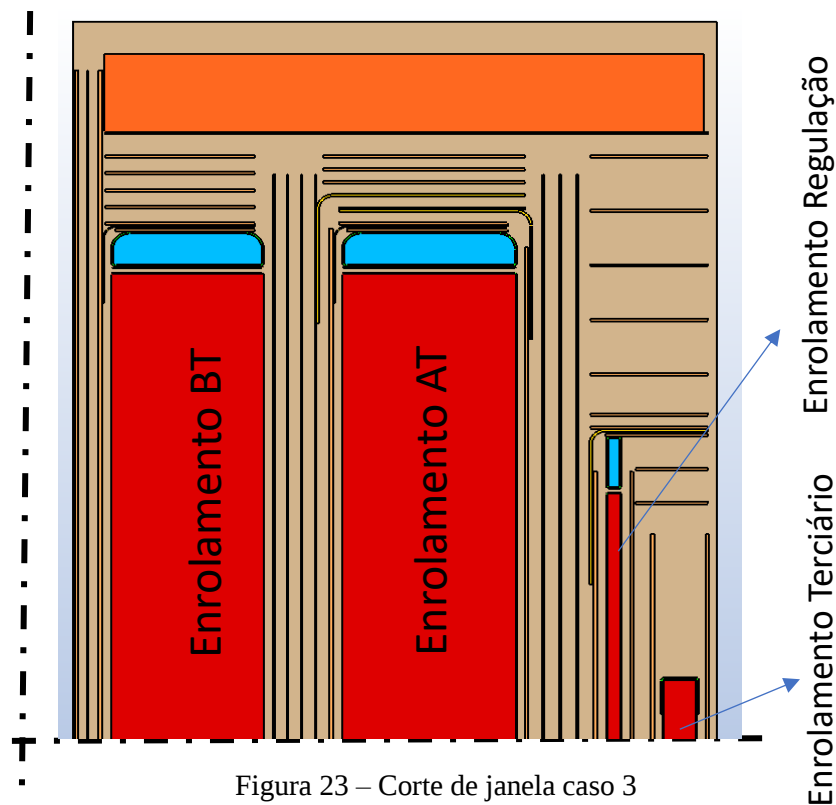


Figura 23 – Corte de janela caso 3

4. ANÁLISE E RESULTADOS: ÓLEO MINERAL VERSUS ÉSTER

Neste capítulo inicia-se a principal análise da dissertação. Primeiro são apresentados os resultados obtidos em cada caso, para óleo mineral e para éster, e no fim encontra-se uma análise comparativa e discussão de resultados.

4.1. CASO 1 – ÓLEO MINERAL

4.1.1. MASSAS E GRANDEZAS ELÉTRICAS

O transformador do caso 1 tem uma potência de 20 MVA e uma tensão na alta tensão de 63kV e na baixa tensão de 30 kV, os dados foram apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5 os dados das garantias. Seguindo o fluxograma de cálculo apresentado na Figura 14, o primeiro passo foi encontrar a solução para óleo mineral, utilizando o CORET, resultando nos valores apresentados na Tabela 10, nomeadamente a massa total de instalação, a de transporte a

dimensão do transformador, as respectivas grandezas elétricas na posição nominal e os aquecimentos obtidos.

Tabela 10 – Características do transformador do caso 1 para óleo mineral

Características	Valor
Massa total de instalação (kg)	52 774
Massa total de transporte (kg)	38 108
Massa do líquido (kg)	8 122
Dimensão do transformador (C x Lx A mm)	4608 x 3443 x 4168
Impedância de curto-circuito nominal (U_{cc} %)	8,31
Perdas em vazio (W)	10 590
Perdas em carga - Nominal (W)	93 131
Perdas totais – Nominal (W)	103 721
PEI (%)	99,6857
Óleo Superior (°C)	54
Cobre médio(°C)	65
Ponto quente (°C)	78

4.1.2. SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS

O seguinte passo apresentado no fluxograma de cálculo (Figura 14) é calcular as solicitações dielétricas para todos os casos necessários (simulações e regimes de funcionamento) para determinar os valores mais gravosos. Neste caso foram realizadas as seguintes simulações:

- Simulação de onda de choque na AT nas seguintes posições: Tomada nominal concordante, tomada nominal discordante, tomada máxima, tomada mínima e choque de neutro;

- Simulação de onda de choque na BT;
- Simulação da aplicada nos enrolamentos BT e AT;
- Simulação de ensaio IVPD.

Na Figura 24 apresentam-se os valores das solicitações dielétricas mais gravosas obtidas para este transformador. De realçar que para todos os casos, os valores das solicitações dielétricas obtidos em óleo mineral serão considerados também para éster.

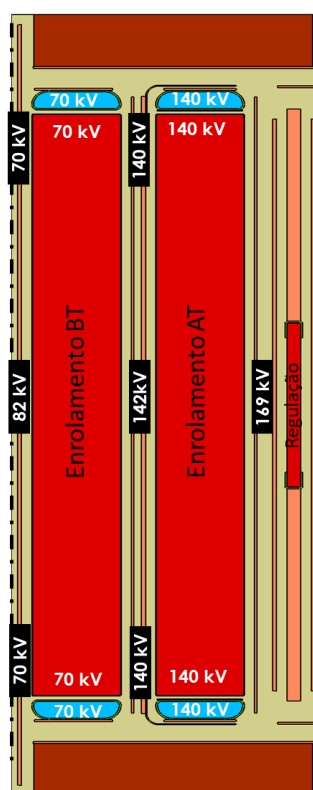


Figura 24 – Solicitações dielétricas Caso 1- Óleo mineral

4.1.3. ESTUDO DO CAMPO ELÉTRICO

Na Figura 25 indicam-se as áreas onde se irá a estudar o campo elétrico. Essas zonas estão assinaladas cada uma com a sua cor, e marcadas devidamente com um X para conseguir fazer a correspondência com a legenda.

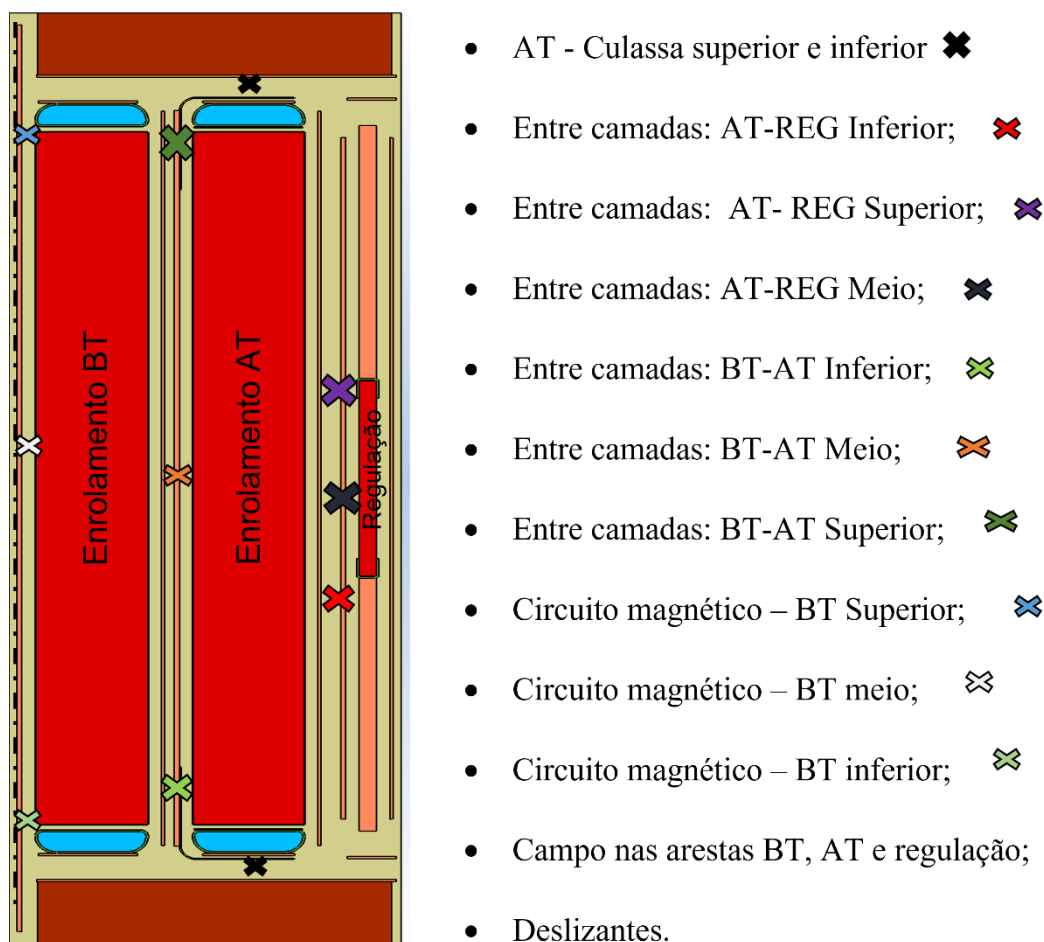


Figura 25 – Áreas de interesse para análise de campo elétrico para o caso 1

Na Figura 26 e na Figura 27 conseguem-se observar as *streamlines* e os fatores de segurança para óleo mineral, na área das culassas superior e inferior, cada uma definida com 140 kV. Nestas áreas, verificou-se que os valores mínimos de fator de segurança foi 1,77 para a culassa superior e 1,67 para a culassa inferior, superiores ou igual a 1,20 que é o limite inferior da Efacec. Pode-se concluir que que as distâncias mínimas impostas pela norma da EFACEC verificam os critérios de dimensionamento. De notar que na zona entre o enrolamento e o moldado normalmente encontramos valores de segurança superiores uma vez que o moldado protege o enrolamento, normalmente as pontas de aresta (onde existe alta concentração de campo elétrico).

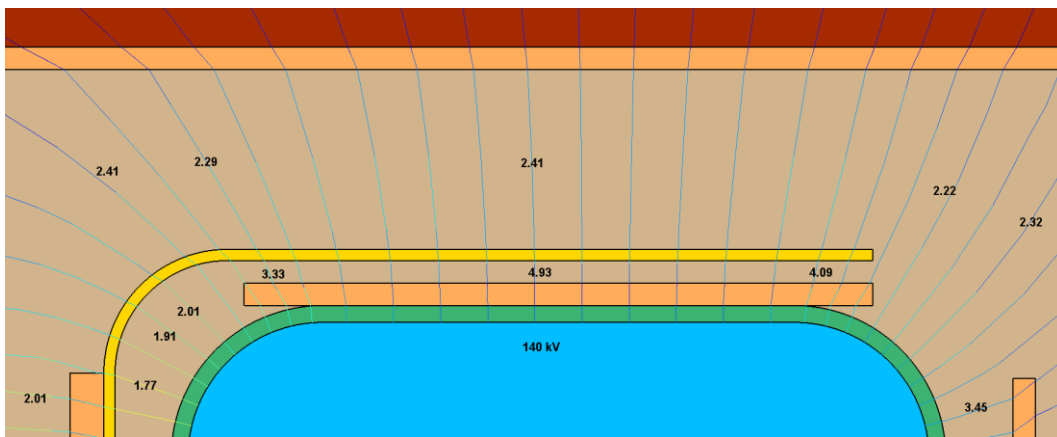


Figura 26 - Estudo campo elétrico culassa superior – Óleo Mineral

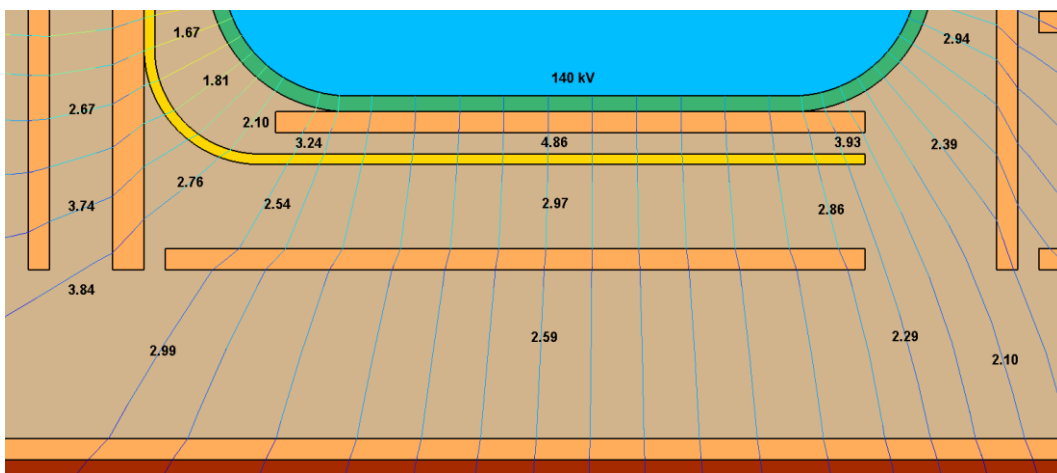


Figura 27 – Estudo campo elétrico culassa inferior -Óleo Mineral

Na Figura 28, Figura 29 e Figura 30 conseguem-se observar as *streamlines* e os fatores de segurança entre a AT e regulação na zona inferior, meio e superior, respetivamente. Entre a AT e regulação aplicou-se a tensão de 169 kV no enrolamento e a regulação à massa, e nas figuras consegue-se verificar os vários níveis de segurança do campo elétrico entre enrolamentos, canais de óleo e tubos. Os valores mínimos obtidos foram de 1,38 e 1,34 cumprindo com os requisitos de dimensionamento (fator de segurança sempre igual ou superior a 1,20).

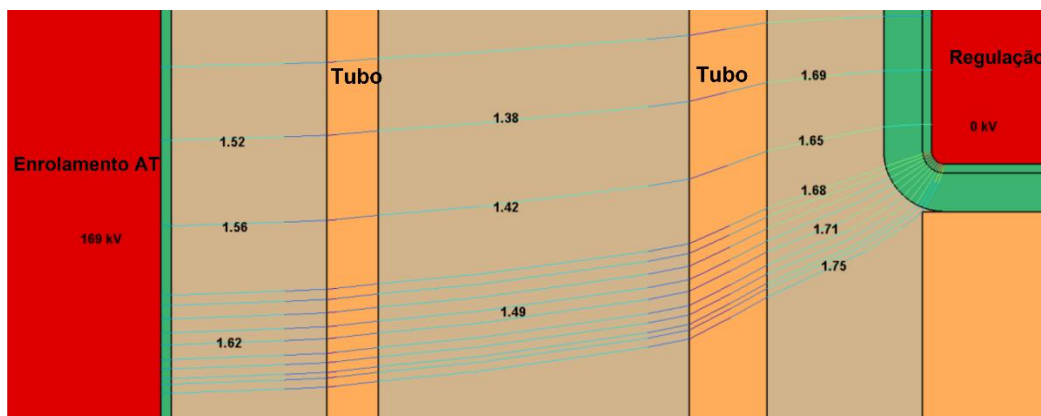


Figura 28 – Estudo campo elétrico entre AT e regulação inferior -Óleo Mineral

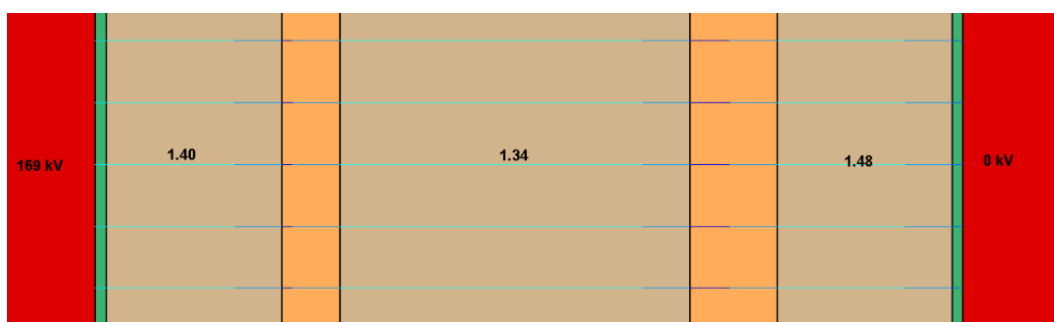


Figura 29 – Estudo campo elétrico entre AT e regulação meio – Óleo Mineral

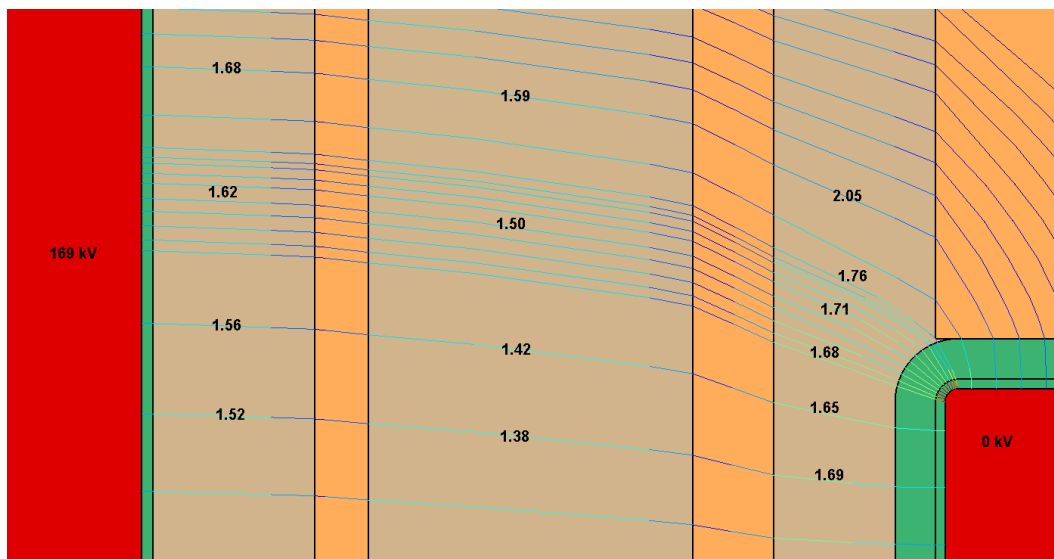


Figura 30 – Estudo entre AT e regulação superior – Óleo mineral

A análise entre camadas (AT-BT) e realizada na Figura 31, na Figura 32 e na Figura 33 e pode-se observar as *streamlines* e os fatores de segurança obtidos entre camadas AT-BT inferior, meio e superior. Nota-se que a tensão aplicar agora é 140 kV entre a parte superior

e inferior, mas no meio nota-se que nas solicitações deu uma tensão mais gravosa, aplicando assim os 142 kV.

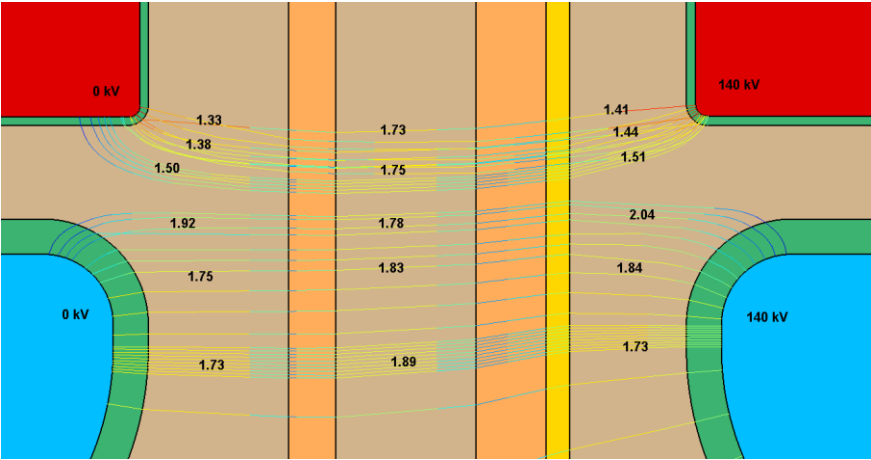


Figura 31 – BT-AT inferior – Óleo Mineral

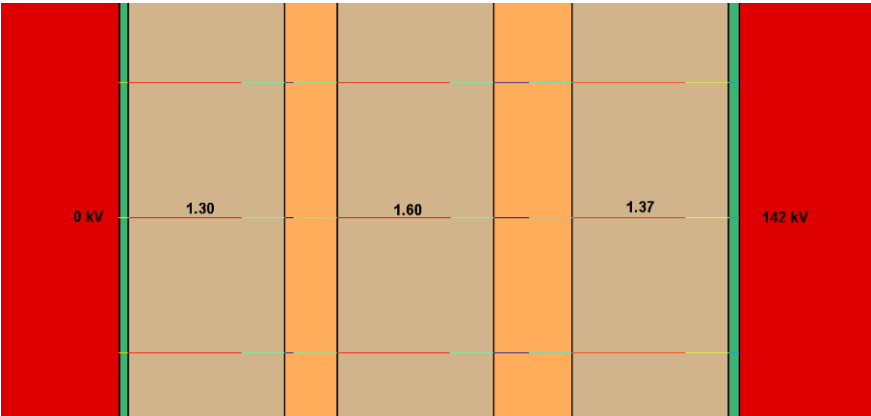


Figura 32 – BT-AT meio – Óleo Mineral

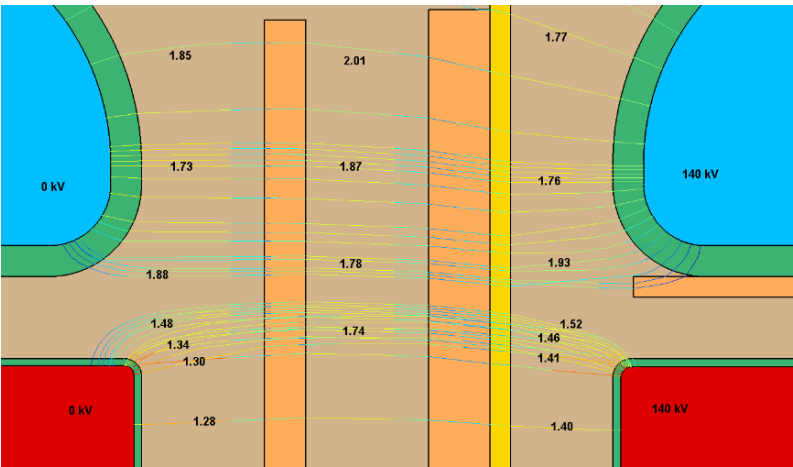


Figura 33 – BT -AT superior– Óleo Mineral

Entre o CM (Circuito magnético) e o enrolamento BT (enrolamento de menor tensão), apresentam-se na Figura 34, Figura 35 e Figura 36 as *streamlines* e os fatores de segurança no inferior, meio e superior, respectivamente. Os valores mínimos encontrados são 1,54 e 1,22, verificando que todos os critérios são cumpridos.

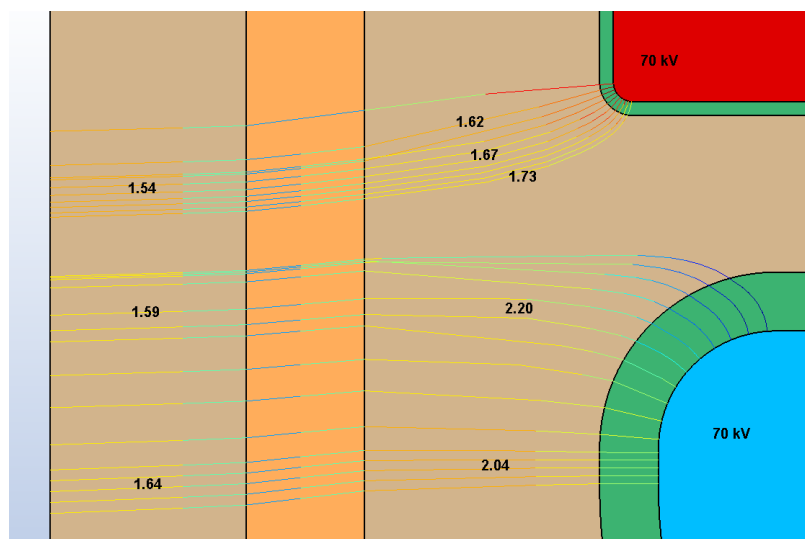


Figura 34 – Campo elétrico entre CM-BT inferior -Óleo Mineral

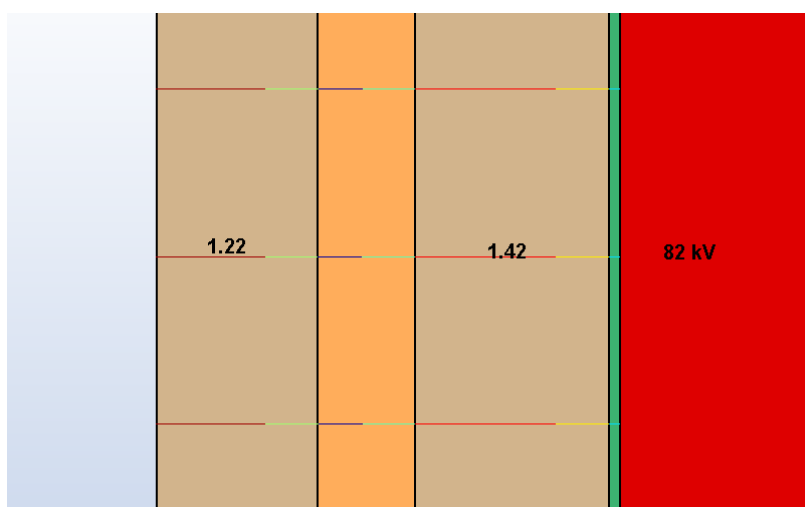


Figura 35 – Campo elétrico entre CM-BT meio – Óleo Mineral

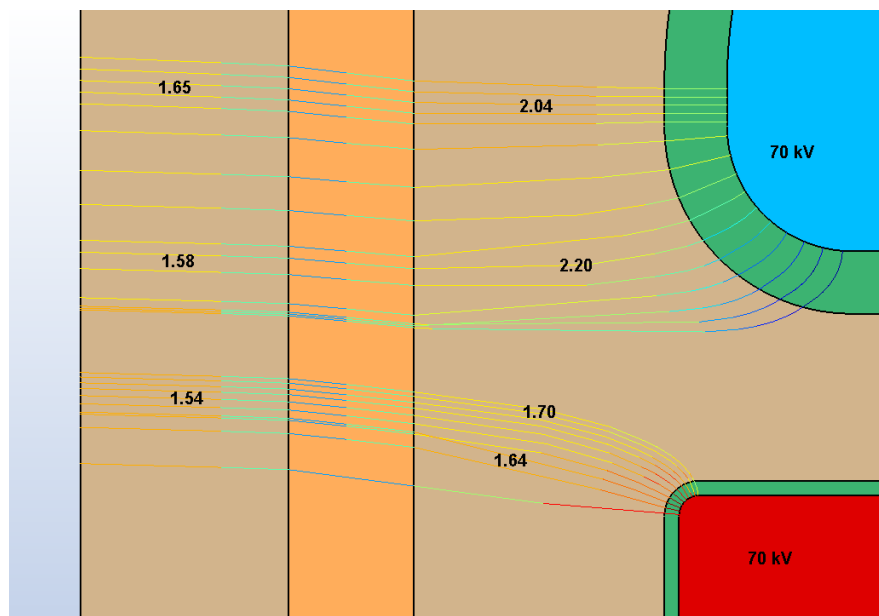


Figura 36 – Campo elétrico entre CM-BT superior – Óleo Mineral

Para análise dos campos de aresta dos enrolamentos, na Tabela 11 encontra-se os valores obtidos dos valores de aresta para óleo mineral. De notar que todos os valores obtidos, cumprem a regra de dimensionamento ($<12 \text{ kV/mm}$). Na Tabela 12 encontra-se os valores dos fatores de segurança resultante da análise das deslizantes em que todos são superiores a 1,20, o que cumpre as regras de dimensionamento.

Tabela 11 – Valores do campo elétrico na aresta -caso 1 óleo mineral

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)		
AT	BT	REG
9,68	10,30	8,65

Tabela 12 – Fatores de segurança de deslizantes – caso 1 óleo mineral

Fatores de Segurança resultantes da Análise de Deslizantes		
BT -Tubo	AT - Tubo	REG -Tubo
1,64	2,15	1,61

4.2. CASO 2 – ÓLEO MINERAL

4.2.1. MASSAS E GRANDEZAS ELÉTRICAS

Para este caso de estudo tem -se o transformador com uma potência de 50 MVA e tensão no primário de 132 kV. Trata-se de um transformador com maiores dimensões visto que a potência e a tensão são maiores. Na Tabela 13 consegue-se observar as principais características que foram alvo de estudo neste caso (as grandezas elétricas analisadas são na posição nominal). De notar que, como a tensão é maior o *Lightning Impulse* tem maior valor de tensão de pico. No enrolamento de baixa tensão, como se tem a mesma tensão do que o anterior (30kV), o valor de pico é igual. Além disso, já se consegue observar que as massas totais são maiores do que no caso anterior, assim como as dimensões e perdas. De realçar que a constituição deste transformador é semelhante ao anterior, no entanto, apresenta maiores grandezas elétricas (potência e tensão).

Tabela 13 - Características do transformador do caso 2 para óleo mineral

Características	Valor
Massa total de instalação (kg)	92 239
Massa total de transporte (kg)	64 288
Massa do líquido (kg)	12 990
Dimensão do transformador (C x L x A mm)	5309 x 3496 x 4639
Impedância de curto-circuito nominal (Ucc %)	9,99
Perdas em vazio (P0)	20 306
Perdas em carga -Nominal(W)	204 029
Perdas totais -Nominal (W)	224 335
PEI (%)	99,7413
Óleo Superior (°C) – ONAF /ONAN	39 / 38
Cobre médio (°C) – ONAF /ONAN	53 / 48

Ponto quente (°C) – ONAF /ONAN	67 / 58
--------------------------------	---------

4.2.2. SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS

Na Figura 37 conseguem-se observar os valores obtidos nas solicitações dielétricas. De realçar que o método utilizado para obter estes valores de solicitações dielétricas é semelhante ao caso anterior, no entanto, neste caso também se irá estudar o ensaio SI. Também de notar que os valores entre os enrolamentos de baixa tensão e alta tensão são maiores, tanto como entre o enrolamento de alta tensão e a regulação, o que vai precisar de uma maior atenção de análise no campo elétrico.

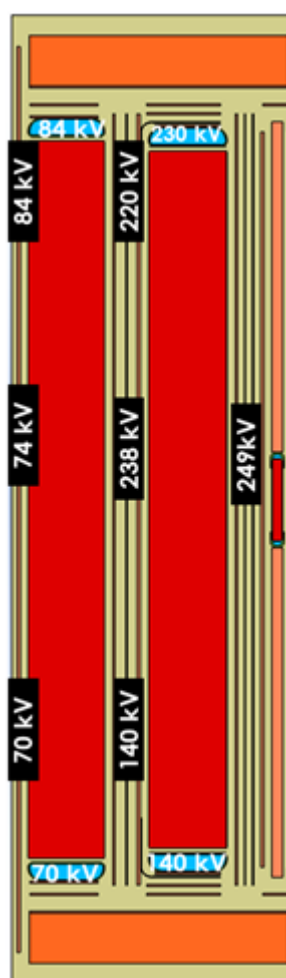


Figura 37 - Solicitações dielétricas Caso 2

4.2.3. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO

Começando a análise do campo elétrico entre o enrolamento de baixa tensão e alta tensão, na Figura 38 e na Figura 39 consegue-se observar os fatores de segurança que se obteve para a análise de campo elétrico entre a BT e AT em óleo mineral. Os valores de fatores de segurança estão dentro dos valores aceitáveis ($\geq 1,20$). As restantes análises de campo elétrico (BT-Superior e BT meio- CM) encontram-se em anexo A.

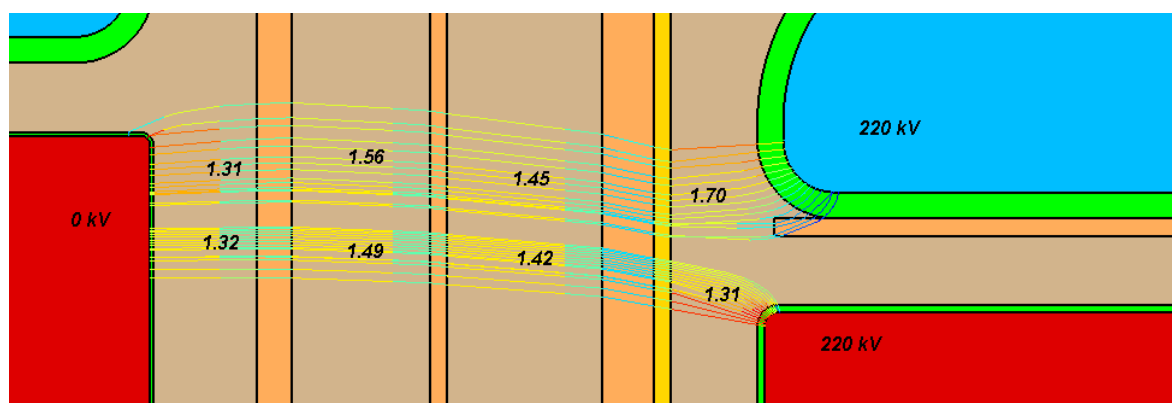


Figura 38 – Análise de campo elétrico BT-AT- óleo mineral caso 2



Figura 39 - Análise de campo elétrico BT-AT meio – óleo mineral caso 2

Na Figura 40 consegue-se observar os fatores de segurança obtidos entre o enrolamento de alta tensão e regulação, onde se verifica que se cumpre o critério de dimensionamento (fator $\geq 1,20$).

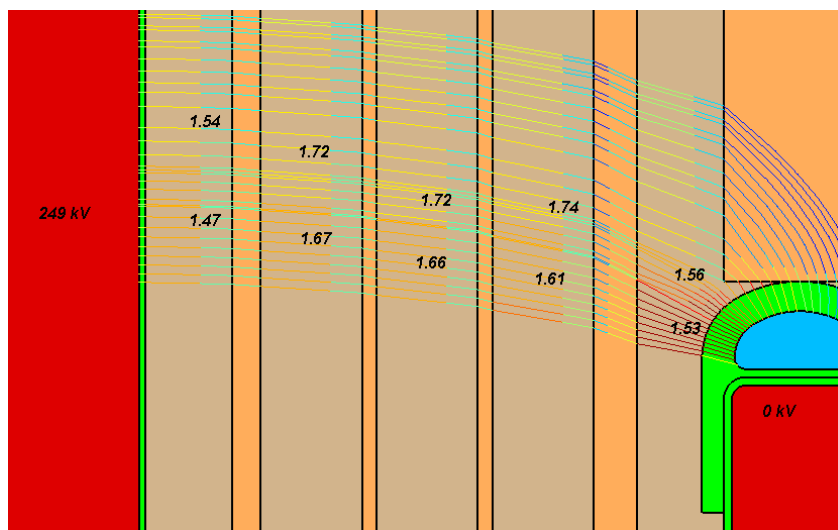


Figura 40 – Análise de campo elétrico entre AT-REG caso 2 – óleo mineral

Em relação à análise dos campos de aresta e de deslizantes, na Tabela 14 e na Tabela 15 encontram-se os valores obtidos e fatores de segurança, respectivamente. Nos valores de campo de aresta, o maior valor obtido foi na BT com 11,0 kV/mm, mas ainda dentro dos critérios. Nos valores das deslizantes, a regulação ainda apresenta um fator de segurança válido, no entanto, próximo do limite (1,20).

Tabela 14 – Valores do campo elétrico na aresta caso 2 – óleo mineral

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)		
AT	BT	REG
10,80	11,00	8,96

Tabela 15 – Fatores de segurança de deslizantes – óleo mineral caso 2

Fatores de Segurança resultantes da Análise de Deslizantes	
Enrolamento -tubo	Óleo Mineral
BT	1,62
Regulação	1,22
AT	1,52

4.3. CASO 3 – ÓLEO MINERAL

4.3.1. MASSAS E GRANDEZAS ELÉTRICAS

O caso 3, é um transformador com uma potência de 125 MVA e 232 kV. A diferença em relação aos outros é que apresenta um enrolamento terciário, com uma potência de 40 MVA. Na Tabela 16 são apresentadas as principais características deste transformador em óleo mineral. Neste caso, as perdas neste transformador são muito maiores do que os anteriores. O valor mínimo de PEI imposto pela norma para este caso é de 99,780%. Os valores das grandezas elétricas estão calculados para a posição nominal e mínima (perdas em carga AT-Terciário).

Tabela 16 - Características do transformador do caso 3 para óleo mineral

Características	Valor
Massa total de instalação (kg)	230 919
Massa total de transporte (kg)	150 421
Massa do líquido (kg)	31 565
Dimensão do transformador (C x L x A mm)	7600 x 4613 x 5895
Impedância de curto-circuito AT-BT nominal (U _{cc} %)	14,96
Impedância de curto-circuito AT-Terciário nominal (U _{cc} %)	11,35
Impedância de curto-circuito BT-Terciário nominal (U _{cc} %)	18,36
Perdas em vazio (P ₀)	40 897
Perdas em carga AT-BT - Nominal(W)	320 176
Perdas em carga AT-Terciário -Mínima (W)	180 348
Perdas em carga BT-Terciário – Nominal (W)	169 050

PEI (%)	99,8167
Oléo Superior (°C) – ONAF /ONAN	49 / 54
Cobre médio(°C) – ONAF /ONAN	59 / 61
Ponto quente (°C) – ONAF /ONAN	75 / 75

4.3.2. SOLICITAÇÕES DIELÉTRICAS

Na Figura 41 pode-se observar os valores obtidos das solicitações. De realçar os valores mais importantes para análise, que são o valor de tensão entre o enrolamento de baixa tensão e alta tensão parte superior (340 kV) e meio (336 kV), entre o enrolamento de alta tensão e regulação com valores 367 kV e entre o enrolamento regulação e terciário com um valor de 176 kV. Para este caso, os ensaios a realizar serão iguais ao caso 2.

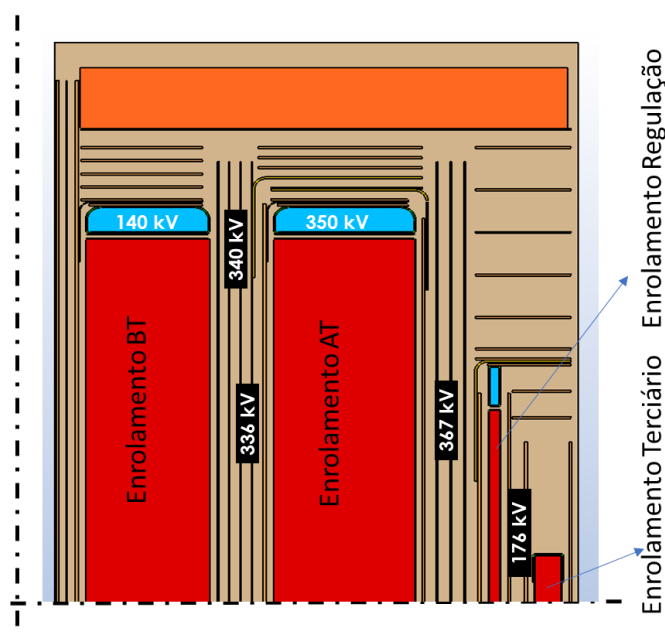


Figura 41 – Solicitações dielétricas caso 3

4.3.3. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO

Neste caso o campo elétrico será analisado nas zonas mais gravosas, que é a zona entre o enrolamento de baixa tensão e alta tensão, entre enrolamento de alta tensão e regulação e por fim a da regulação e terciário, uma vez que apresentam valores de tensão consideráveis. Na Figura 42 ,Figura 43, Figura 44 e Figura 45 consegue-se observar os valores de fatores de

segurança obtidos entre os enrolamentos BT e AT superior, AT-BT meio, AT-Regulação e regulação-terciário, respetivamente. Observou-se que os fatores de segurança obtidos cumprem as regras de dimensionamento ($\geq 1,20$). A restante análise encontra-se em anexo B (BT-Superior e BT-MEIO-CM).

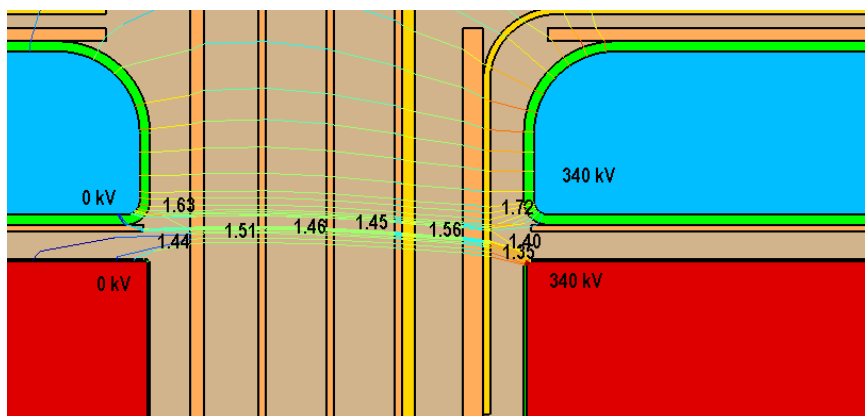


Figura 42 – Análise campo elétrico AT-BT cima Caso 3

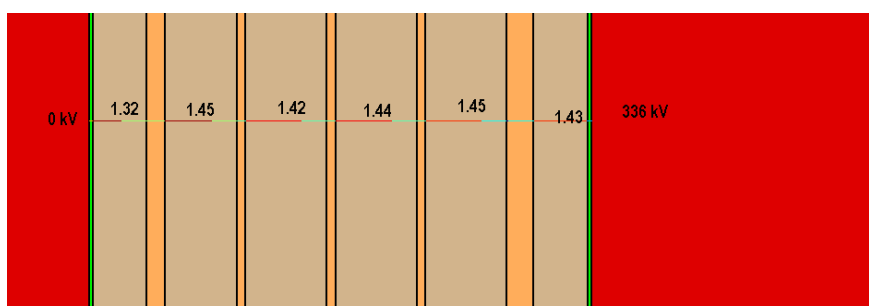


Figura 43- Análise campo elétrico AT-BT meio Caso 3

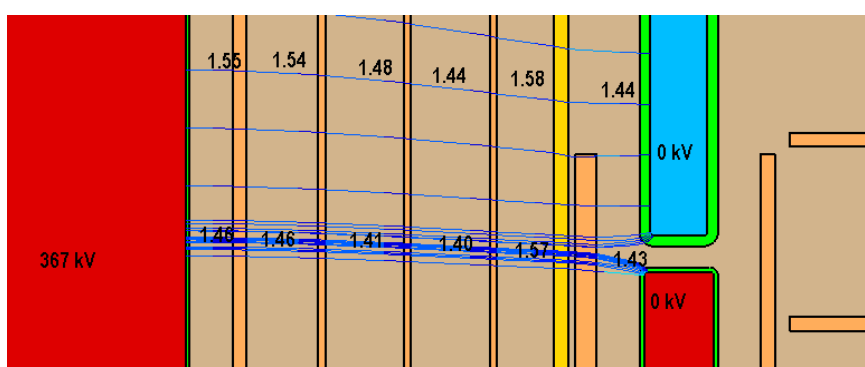


Figura 44- Análise campo elétrico AT-Regulação superior Caso 3

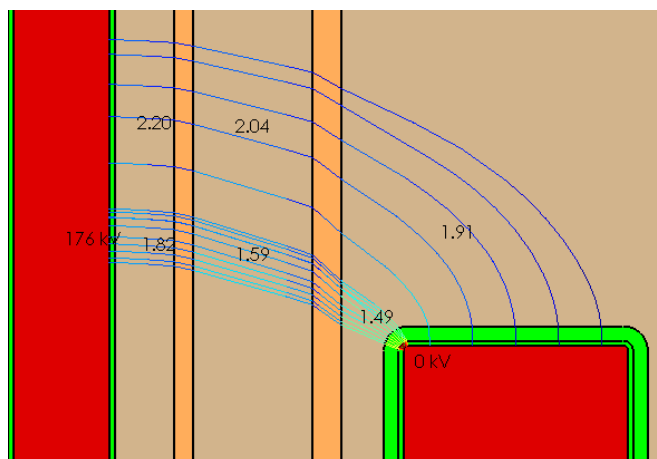


Figura 45 - Análise campo elétrico Regulação-terciário superior Caso 3

Na Tabela 17 pode-se observar os valores do campo elétrico obtidos na aresta dos enrolamentos. O maior valor obtido foi no enrolamento de baixa tensão, de 10,8 kV/mm, mas ainda dentro dos limites admissíveis (12 kV/mm).

Tabela 17 - Valores do campo elétrico na aresta -caso 3 óleo mineral

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)			
AT	BT	REG	Terciário
10,00	10,80	8,11	10,20

Neste caso o valor da deslizante apenas será analisada no tubo mais próximo do enrolamento da baixa tensão. O valor de fator de segurança para esta deslizante é de 1,51, o que cumpre com as regras de dimensionamento ($\geq 1,20$).

4.4. CASO 1- ÓLEO ÉSTER

4.4.1. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO

Nas simulações para óleo éster, em todos os casos, os canais de óleo junto aos enrolamentos terão que ser aumentados em 33%, onde a razão está explicada no ponto 2.5.4. Além disso, as alturas dos calços também serão aumentadas em 25%.

Na Tabela 18 pode-se observar os valores de fatores de segurança mínimos obtidos para óleo éster para as zonas entre o circuito magnético (CM) e o enrolamento de baixa tensão (BT),

entre os enrolamentos de baixa tensão e alta tensão (AT) e entre o enrolamento de alta tensão e a regulação (REG) e os valores aplicados de DIL. Observa-se que se obteve os fatores de segurança superiores ou iguais ao valor mínimo (1,32) o que cumpre as regras de dimensionamento.

Tabela 18 – Valores de fatores de segurança no óleo éster no caso 1

Zona	Início-Fim	70 kV	82 kV	140 kV	141 kV	169 kV
CM-BT-SUP	CM-Tubo	2,19	-	-	-	-
	Tubo -BT	1,77	-	-	-	-
CM-BT-MEIO	CM-Tubo	-	1,75	-	-	-
	Tubo-BT	-	1,52	-	-	-
BT-AT-SUP	BT-Tubo	-	-	1,53	-	-
	Tubo (2) – Tubo (3)	-	-	2,15	-	-
	Tubo (3) - AT	-	-	1,57	-	-
BT-AT-MEIO	BT-Tubo	-	-	-	1,44	-
	Tubo (2) – Tubo (3)	-	-	-	1,98	-
	Tubo (3) - AT	-	-	-	1,52	-
AT-REG-SUP	AT-Tubo (2)	-	-	-	-	1,73
	Tubo (2) – Tubo (3)	-	-	-	-	1,77
	Tubo (3) - REG	-	-	-	-	1,80

Na Tabela 19 e na Tabela 20 consegue-se observar os valores obtidos dos campos elétricos nas arestas AT, BT e regulação e os valores de fatores de segurança das deslizantes, respetivamente. Consta-se que os valores obtidos cumprem os critérios de dimensionamento para éster (campos de aresta <10,9 kV/mm e deslizantes $\geq 1,32$).

Tabela 19 - Valores de campos elétricos nas arestas no óleo éster caso 1

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)		
AT	BT	REG
8,03	8,59	7,67

Tabela 20 - Valores de deslizante no óleo éster caso 1

Fatores de Segurança resultantes da Análise de Deslizantes		
AT -Tubo	BT - Tubo	REG -Tubo
2,09	1,56	1,53

4.4.2. SIMULAÇÃO DE CÁLCULO – GRANDEZAS ELÉTRICAS E DIMENSÕES

As variáveis que estão em avaliação neste cálculo são: a impedância de curto-circuito, as perdas por efeito de joule e vazio, os gradientes térmicos, massas e por fim o PEI. Após algumas iterações no *software* de cálculo de dimensionamento de transformadores da EFACEC, o CORET, obteve-se uma solução para éster que verifica as especificações técnicas propostas. Na Tabela 21 são apresentados os valores obtidos para o caso em éster. Inicialmente eram encontradas soluções com perdas em vazio mais elevadas que as obtidas na solução do óleo mineral, pelo que se aumentou a qualidade da chapa do circuito magnético (kW/kg inferiores) e aumentou-se o diâmetro do circuito magnético em 0,41% (ao aumentar a largura da chapa consegue-se diminuir as perdas em vazio uma vez que a massa do circuito magnético aumenta e a indução baixa). Para diminuir as perdas acrescentaram-se shunts (ecrãs magnéticos) em duas paredes da cuba para diminuir as perdas provocadas pelo campo magnético ao incidir sobre a cuba e consequentemente os aquecimentos nessas paredes da cuba, e assim cumprir com o PEI. Adicionalmente, para cumprir com os aquecimentos garantidos neste transformador, foi necessário adicionar mais um radiador. O valor de PEI mínimo para este cálculo é de 99,6840%.

Tabela 21 – Características do transformador para óleo éster caso 1

Características	Valor
Massa total de instalação (kg)	56 056
Massa total de transporte (kg)	41 005
Massa do líquido (kg)	9 141
Dimensão do transformador (C x L x A mm)	4664 x 3445 x 4222
Impedância de curto-circuito nominal (Ucc %)	8,46
Perdas em vazio (P0)	10 403
Perdas em carga - Nominal (W)	94 119
Perdas totais – Nominal (W)	104 522
PEI (%)	99,6855
Óleo Superior (°C)- KNAN	50
Cobre médio(°C) -KNAN	62
Ponto quente (°C)- KNAN	77

4.5. CASO 2- ÓLEO ÉSTER

4.5.1. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO

Na Figura 46 e na Figura 47 consegue-se observar os valores de fator de segurança que se obtiveram passando o *design* para éster. Verifica-se, na Figura 46 que os valores dos fatores de segurança entre BT-Tubo (fator 1,39) e entre os tubos (fator 1,83 e 1,71) os valores estão dentro dos admissíveis ($\geq 1,32$). No entanto, na Figura 47, observa-se que o fator de segurança entre BT-Tubo (fator 1,22) não se encontra dentro dos valores admissíveis.

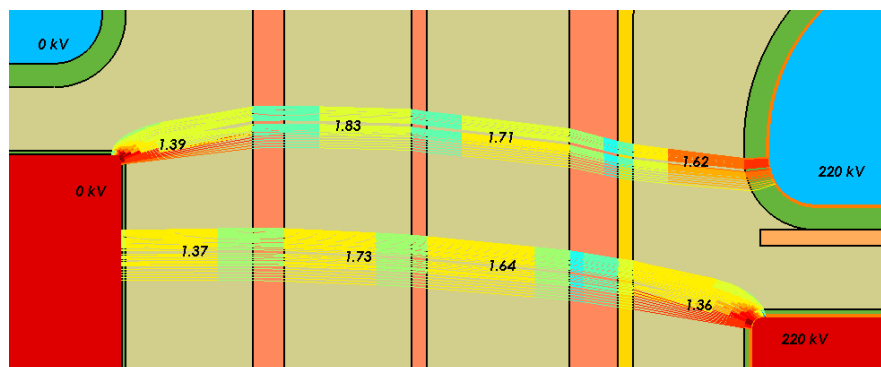


Figura 46 – Análise de campo elétrico BT-AT superior caso 2 éster



Figura 47 - Análise de campo elétrico BT-AT meio caso 2 problema éster

Para solucionar este problema, teve que se aumentar em 37,5% o segundo canal de óleo (fator de segurança de 1,50) e em 11% o terceiro canal de óleo (com fator de segurança de 1,47), para cumprir os fatores de segurança desejados. Com esta distribuição de canais o seu fator de segurança irá diminuir, para melhorar os outros, porque nesse canal irá ter mais tensão. Assim, na Figura 48 e na Figura 49 , consegue-se observar os novos fatores de segurança que cumprem com as regras de dimensionamento, para análise BT-AT superior e meio, respectivamente.

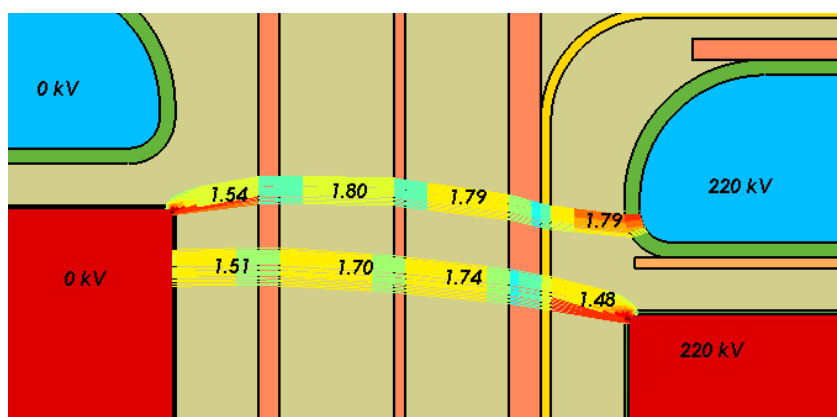


Figura 48- Análise de campo elétrico BT-AT caso 2 após correção

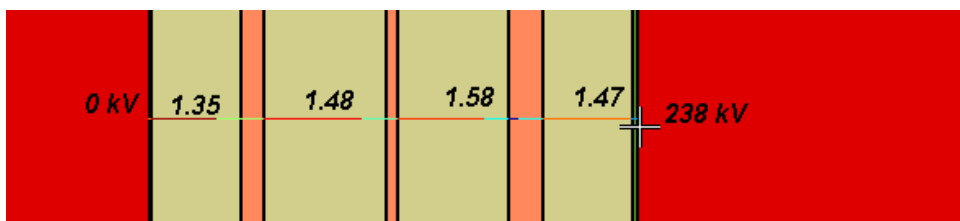


Figura 49- Análise de campo elétrico BT-AT meio caso 2 problema 1 resolvido

Por fim análise entre a AT e a regulação. Em éster, o valor do campo de aresta na regulação e os fatores de segurança de campo elétrico no óleo cumpriam as regras de dimensionamento. No entanto, ao efetuar a medição da deslizante no enrolamento, apresentava um valor muito abaixo do mínimo (1,32). Assim, para solucionar o problema, teve-se que mudar a estrutura isolante, mais precisamente na parte da regulação, onde se retira o isolamento duplo (*edge strip*), e se coloca um aro metalizado com a proteção de um moldado para proteger o enrolamento. Neste caso, a deslizante já não é necessária ser medida por causa do moldado. Assim, na Figura 50 e Figura 51 observa-se a análise do campo elétrico entre a alta tensão e a regulação e o valor de campo elétrico na aresta da regulação com um valor 7,29 kV/mm, respetivamente. As restantes análises de campo elétrico (BT-Superior e BT meio- CM) encontram-se em anexo A.

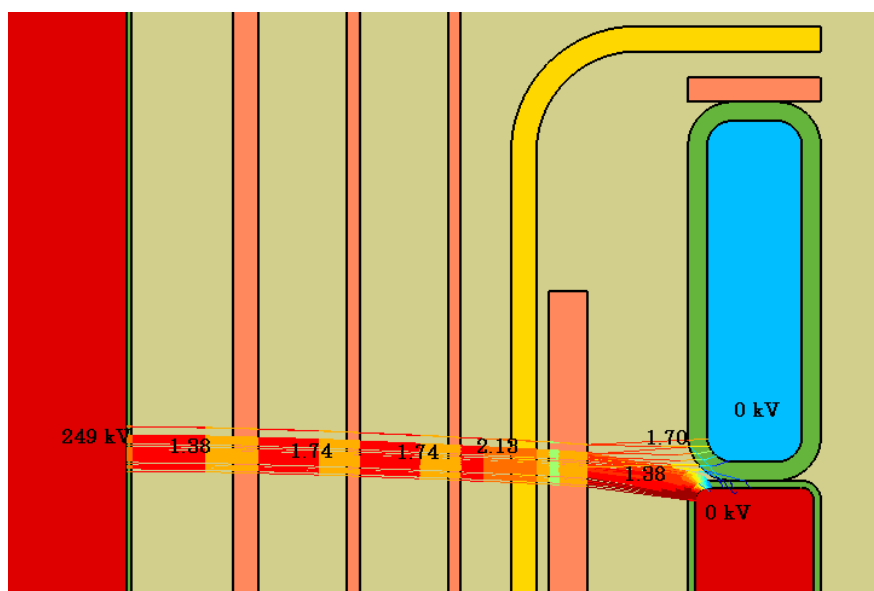


Figura 50 – Alteração e análise de campo elétrico para éster AT-REG caso 2

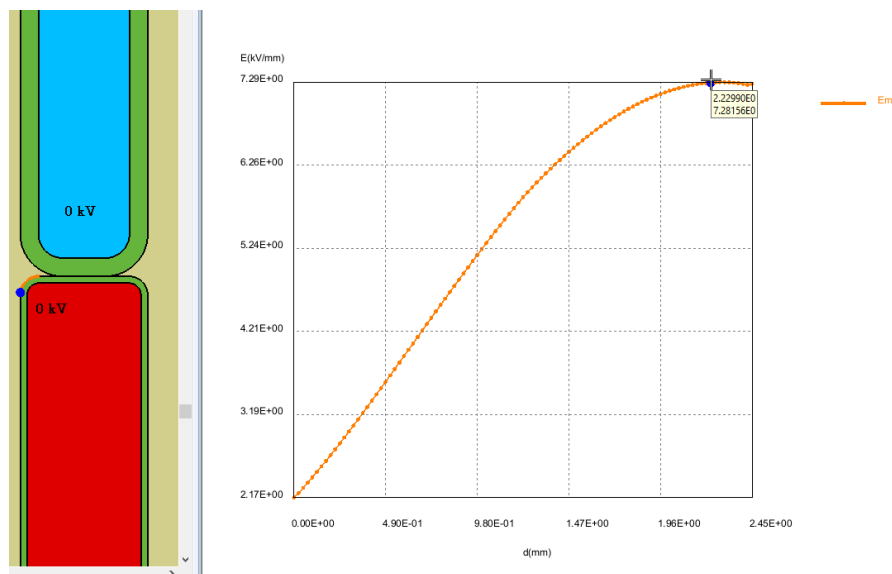


Figura 51 – Campo de aresta regulação em éster caso 2

Na Tabela 22 conseguem-se observar o resumo dos valores do campo elétrico nas arestas neste caso em éster.

Tabela 22 - Comparação dos campos de aresta por enrolamento no caso 2 éster

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)		
AT	BT	REG
8,72	9,01	7,29

Por último foi analisada a deslizante no tubo da baixa tensão pois o enrolamento de alta tensão e a regulação estão protegidas por um moldado. Na Tabela 23 encontra-se a análise de deslizante em éster na BT.

Tabela 23 – Análise de deslizante em éster - caso 2

Fatores de Segurança resultantes da Análise de Deslizantes	
Enrolamento -tubo	Éster
BT	1,60
AT	1,46

4.5.2. SIMULAÇÃO DE CÁLCULO – GRANDEZAS ELÉTRICAS E DIMENSÕES

Na Tabela 24 encontra-se os valores obtidos para éster. Numa primeira fase, ao passar o *design* para éster altera, mais uma vez, a impedância, as perdas, massas e dimensões. Relativamente aos gradientes, aumentamos a dimensão radial da AT (visto que tinha um maior gradiente) e aumentando a dimensão radial (que também aumenta a impedância de curto-circuito) consegue-se ter mais cobre (secção), menores perdas de RI^2 o que faz baixar ligeiramente o gradiente. Nas perdas em vazio, aumentou-se o diâmetro do circuito magnético o que baixou ligeiramente as perdas em vazio e com isso cumprir o PEI. Para cumprir os aquecimentos, elevaram-se os radiadores 200 mm com o objetivo de ter uma maior eficiência, baixando assim os valores de aquecimento e cumprir os valores garantidos.

Tabela 24 - Características do transformador do caso 2 para óleo éster

Características	Valor
Massa total de instalação (kg)	96 334
Massa total de transporte (kg)	68 382
Massa do líquido (kg)	15 075
Dimensão do transformador (C x L x A mm)	5386x 3519x 4711
Impedância de curto-circuito nominal (Ucc %)	10,68
Perdas em vazio (P0) (W)	20 140
Perdas em carga – Nominal (W)	218 195
Perdas totais - Nominal (W)	238 335
PEI (%)	99,7341
Óleo Superior (°C) – KNAF /KNAN	38/ 37
Cobre médio(°C) – KNAF /KNAN	54 / 48
Ponto quente (°C) – KNAF /KNAN	68/58

4.6. CASO 3- ÓLEO ÉSTER

4.6.1. ANÁLISE DE CAMPO ELÉTRICO

Na Figura 52 , Figura 53, Figura 54 e Figura 55 consegue-se observar os valores de fatores de segurança em éster nas mesmas zonas que foram analisadas anteriormente para óleo mineral. Verifica-se que os valores obtidos estão dentro dos valores admissíveis ($\geq 1,32$). De realçar que se ainda aumentou a distância entre enrolamento BT-AT (canal onde se encontra o fator 1,64 aumento em 11%) para cumprir o fator de deslizante, como se irá ver mais à frente. A restante análise encontra-se em anexo B (BT-Superior e BT-MEIO-CM).

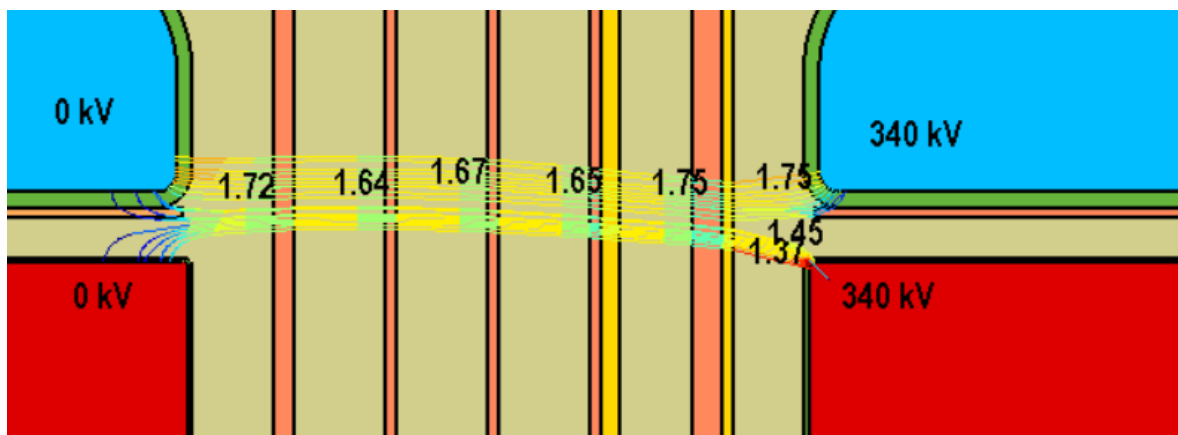


Figura 52 – Análise campo elétrico AT-BT cima éster caso 3

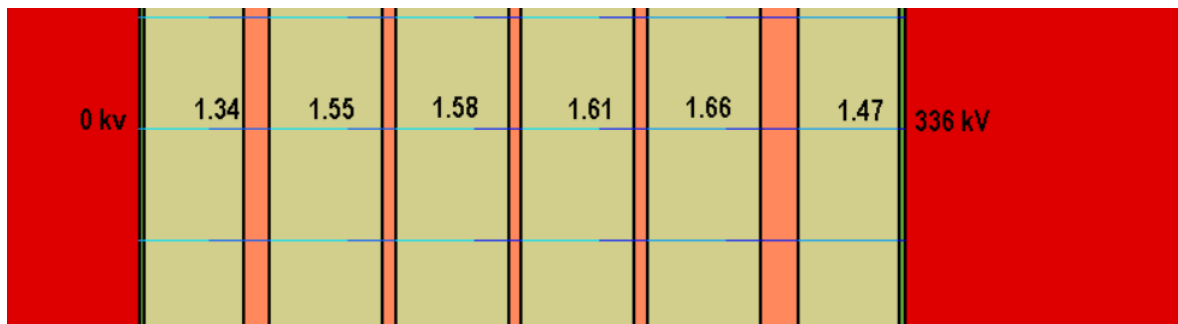


Figura 53 - Análise campo elétrico AT-BT meio éster caso 3

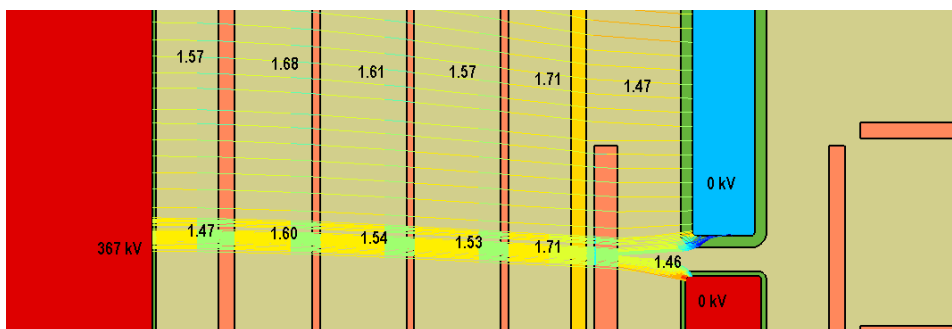


Figura 54 – Análise de campo elétrico AT-REG éster caso 3

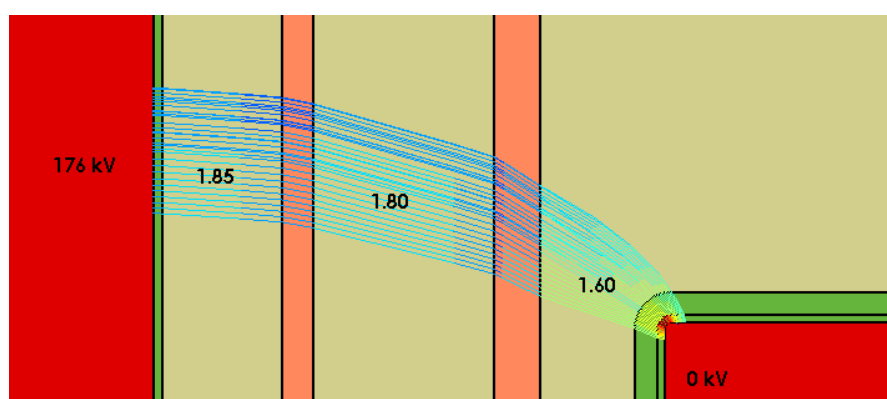


Figura 55 - Análise de campo elétrico Regulação-Terciário éster caso 3

Na Tabela 25 encontram-se os valores de campo elétrico nas arestas dos enrolamentos de alta tensão (AT), baixa tensão (BT), na regulação (REG) e no terciário.

Tabela 25 – Valores de campo elétrico na aresta caso 3 éster

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)			
AT	BT	REG	Terciário
9,26	9,76	7,36	8,60

Ao passar as dimensões do cálculo para éster, notou-se na análise de campo elétrico, que a deslizante no tubo mais próximo de baixa tensão (a única que pode apresentar valores de deslizantes elevados uma vez que não há nenhuma proteção para o enrolamento), apresentava um fator de segurança baixo para éster, com valor de 1,27. Então, teve-se que aumentar, mais 11% a distância entre enrolamentos (canal onde se encontra o fator 1,64 na

Figura 52) e assim aumentar essa distância que a deslizante percorre e diminuir as linhas equipotenciais no canal entre o enrolamento BT e tubo. Ao fazer essa alteração, conseguiu-se um aumento de fator de valor 1,32, o que para éster, já é um fator de segurança aceitável.

4.6.2. SIMULAÇÃO DE CÁLCULO – GRANDEZAS ELÉTRICAS E DIMENSÕES

Na Tabela 26 encontra-se as características do transformador em óleo éster. Uma vez que na primeira iteração para éster obteve-se um valor de PEI elevado, diminui-se a altura axial dos enrolamentos e a qualidade da chapa para diminuir o custo final. Ao diminuir a altura axial do cabo, tem-se uma maior densidade de corrente o que origina maior perdas (menos cobre, menos secção o que origina mais perdas). A impedância de curto-circuito aumentou. Como os aquecimentos ainda estavam folgados, retirou-se uma alheta por radiador baixando assim o custo final do transformador.

Tabela 26 - Características do transformador do caso 3 para óleo éster

Características	Valor
Massa total de instalação (kg)	235 698
Massa total de transporte (kg)	154 077
Massa do líquido (kg)	35 234
Dimensão do transformador (C x Lx A mm)	7698 x 4553 x 5909
Impedância de curto-circuito AT-BT nominal (U _{cc} %)	15,31
Impedância de curto-circuito AT-Terciário nominal (U _{cc} %)	12,24
Impedância de curto-circuito BT-Terciário nominal (U _{cc} %)	19,39
Perdas em vazio (W)	42 651

Perdas em carga AT-BT – Nominal (W)	334 134
Perdas em carga AT-Terciário - Mínima (W)	183 000
Perdas em carga BT-Terciário - Nominal (W)	170 715
PEI (%)	99,8086
Óleo Superior (°C) – KNAF /KNAN	51 / 56
Cobre médio(°C) – KNAF /KNAN	60 / 62
Ponto quente (°C) – KNAF /KNAN	77 / 77

4.7. ANÁLISE COMPARATIVA

4.7.1. CASO 1

Análise de campo elétrico

Após a obtenção dos resultados dos valores de fatores de segurança para óleo mineral e para éster nos três casos, conseguiu-se observar que, no óleo éster, apresentam maiores fatores de segurança, isto devido a que a permitividade relativa do óleo éster é superior à do óleo mineral e devido ao aumento da distância de enrolamentos. Apresentando alguns exemplos, na Figura 56 e na Figura 57 consegue-se observar a comparação dos valores de fatores de segurança obtidos para óleo éster e para óleo mineral.

Os valores de fatores de segurança podem ser observados no subcapítulo 4.1.3 para óleo mineral e 4.4.1 para óleo éster.

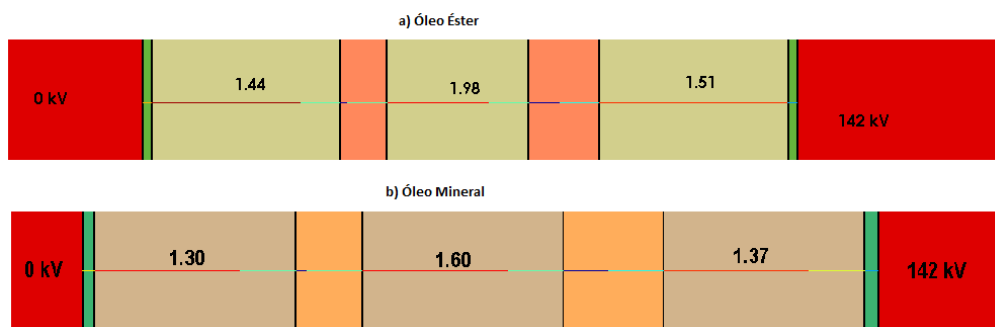


Figura 56 – Éster Versus Óleo mineral -Fatores de segurança caso 1 BT-AT meio

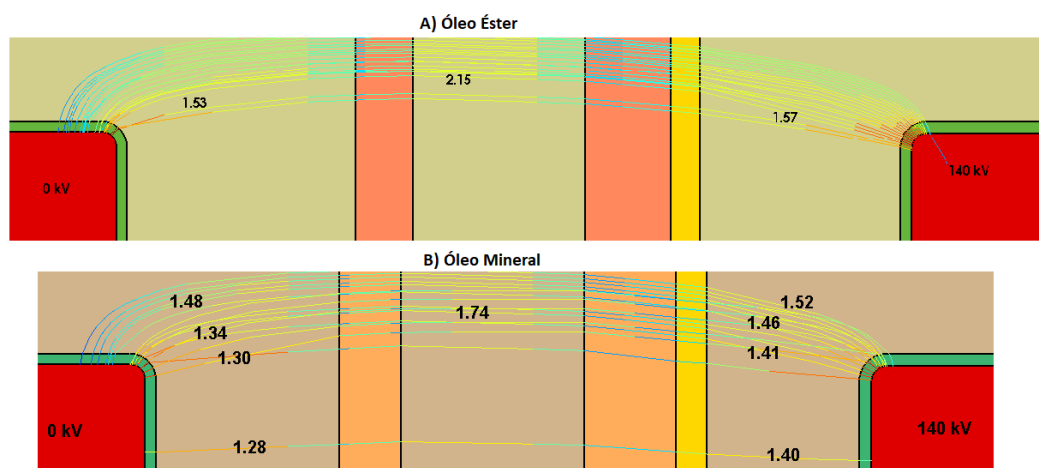


Figura 57 - Éster Versus Óleo mineral -Fatores de segurança caso 1 BT-AT Superior

A comparação dos valores dos campos elétricos na aresta dos enrolamentos encontra-se na Tabela 27. Consegue-se observar que para éster obtém-se valores de campo elétrico na aresta menores do que no óleo mineral, uma vez que se aumenta a distância entre enrolamentos.

Tabela 27 - Comparação dos valores de campos elétricos Óleo mineral vs Éster caso 1

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)					
AT		BT		REG	
O.M	Éster	O.M	Éster	O.M	Éster
9,68	8,03	10,30	8,59	8,65	7,67

No entanto, os valores de deslizantes pioram em óleo éster, uma vez que no éster tem-se canais superiores entre o enrolamento e o tubo adjacente, o que naquele canal obtém-se mais

linhas equipotenciais o que origina um menor fator de segurança para a deslizante no tubo. Na Tabela 28 consegue-se observar os valores de fatores de segurança para este caso.

Tabela 28 – Comparação de deslizante óleo mineral vs éster caso 1

Fator de deslizante nos tubos próximos dos enrolamentos					
BT -Tubo		AT-Tubo		REG -Tubo	
O.M	Éster	O.M	Éster	O.M	Éster
1,64	1,56	2,15	2,09	1,61	1,53

Análise das grandezas, massas e dimensões

No caso 1 estudou-se um transformador de potência de 20 MVA com uma tensão nominal de 63 kV no primário.

Como se pôde observar, os canais foram aumentados em um terço em cada canal entre o enrolamento e os tubos. Isso implicou ao aumento das dimensões do transformador. Neste caso em concreto, após feita essa alteração das distâncias, verificou-se no cálculo que as perdas tinham aumentado o que resultou num PEI próximo do limite. Com objetivo de aumentar o PEI, melhorou-se a qualidade da chapa e aumentou-se o diâmetro do circuito magnético e qualidade da chapa e assim diminuir as perdas em vazio e ainda se conseguiu reduzir ainda um pouco mais as perdas suplementares adicionando shunts em duas paredes da cuba que apresentavam um maior valor de temperatura. No entanto, a impedância de curto-circuito aumentou, devido ao aumento das distâncias entre enrolamentos. As dimensões alteraram-se também devido ao aumento dos canais e a alteração das dimensões radiais e axiais dos enrolamentos e do aumento do diâmetro do circuito magnético. A massa total aumentou devido ao aumento da massa da chapa magnética e de cuba e à maior massa de óleo. Por fim o custo deste transformador a passar para éster terá um incremento de 15,3%. Na Tabela 29 consegue-se observar os valores das grandezas e das massas e dimensões do transformador em óleo mineral e em éster, tanto como o impacto que se teve a passar para óleo éster.

Tabela 29 – Comparação das grandezas e massas óleo mineral versus éster caso 1

Característica	Óleo mineral	Óleo Éster	Impacto (%)
Dimensões – Comprimento (mm)	4 608	4 664	+1,21
Dimensões – Largura (mm)	3 443	3 445	+0,058
Dimensões – Altura (mm)	4 168	4 222	+1,29
Impedância de curto-circuito nominal (Ucc %)	8,31	8,46	+0,15
Massa Total de instalação (kg)	52 774	56 056	+6,22
Massa Total de transporte (kg)	38 108	41 005	+7,60
Perdas em vazio (W)	10 590	10 403	-1,76
Perdas em carga - Nominal (W)	93 131	94 119	+1,06

4.7.2. CASO 2

Análise de campo elétrico

Em relação aos fatores de segurança no óleo, neste caso, consegue-se obter um exemplo de comparação através da Figura 39 e Figura 47 que corresponde à análise entre enrolamentos BT-AT na zona do meio em óleo mineral e éster, respetivamente. Observou-se que o fator de segurança aumentou devido à permitividade do óleo éster ser superior à do óleo mineral e do aumento das distâncias entre os enrolamentos. Em relação aos valores de campo elétrico na aresta, na Tabela 30 consegue-se observar uma comparação dos valores que se obteve em óleo mineral e em éster. Em semelhança com o caso 1, obteve-se em éster valores de campo elétrico aplicados na aresta menores do que em óleo mineral.

Tabela 30 - Comparação dos valores de campos elétricos Óleo mineral vs Éster caso 2

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)					
AT		BT		REG	
O.M	Éster	O.M	Éster	O.M	Éster
10,80	8,72	11,0	9,01	8,96	7,29

Neste caso, os valores de fator de deslizante do tubo próximo do enrolamento de baixa tensão e alta tensão. Na Tabela 31 consegue-se observar os valores de comparação de fatores de deslizante entre óleo mineral e éster.

Tabela 31 - Comparação de deslizante óleo mineral vs éster caso 2

BT-Tubo		AT-Tubo	
O.M	Éster	O.M	Éster
1,62	1,60	1,52	1,46

Análise das grandezas elétricas, massas e dimensões

No caso 2 apresentou-se um transformador de 50 MVA com uma tensão de 132 kV no primário. Na Tabela 32 apresenta-se o impacto resultante da utilização de éster como fluido dielétrico. Relativamente ao impacto no tamanho do transformador, é resultante da alteração das distâncias entre os enrolamentos de baixa e alta tensão devido aos fatores de segurança obtidos inicialmente na avaliação do campo elétrico para éster. A impedância de curto-circuito também aumentou neste caso uma vez que aumentaram as distâncias entre enrolamentos o que pela sua vez aumentou a massa total de instalação. No entanto, as perdas em vazio têm aqui uma particularidade. No *software* de cálculo da Efacec, tem um campo que se denomina por “baixar chapa mais larga” que significa que, ao ter esse campo ativo, o circuito magnético tem o mesmo diâmetro, mas tem menos quantidade de chapa, o que faz com que a indução aumente e consequentemente as perdas. Ao passar para éster, por opção, retirou-se esse campo ativo, o que originou assim umas menores perdas em vazio, porque a

indução também baixa. Ao passar o transformador para éster estima-se um aumento de 16% de custo.

Tabela 32 - Comparação das grandezas e massas óleo mineral versus éster caso 2

Característica	Óleo mineral	Óleo Éster	Impacto (%)
Dimensões – Cumprimento (mm)	5 309	5 386	+1,45
Dimensões - Largura(mm)	3 496	3 519	+0,65
Dimensões – Altura (mm)	4 639	4 711	+1,55
Impedância de curto-circuito nominal (Ucc %)	9,99	10,68	+0,69
Massa Total de instalação (kg)	92 239	96 334	+4,43
Massa Total de transporte (kg)	64 288	68 382	+6,36
Perdas em vazio (W)	20 306	20 140	-0,81
Perdas em carga – Nominal (W)	204 029	218 195	+6,94

4.7.3. CASO 3

Análise de campo elétrico

Para comparação de fatores de segurança no óleo, e apresentando um exemplo, pode-se observar na Figura 42 e na Figura 52 os valores de fatores de segurança para óleo mineral e éster, respetivamente, entre o enrolamento de baixa tensão e alta tensão. Consegue-se obter valores de segurança superiores no éster em relação ao mineral também como se observou nos casos anteriores. Na Tabela 33 consegue-se observar a comparação dos valores de campos elétricos em óleo mineral e em éster. Conseguiu-se constatar que os valores em éster são mais satisfatórios uma vez que apresentam menor valor de campo elétrico.

Tabela 33- Comparação dos valores de campos elétricos Óleo mineral vs Éster caso 3

Valor do campo elétrico na aresta (kV/mm)							
AT		BT		REG		Terciário	
O.M	Éster	O.M	Éster	O.M	Éster	O.M	Éster
10,00	9,26	10,80	9,76	8,11	7,36	10,20	8,60

Em relação aos fatores das deslizantes, inicialmente em óleo mineral obteve-se um fator de segurança de deslizante de 1,51 para o tubo adjacente ao enrolamento da baixa tensão. Em éster, no fim de todas as alterações, obteve-se um fator de segurança de deslizante de 1,32.

Análise das grandezas elétricas, massas e dimensões

Neste caso, analisou-se o transformador de maior potência dos últimos casos analisados anteriormente. Na Tabela 34 apresentam-se os impactos do éster, com a solução que foi encontrada. O comprimento do transformador aumentou ligeiramente assim como a impedância, as massas totais, as perdas e o custo. Além do aumento da distância entre enrolamentos e tubo, ainda teve que se aumentar a distância em 11% entre enrolamentos para cumprir o fator de segurança da deslizante. Ao passar o transformador para éster estima-se um aumento de 17.5% de custo.

Tabela 34 - Comparação das grandezas e massas óleo mineral versus éster caso 3

Característica	Óleo mineral	Óleo Éster	Impacto (%)
Dimensões – Comprimento (mm)	7 600	7 698	+1,29
Dimensões - Largura(mm)	4 613	4 553	-1,30
Dimensões – Altura (mm)	5 895	5 909	+0,23
Impedância de curto-circuito AT-BT nominal Ucc (%)	14,96	15,31	+0,35

Massa Total de instalação (kg)	230 919	235 698	+2,06
Massa Total de transporte (kg)	150 421	154 077	+2,43
Perdas em vazio (W)	40 897	42 651	+4,29
Perdas em carga AT-BT - Nominal (W)	320 176	334 134	+4,36
Perdas em carga AT-Terciário - Mínima (W)	180 348	183 000	+1,47
Perdas em carga BT-Terciário - Nominal (W)	169 050	170 715	+0,98

4.8. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Após o estudo detalhado dos três casos para óleo mineral e para éster, consegue-se constatar que haverá bastante diferenças entre a aplicação destes fluidos isolantes num transformador de potência. As principais diferenças entre a aplicação destes fluidos é na análise do campo elétrico do transformador e o impacto que têm em relação às grandezas elétricas e dimensões e massas do transformador. Depois das análises aos casos, conclui-se que no éster em relação ao óleo mineral consegue-se obter menores valores de campos elétricos na aresta dos enrolamentos e maiores fatores de segurança no óleo. Porém, os valores de fator das deslizantes pioram. Ao aumentar a distância entre enrolamentos e aplicando o óleo éster a distribuição do campo elétrico é mais homogeneizado, obtendo assim maiores valores de fatores de segurança no óleo. Em relação aos campos na aresta dos enrolamentos também melhoram devido à permissividade do óleo e do aumento da distância entre enrolamentos. Por fim as deslizantes quanto maior o canal entre enrolamento e o tubo adjacente, maior será a quantidade de linhas equipotenciais presentes nesse enrolamento o que origina um menor fator de segurança de deslizante.

Em geral, os transformadores em éster apresentaram maiores perdas em carga, maior impedância, maior massa de instalação e de transporte e maiores dimensões. Em relação às perdas em carga, quanto maior for a potência e tensão de um transformador maior será este

aumento, como se pôde observar nestes três casos. As percentagens das perdas em carga variaram de 1,06% a 6,94% na posição nominal dos transformadores. Estas percentagens em valor numérico representam uma variação de 0,988 kW e 14,16 kW. As perdas em vazio aumentam com o aumento das distâncias. No caso 1 e 2 teve-se que melhorar a chapa do circuito magnético devido a cumprir o PEI, o que se obteve menores perdas em vazio em relação ao cálculo do óleo mineral. No caso 3, optou-se por baixar a qualidade do circuito magnético, e as perdas em vazio aumentaram ligeiramente.

No caso 1, as massas totais de transporte e de instalação apresentam aumentos de 7,60% e de 6,22%, respetivamente. No caso 2 a massa total de instalação aumentou 4,88% e a massa total de transporte houve um aumento de 6,75%. Para o caso 3 a incrementação da massa de instalação e de transporte rondam os 2 %. O aumento das massas deve-se ao aumento dos canais de óleo, que consequentemente se aumenta as massas de óleo, massa de cuba, mais chapa magnética, entre outros. Para o caso 1 para além disso, adicionou-se mais um radiador. No caso 2 e 3 ainda se teve que aumentar ainda mais a distância entre o enrolamento AT-BT para cumprir com os fatores de segurança do campo elétrico.

Quanto às dimensões dos transformadores, aumentaram, mas não apresentam incrementos significativos. Embora não se tenha obtido um impacto muito grande, é sempre importante analisar estas dimensões uma vez que no dimensionamento tem que se ter atenção às dimensões máximas impostas pelo cliente.

Em relação aos aquecimentos em óleo mineral e em éster, a análise para o fluido biodegradável é mais rigorosa devido à viscosidade. Assim, para cumprir com os aquecimentos no caso 1 foi necessário adicionar mais um radiador e no caso 2 subir os radiadores 200 mm para aumentar a eficiência da transferência de calor.

Por fim, a análise de custo. Apesar de todas as alterações feitas em cada caso, os transformadores em éster são mais caros, sendo o que tem mais impacto o preço por quilograma do éster. Nos casos estudados, o custo incrementa entre 15% e 17% em relação ao do óleo mineral.

5. CONCLUSÕES

5.1. ANÁLISE CONCLUSIVA

Os transformadores de potência são alvo de contínuos processos de melhoria, como a possibilidade de aplicar fluidos isolantes alternativos, tais como ésteres naturais e sintéticos. O óleo mineral é proveniente do petróleo que por ser cada vez mais escasso, torna esta mudança cada vez mais necessária. No contexto atual de transição energética, em que o sistema energético evoluiu mais nos últimos dez anos que nos cinquenta anos anteriores, e que estamos ante uma fase de evolução exponencial, urge a aplicação de fluidos alternativos mais amigos do ambiente e implica um controlo total da tecnologia por parte da indústria de transformadores de potência e confiança por parte dos clientes. Todavia, este equipamento tem uma elevada importância no sistema elétrico uma vez que é um dos responsáveis pela transmissão de energia elétrica.

Nesse sentido, esta dissertação pretendeu contribuir para o estudo da aplicação do óleo éster em transformadores de potência. Este estudo envolveu três fases importantes para a análise da aplicação do fluido isolante: estudo das solicitações dielétricas, estudo dos campos elétricos e o estudo dos impactos do mesmo nos transformadores de potência. Posto isto, este estudo clarifica os pontos quais as grandezas elétricas que sofrem impacto com a alteração para éster, nomeadamente as perdas em carga e a impedância, e as massas e dimensões dos transformadores. Além disso, demonstra que o campo elétrico no óleo éster

é mais homogêneo e que se consegue obter valores de campo elétrico na aresta mais folgados do admissível.

No entanto, não se pode avaliar o éster só pelo que foi dito anteriormente. O éster (por exemplo o sintético) consegue suportar maiores temperaturas em relação ao óleo mineral, suporta mais quantidade de água que é libertada pelo papel, mantendo o papel mais seco, aumentando a sua vida útil. Além disso, este é mais biodegradável, mostrando ser mais amigo do ambiente, o que acaba por ser uma grande vantagem.

Todavia são necessários mais estudos nesta área para a implementação do éster em transformadores de potência, em que alguns serão abordados no subcapítulo seguinte.

5.2. PERSPETIVAS FUTURAS

Em relação ao desenvolvimento de trabalhos futuros, há bastante a fazer uma vez que nesta área a informação não é partilhada na comunidade científica. Outras novas linhas de investigação nesta área podem ser:

- Estudo de novas estruturas isolantes otimizadas para éster;
- Estudo térmico dos enrolamentos;
- Estudo do ciclo de vida útil do éster e dos materiais imersos no mesmo;
- Estudo de aplicação do óleo éster em transformadores de distribuição aéreos.

Referências Bibliográficas

- [1] “Pillars of the Future of Clean Energy – ‘The Three Ds’ — Uprise Energy _ Portable Renewable Energy.” [Online]. Available: <https://upriseenergy.com/blog/2019/11/22/pillars-of-the-future-of-clean-energy-the-three-ds>. [Accessed: 16-Dec-2021].
- [2] W. E. Council, “World Energy - Trilema Index|2019,” *Wolrd Energy Counc.*, Dec. 2019.
- [3] “ENSE-Segurança Energética em Tempos de Mudança.” [Online]. Available: <https://www.ense-epe.pt/news/seguranca-energetica-em-tempos-de-mudanca/>.
- [4] “O Trilema Energético e a pontuação do Brasil - Bioblog by Novozymes.” [Online]. Available: <https://www.bioblog.com.br/o-trilema-energetico-e-a-pontuacao-do-brasil/>.
- [5] V. Manuel and A. Ribeiro, “Desenvolvimento e Análise de Indicadores de Condição de Transformadores de Potência,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.
- [6] J. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*. 2004.
- [7] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics*. 2004.
- [8] T. K. Saha and P. Purkait, “Transformer Insulation Materials and Ageing,” *Transform. Ageing*, pp. 1–33, 2017.
- [9] Aprendendo Elétrica, “Tipos de refrigeração dos transformadores - Aprendendo Elétrica.” [Online]. Available: <https://aprendendoeletrica.com/tipos-de-refrigeracao-dos-transformadores/>. [Accessed: 09-Nov-2021].
- [10] Illustrationprize, “Resfriamento de Transformadores e Métodos de Resfriamento.” [Online]. Available: <https://illustrationprize.com/pt/704-cooling-of-transfomer-and->

methods-of-cooling.html#OilNaturalAirNatural(ONAN).

- [11] Riverglennapts, “Sistema de resfriamento de transformadores e métodos.” [Online]. Available: <https://riverglennapts.com/pt/transformer-accessories/885-transformer-cooling-system-and-methods.html>. [Accessed: 09-Nov-2021].
- [12] “IEC 60076-3 : Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air,” 2013.
- [13] Electrical4u, “Impulse Test of Transformer,” 2018. [Online]. Available: <https://www.electrical4u.com/impulse-test-of-transformer/>. [Accessed: 12-Nov-2021].
- [14] “STANDARD TEST PROCEDURE-TRANSFORMER & REACTOR.” [Online]. Available: https://www.eqmagpro.com/wp-content/uploads/2021/06/Annexure-II-Specific-Requirement_Rev-05_with-Annexures-67-77.pdf. [Accessed: 08-Jan-2022].
- [15] “Transformer Oil and Winding Temperature Rise Test,” *Electrical4U.Com*, 2011.
- [16] E. Yuliastuti, “Analysis of dielectric properties comparasion between mineral oil and synthetic ester oil,” Delft University of Technology, 2010.
- [17] “Permissividade elétrica- Electrical e-Library.” [Online]. Available: <https://www.electricalibrary.com/2018/11/02/o-que-e-permissividade-eletrica/>. [Accessed: 10-Mar-2022].
- [18] Midel, “Midel FAQ - TRANSFORMER DESGIN ESTER IMPACT,” no. May, pp. 1–14, 2020.
- [19] P. Rozga, A. Beroual, P. Przybylek, M. Jaroszewski, and K. Strzelecki, “A review on synthetic ester liquids for transformer applications,” *Energies*, vol. 13, no. 23, pp. 1–33, 2020.
- [20] Midel, “Midel 7131 - Moisture Tolerance,” 2014.
- [21] D. S. Derick Njombog Tanteh, Shafiq Yousef Al Liddawi, “PROPERTIES OF TRANSFORMER OIL THAT AFFECT EFFICIENCY . Contact :,” no. January, p. 41, 2014.

- [22] D. M. Mehta, P. Kundu, A. Chowdhury, V. K. Lakhiani, and A. S. Jhala, "A review on critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: Part 1," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 2, pp. 873–880, 2016.
- [23] A. Oliveira, "Diéletricos usados em transformadores de distribuição." [Online]. Available: https://paginas.fe.up.pt/~ee99254/images/Apres_dielectricos.pdf. [Accessed: 05-Nov-2021].
- [24] D. M. Mehta, P. Kundu, A. Chowdhury, V. K. Lakhiani, and 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, pp. 1705–1712, 2016.
- [25] Midel, "MIDEL 7131 fluid properties." [Online]. Available: <https://www.midel.com/app/uploads/2018/05/MIDEL-7131-Product-Brochure.pdf>. [Accessed: 10-Jan-2022].
- [26] "Commission Regulation (EU)." [Online]. Available: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PI_COM:C\(2019\)5380&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PI_COM:C(2019)5380&from=EN). [Accessed: 02-Mar-2022].
- [27] W. Ziomek, K. Vijayan, D. Boyd, K. Kuby, and M. Franchek, "High voltage power transformer insulation design," *2011 Electr. Insul. Conf. EIC 2011*, no. June, pp. 211–215, 2011.

Anexo A. Análise campo elétrico BT caso 2

Na Figura 58 e na Figura 59 consegue-se observar a análise de campo elétrico entre o enrolamento de baixa tensão e o circuito magnético (CM) na parte superior e meio em óleo mineral. Na Figura 60 e na Figura 61 encontram-se a mesmas análises, só que para éster. Consegue-se observar, que o valor de fator de segurança é maior em éster do que em óleo mineral.

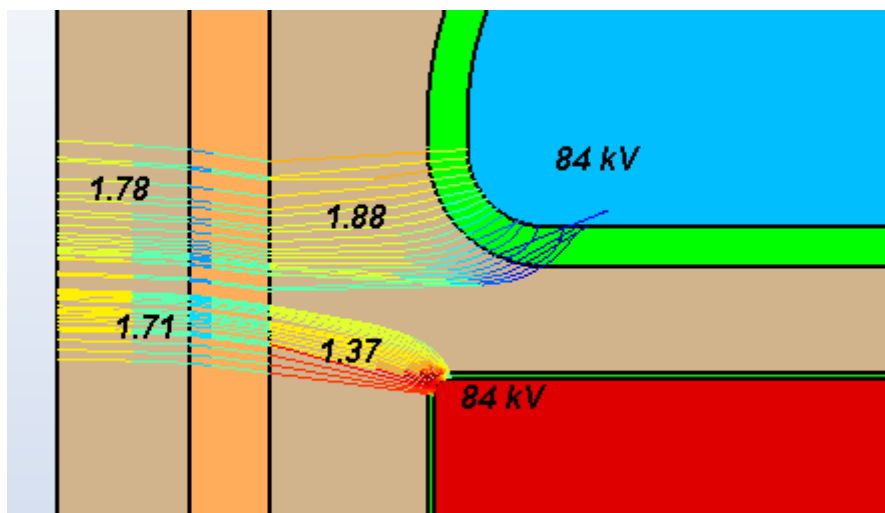


Figura 58 – Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM-Superior Caso 2

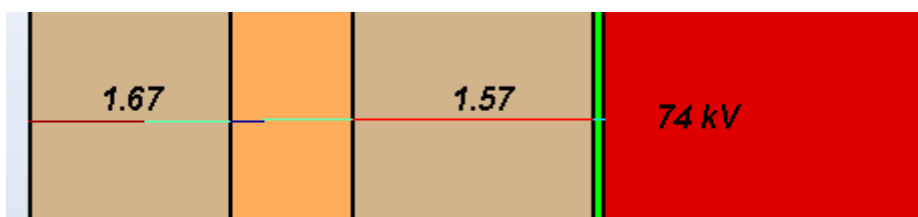


Figura 59 - Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM- Meio Caso 2

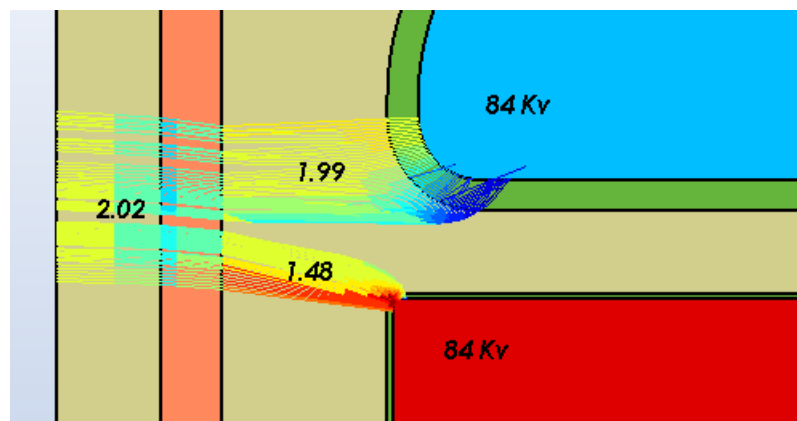


Figura 60 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM-Superior Caso 2

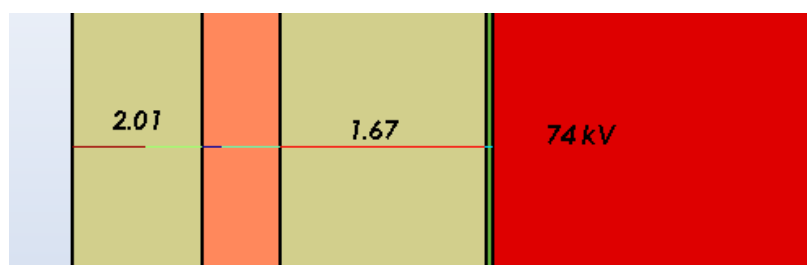


Figura 61 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM- Meio Caso 2

Anexo B. Análise campo elétrico BT caso 3

Na Figura 62 e na Figura 63 e na consegue-se observar a análise de campo elétrico entre o enrolamento de baixa tensão e o circuito magnético (CM) na parte superior e meio em óleo mineral. Na Figura 64 e na Figura 65 encontram-se a mesmas análises, só que para éster. Consegue-se observar, que o valor de fator de segurança é maior em éster do que em óleo mineral.

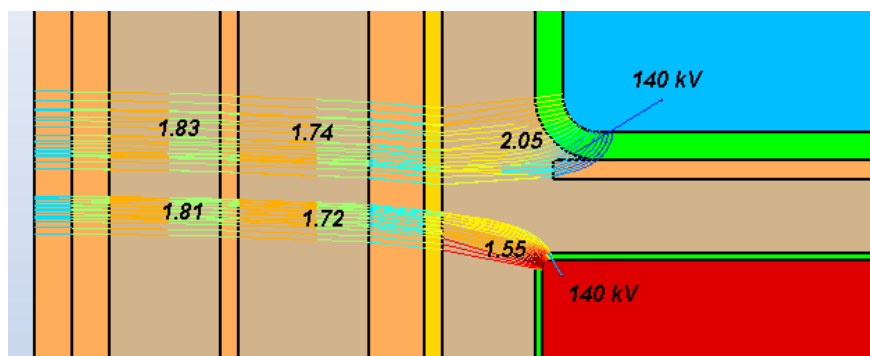


Figura 62 - Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM-Superior Caso 3

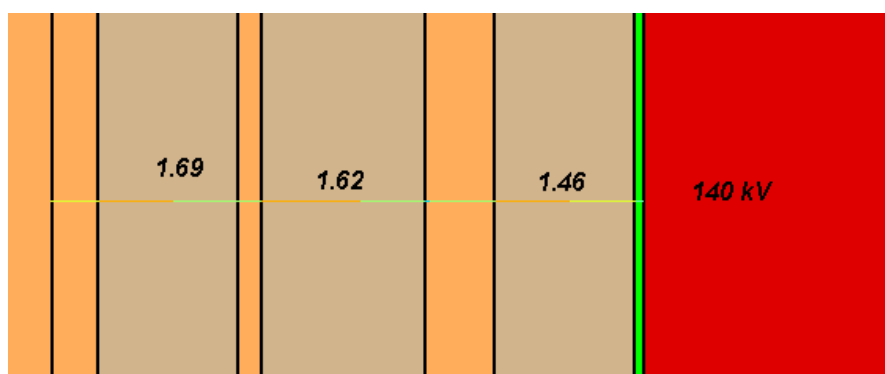


Figura 63 - Análise de campo elétrico em óleo mineral BT-CM- Meio Caso 3

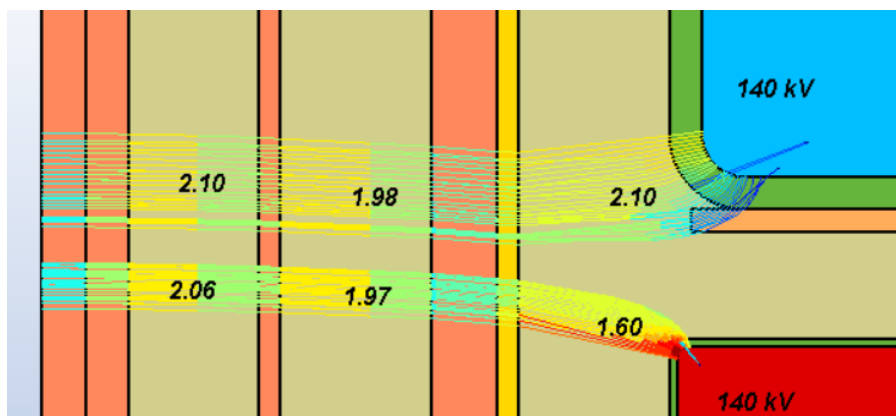


Figura 64 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM-Superior Caso 3

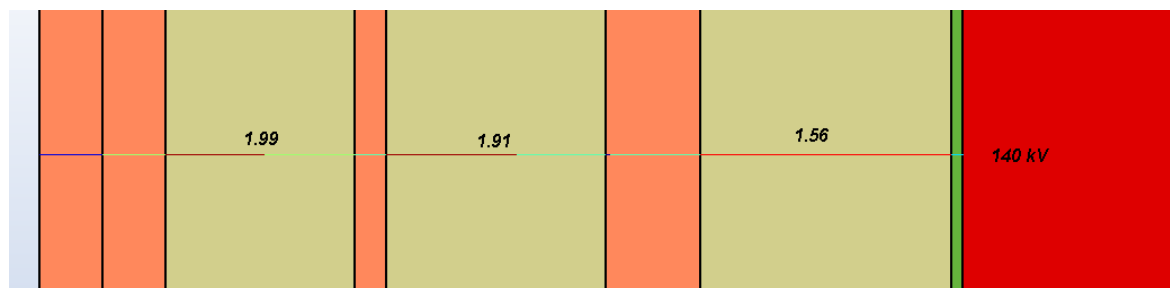


Figura 65 - Análise de campo elétrico em éster BT-CM- Meio Caso 3